
PROCESOS ACÚSTICOS EN RECINTOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Se trata en este tema de desarrollar inicialmente una breve historia de la evolución que con el paso de los siglos ha tenido la acústica arquitectónica, y como desde la civilización griega, ya se tuvieron en cuenta ideas acústicas en el diseño de algunos de sus recintos (los teatros).

Se expone también la evolución que ha tenido el campo sonoro, al encerrarlo dentro de un recinto, y los cambios, modificaciones y ventajas que se han presentado como consecuencia del mismo.

La enumeración y breve descripción de las teorías que permiten el estudio del campo sonoro en un recinto nos introducen en estos fenómenos. Así mismo, se realiza una clasificación general de los recintos, ateniéndonos a consideraciones acústicas, que se van a desarrollar posteriormente.

Uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta en el análisis del campo sonoro en el interior de un recinto es el coeficiente de reflexión que caracteriza a las paredes del mismo. El fenómeno de la reflexión del sonido se manifiesta cuando una onda llega a un plano límite, parte de la energía sufre una *devolución* al recinto, otra parte de la misma es absorbida y otra se transmite a través de la estructura. De esta forma podremos analizar conceptualmente el *coeficiente de reflexión, absorción y transmisión*. Podremos también determinar los valores extremos que pueden tomar, de tal forma que nos permitan caracterizar una pared determinada del recinto por su impedancia acústica. Evidentemente, el comportamiento de una misma pared dependerá en gran parte del tipo de onda incidente, del ángulo de incidencia, de la frecuencia de la onda, etc., pudiendo establecer un margen de variación en función de los parámetros comentados. Los objetivos específicos de este tema son los siguientes:

- 1°) *Concienciar que esta rama de la ciencia es tan antigua como la existencia del hombre.*
- 2°) *Dar a conocer la evolución y los avances que ha tenido a lo largo de los siglos.*
- 3°) *Introducir en las ideas del campo sonoro en recintos.*
- 4°) *Exponer los fenómenos de reflexión, refracción y difracción en recintos.*
- 5°) *Dar a conocer las teorías que permiten estudiar el campo sonoro en recintos.*
- 6°) *Presentar una clasificación acústica de los recintos, ateniéndonos a sus aplicaciones.*
- 7°) *Concepto de coeficiente de reflexión.*
- 8°) *Concepto de coeficiente de absorción y valores extremos que puede tomar.*

1.2. CONSIDERACIONES GENERALES

Analicemos en primer lugar las ideas acústicas de los teatros griegos, y el porqué de estas construcciones. El antiguo teatro griego se construía al lado de una colina, en forma semicircular y con una pared que reflejaba el sonido en la parte posterior del escenario. Se utilizaba para declamaciones, dramas, canciones, etc., no existía música como la de conciertos que se ha compuesto para conjuntos musicales desde el siglo XIII. El sitio al lado de una colina se escogía para reducir el ruido de fondo, así como para impedir que las cabezas de los espectadores interfiriesen con la transmisión directa del sonido a los oídos más distantes, como ocurría con filas horizontales de asientos. La forma semicircular se escogía para que el mayor número posible de personas se pudieran sentar lo más cerca posible del escenario. Se construía una pared en la parte posterior del escenario para eliminar ruidos externos y vistas superfluas, así como para reflejar las voces de los actores al público. En muchas representaciones, los actores griegos llevaban máscaras que exageraban sus facciones, para que se pudieran ver a mayores distancias, conteniendo algunas veces las mismas megáfonos para amplificar las voces. El éxito del teatro griego dependía del silencio absoluto, así como de las voces de los actores. El teatro griego en su época y lugar tenía un gran éxito, no pudiendo hacerse este tipo de construcciones en la actualidad, debido al ruido producido por aviones, coches y todo tipo de maquinaria, así como al repertorio musical existente hoy día.

La acústica arquitectónica como ciencia moderna, empezó a desarrollarse a finales del siglo pasado gracias a los estudios de W. C. Sabine, quien en el período comprendido entre 1877 y 1905 realizó los primeros grandes avances, iniciando en 1895 sus trabajos en el Fogg Art Museum (hoy Hunt Hall) de la Universidad de Harvard, y fue en esta época cuando encontró su ya clásica, ecuación de la reverberación. Posteriormente actuó como asesor en cuestiones de acústica en el diseño del Symphony Hall de Boston, considerada aún hoy en día como una de las de mejor acústica del mundo.

Sabine realizó todos sus estudios sobre la reverberación con la única ayuda de sus oídos y un cronómetro, ya que por entonces, era cuando empezaba a desarrollarse una nueva técnica basada en los progresos de la electricidad y la electrónica. El primero en traer los adelantos electrónicos propiciados por el desarrollo de la radiodifusión (micrófonos, amplificadores, altavoces, etc.) al campo de la acústica (medida del tiempo de reverberación, etc.), fue Frederick Vinton Hunt allá por los años treinta. Después de perfeccionar un aparato para trazar con precisión las curvas de caída del sonido, emprendió el estudio del comportamiento del campo sonoro en recintos cerrados. En 1936 Philip M. Morse del Instituto de Tecnología de Massachusetts, publicó "Vibration and Sound", en el que explicaba su teoría de los *modos normales de vibración* en recintos rectangulares.

Como se ha indicado a partir del segundo cuarto del siglo XX, debido al desarrollo del

amplificador, tubo de vacío, altavoces, y micrófonos, es cuando los especialistas empezaron a acumular los datos exactos que harían de la acústica una ciencia efectiva de la ingeniería, ya que antes de que se inventaran los aparatos electrónicos, al especialista en acústica le faltaban los medios necesarios, para producir sonidos que correspondiesen a sus especificaciones, así como para medir la fuerza de los sonidos producidos. Antes de disponer de estos instrumentos, el que realizaba el diseño acústico de una sala, sólo podía hacerlo basándose en el estudio de otras salas, considerando qué características eran las responsables de la buena sonoridad en algunos puntos de la misma, así como las sonoridades confusas en otras posiciones.

Todas estas novedades facilitaban el estudio y medida del campo sonoro en recintos cerrados, y supusieron un nuevo empuje en su desarrollo. Gracias a ellas, se efectuaron estudios sobre el significado en los auditorios de la *difusión del sonido, relación de energías sonoras directa/reverberante, camino libre medio de propagación de las ondas, tiempo óptimo de reverberación para diferentes dimensiones y usos del auditorio, relaciones óptimas entre los tiempos de reverberación a frecuencias medias y bajas, etc.* Todos estos experimentos se detuvieron bruscamente a consecuencia del inicio de la Segunda Guerra Mundial.

Al finalizar la guerra se produjo un gran *boom* cultural en Estados Unidos de Norteamérica, zona menos afectada por el conflicto. Este *boom* trajo consigo la construcción de grandes salas de concierto, teatros de ópera, auditorios de usos múltiples, estudios de radio y después de televisión, escuelas de música, etc., para lo cual, era necesario un mejor conocimiento de los requisitos del campo sonoro en las grandes salas. Se realizaron profundos estudios y medidas precisas en salas reconocidas por sus buenas cualidades acústicas, y los resultados se compararon con los puntos de vista de directores, músicos y críticos musicales, observándose que por regla general:

- *Las salas pequeñas "suenan" mejor que las grandes.*
- *Las construidas para utilizarse con varios fines son inferiores a las construidas con un fin específico.*
- *Las salas viejas son mejores que las nuevas.*

Estas recomendaciones iban en contra de las necesidades del momento, principalmente las económicas claro. Se deseaban grandes auditorios con gran capacidad, lo que estaba en contra de la primera observación de que las salas pequeñas favorecen la escucha. Por otro lado, estas salas debían albergar tanto a una gran orquesta sinfónica o una compañía de ópera, como a representaciones teatrales o conferencias. Además, como es lógico, los arquitectos se negaban categóricamente a *copiar* las salas antiguas de reconocida fama y buena acústica, ya que, los gustos arquitectónicos cambian con los años y se iban dejando a un lado las grandes decoraciones recargadas y con muchos relieves, siendo reemplazadas por un estilo sobrio y funcional, con paredes prácticamente lisas.

Todo esto, como veremos más adelante, puede producir grandes problemas de ecos y una mala distribución del sonido a lo largo de la sala. Con el fin de obviar estos posibles defectos, se utilizaron profusamente los materiales absorbentes sonoros para controlar la reverberación y evitar los ecos, y los difusores y paneles suspendidos para lograr reflexiones tempranas y conducir el sonido por donde deseamos.

Los arquitectos se enfrentaban también con un problema que por entonces ya empezaba a ser importante, se trataba del ruido. En el siglo pasado este problema no era tal, pero en este siglo, llamado el de la revolución industrial, los grandes avances de la ciencia y los progresos técnicos han traído consigo graves problemas de ruido. Las salas antiguas

estaban, por lo general, alejadas de las por otra parte poco ruidosas ciudades, con lo que el problema era prácticamente inexistente. Hoy en día suelen situarse en sitios céntricos para facilitar el acceso del público, con lo que el ruido, producido principalmente por el tráfico rodado, puede alcanzar grandes niveles y es necesario aislar el recinto de los ruidos externos.

Hasta este momento, la acústica arquitectónica se había desarrollado por principios y fórmulas generales determinadas sobre bases puramente experimentales, y la consiguiente formación de las teorías apropiadas. Éste es el proceso normal de desarrollo dentro también de otras ramas de la ciencia, pero por entonces, se inició la tendencia a estudiar primero teorías y buscar luego su confirmación experimental. Esto sucedió también en la acústica arquitectónica. A partir de bases puramente teóricas, se han desarrollado una completa serie de reglas y fórmulas para explicar la gran variedad de fenómenos de gran importancia que ocurren en un recinto cerrado. Existen, sin embargo, muchos fenómenos que debido a su naturaleza compleja hay que recurrir, para su estudio, a los métodos experimentales. Por ejemplo, para el tiempo óptimo de reverberación hasta hoy no ha sido posible desarrollar una teoría o sugerir unas reglas fijas y hay que recurrir a experimentos y estadísticas.

De acuerdo con lo expuesto, no debe sorprendernos el que durante mil años se creasen para explicar estos misterios, una serie de mitos que se transmitían de ciudad en ciudad y de época en época modificándose y aumentándose, llegando hasta nuestros días adornados mediante una serie de tópicos; por ejemplo en el diseño de una importante sala de conciertos, se puede creer que la pintura dorada de las paredes y estatuas, es la responsable de la excelente acústica de la sala. En una conversación mantenida entre el famoso director de orquesta Herbert Von Karajan y el también famoso especialista en acústica de salas Leo. L. Beranek, el primero le dijo al segundo "*Supongo que Vd. no estará de acuerdo con la teoría de que las botellas de vino rotas, benefician la acústica de una sala*". Contestando el segundo que no estaba de acuerdo, ya que las botellas rotas de bebidas se encuentran con frecuencia dentro de salas europeas, en desvanes y rincones de las mismas, por la única razón de que los obreros durante el período de construcción de la sala, tiraron los restos de innumerables comidas en los lugares más escondidos, no teniendo esto nada que ver con la acústica de la sala.

Muchas personas se han asombrado por la descripción de una sala, en la que el sonido viaja perfectamente desde un punto especial hasta otro, considerando que esto es la prueba de que toda la sala tiene una acústica extraordinaria, todo esto carece de fundamento ya que puede llevarnos a decisiones equivocadas, puesto que una buena audición en un punto no tiene porqué suponer que en otro punto la audición sea igualmente buena, y debemos considerar que en una sala en la que el sonido viaja inicialmente bien desde un punto determinado a otro, se ha identificado desde los primeros estudios como una equivocación acústica. El problema radica en que donde existe una transmisión tan buena del sonido, en una dirección particular, gran parte de la energía se propaga en esta dirección, quedando una pequeña proporción de energía para transmitirse a otros puntos de la sala, por lo que no puede propagarse a todos los asientos la misma calidad y cantidad del sonido.

Veamos otro caso curioso de los mitos en la acústica de salas, en el sótano de la academia de música de Filadelfia, existe un pozo seco debajo del centro del teatro, y con grandes dimensiones. Este pozo está hecho de ladrillo y hormigón, y mucha gente que conoce su existencia cree que fue instalado con propósitos acústicos, cuando la verdad es que este pozo se construyó como depósito de agua, para prevención contra incendios. Se ve con claridad que no es posible que un pozo de este tipo situado debajo de un pesado suelo de madera, pueda afectar a la acústica de la sala, además una onda que pasa por una pared pierde gran parte de su energía, y si tiene que pasar dos veces prácticamente no queda señal. Se sabe que las áreas situadas fuera del recinto principal producen un efecto pequeñísimo sobre la acústica del mismo.

Podríamos preguntarnos si un interior de madera en una sala nos proporciona una buena acústica, algunos músicos para contestar a esta pregunta, se basan en que un violín está hecho de madera, que resuena y aumenta el sonido, por lo que los interiores de la sala se deben hacer de madera. Posiblemente estos músicos se llevarían una gran sorpresa si se pudiesen introducir dentro de la caja del violín y escuchasen allí el sonido. La onda sonora producida por un violín, está producida por la vibración de las cuerdas, que transmiten la energía a la caja acústica del mismo, ésta radia el sonido, como un cono de papel de bajo peso de un altavoz, por lo que la caja es delgada y de poco peso, ya que las superficies pesadas no pueden ponerse en movimiento por las cuerdas vibrantes. Debemos tener en cuenta, que en una sala no queremos radiar el sonido más allá de las superficies límites de la misma, sino que deseamos conservar la energía dentro, por lo que las paredes deben ser duras y pesadas. Puesto que al contrario de las impresiones populares, las grandes salas de conciertos y ópera del mundo, contienen muy poca madera en las paredes, estando los techos casi en su totalidad forrados de yeso.

Como ya se ha mencionado no se puede conseguir una buena acústica en una sala grande. Una de las mayores salas del mundo es el "Royal Albert Hall" de Londres cuyo volumen es de 84.950 m^3 . Si se compara una sinfonía escuchada en esta sala y en otra sala más pequeña, como por ejemplo el Conservatorio de Amsterdam cuyo volumen es de 18.774 m^3 , observamos que los grandes volúmenes producen un efecto perjudicial sobre muchas clases de música. En un recinto de grandes dimensiones el tiempo necesario para que un sonido lo recorra, así como la reverberación del mismo producen un efecto perjudicial.

Una de las principales funciones de esta parte de la ciencia es poder predecir las proporciones perfectas de una sala. Si una gran orquesta se sitúa a un lado de una sala larga y rectangular y el público se sitúa enfrente, al quitar el techo de la sala se producirían grandes cambios en la acústica de la misma. La longitud de una sala, está limitada por la máxima distancia desde la cual los espectadores pueden ver el escenario; su anchura debe determinarse mediante consideraciones acústicas, aunque en muchos casos influyan las económicas. Tampoco es necesario que tengan unas dimensiones precisas, ya que mediante unos reflectores estratégicamente situados se puede hacer viajar el sonido por determinados sitios.

Durante mucho tiempo se ha creído que el acero, el vidrio y el hormigón, no podían usarse en la construcción de las salas, comprobándose que esto no es cierto, ya que el hormigón tiene unas propiedades acústicas parecidas a las del yeso.

Muchas de las salas más consideradas acústicamente, se construyeron durante el último siglo, y este hecho ha creado la idea de que no es la construcción original, sino el proceso de envejecimiento el que de alguna forma ha generado la excelencia de estas salas. Desde luego es seguro, que a menos de que la estructura de los asientos, cortinas, alfombras y otros materiales se cambiasen, la acústica de la sala no cambia en toda su vida.

La realidad es que las salas que no son buenas terminan por desaparecer, ya que no realizan la función para la que fueron construidas, en cambio las buenas perduran con el tiempo.

1.3. EL CAMPO SONORO EN RECINTOS

Todos nosotros alguna vez hemos estado en un campo abierto y hemos escuchado sonidos que procedían de una fuente distante. Las vibraciones de esta fuente situada en un espacio ilimitado causan perturbaciones en la atmósfera que la rodea, estas perturbaciones, en forma de variaciones de presión se propagan en todas las direcciones desde la fuente creándose un campo sonoro alrededor de la misma; pudiéndose estudiar este campo por

medio de leyes que rigen la presión sonora con el tiempo y la distancia. Si la fuente produce el sonido permanentemente, éste se hace más intenso según nos acercamos a la fuente, y si nos alejamos de ella el sonido se debilita. Como no existen ondas reflejadas, las vibraciones de las partículas de aire de la onda sonora, disminuyen en amplitud según la onda se aleja de la fuente, de hecho la amplitud de la onda sonora que nos llega, disminuye hasta la mitad al duplicar la distancia que hay entre nuestra posición y la fuente. Debemos tener en cuenta que si existe viento, el sonido será más intenso en la dirección a favor del viento y más débil en la dirección contraria al viento.

Una de las principales dificultades que encontramos cuando intentamos escuchar un sonido en el exterior, es nuestra falta de habilidad para escuchar ese sonido solamente, ya que además escuchamos los sonidos de los vehículos que pasan, de niños al jugar, aviones, etc., además de todo esto en el exterior estamos sujetos a las variaciones climatológicas (figura 1.1).

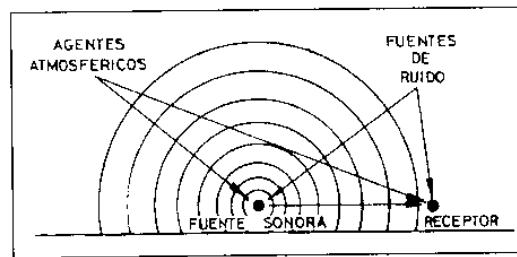


Figura 1.1. Ondas sonoras en un campo abierto sin viento, con ruido de automóviles y aviones junto con agentes atmosféricos.

Veamos cómo se pueden mejorar las condiciones de audición en el exterior, si se pone una cubierta acústica a los lados y por encima de la fuente (figura 1.2).

Observamos que aparecen dos mejoras con esto, en primer lugar se crea una barrera que protege a la fuente de sonidos extraños que llegan del exterior, y en segundo lugar esta cubierta recoge el sonido que normalmente hubiera sido radiado hacia arriba y hacia la parte trasera de la fuente y la dirige hacia el auditorio. Por supuesto, el oyente escucha los sonidos producidos por el tráfico y aviones, estando también a merced del clima.

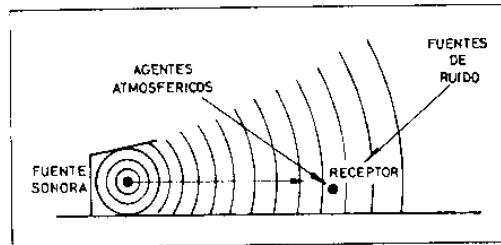


Figura 1.2. Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta y sin viento.

La protección acústica también proporciona dos mejoras para la fuente que se encuentra en su interior, ya que se puede escuchar a sí misma mejor, puesto que los sonidos se amplifican y se reflejan volviendo a la fuente. También contribuye a mezclar el sonido de forma que cuando sale de la protección acústica es más coherente. Todo esto se dice cuando no existe público, ya que cuando hay público espectador (figura 1.3), este estado de cosas se altera, ya que el público absorbe el sonido cuando una onda se radia hacia el exterior por la fuente o fuentes sonoras, a través de las cabezas de un público sentado en un suelo horizontal, la intensidad sonora disminuye más rápidamente al aumentar la distancia que como

disminuiría en caso de no existir público.

Para una demostración de este tipo se compara la intensidad que percibe un oyente al levantarse y al sentarse en la parte final de un auditorio al aire libre con público sentado en un suelo horizontal.

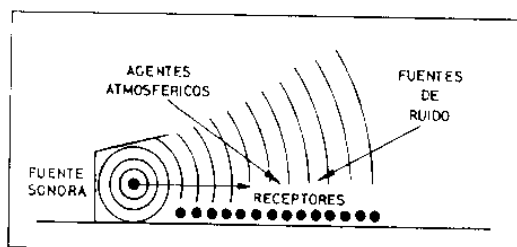


Figura 1.3. Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados horizontalmente al aire libre.

Sorprende el observar cuanto más intenso llega el sonido cuando se pone de pie, lo que demuestra lo absurdo que es sentar al público en un suelo horizontal. Los antiguos griegos, egipcios y romanos, ya conocieron este principio elemental al construir sus estadios al aire libre, lo hicieron con asientos situados a diferentes niveles hacia arriba (figura 1.4). Esta forma ofrece muchas ventajas, en primer lugar los sonidos de fuentes que están por detrás del auditorio se eliminan, los sonidos de detrás de las fuentes se pueden eliminar también levantando una pared detrás de las mismas.

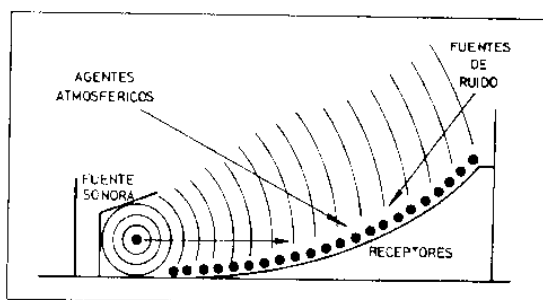


Figura 1.4. Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados a diferentes niveles del suelo.

También existe una ganancia en intensidad ya que los oídos de cada persona no están apantallados por la cabeza de las personas que se encuentran delante de ella. La intensidad en el fondo del auditorio es aproximadamente la misma que si no hubiera nadie entre la fuente y la última fila. No hemos eliminado el ruido de los aviones, ni estamos protegidos contra los agentes atmosféricos.

Para luchar contra estos inconvenientes, solamente se necesita levantar unas paredes laterales y un techo por encima de la superficie que ocupan los espectadores, a la vez, estas superficies se deben cubrir con materiales que absorban y sean muy eficaces para las ondas sonoras (figura 1.5).

Las condiciones acústicas no habrán cambiado, ya que el sonido se radia en todas direcciones, y es absorbido completamente como sucedía en espacios abiertos, pero se ha eliminado el ruido de los aviones y el efecto de los agentes atmosféricos. De esta forma se mejora la audición del sonido producido por la fuente que se escucha tal y como lo produce, sin ninguna clase de embellecimiento sonoro originado por el recinto cerrado. Un recinto de este tipo, que se encuentra recubierto con materiales absorbentes, se denomina *recinto*

anecoico, o acústicamente muerto, ya que no altera la onda producida por la fuente.

Ahora trataremos de estudiar lo que sucede cuando situamos la fuente sonora en un recinto cuyas superficies no están cubiertas con materiales absorbentes, bien sea un *recinto reverberante*, o acústicamente vivo. La presencia de superficies límites que rodean parcial o totalmente a la fuente, cambian el carácter del campo sonoro. El volumen de aire encerrado entre esas superficies, no sólo está excitado mientras la fuente está emitiendo, sino que puede continuar en este estado de vibración después de que la misma ha dejado de emitir.

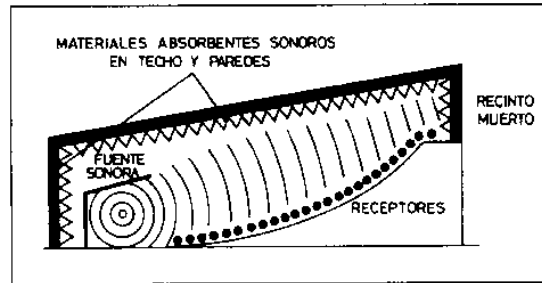


Figura 1.5. Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados a diferentes niveles en zona cubierta.

Un recinto reverberante se puede asemejar a un tubo de un órgano de gran tamaño, las ondas sonoras se reflejan de atrás hacia delante entre cada par de superficies paralelas, también viajan oblicuamente de forma que pueden chocar con 4 ó 6 superficies. Si el recinto tiene forma irregular, las ondas viajan de cualquier forma, cruzándose las unas con las otras, volviendo sobre sí mismas, y aumentando el número de modos normales de vibración que son realmente complejos, pudiendo llegar a producirse miles de estos modos.

La respuesta en frecuencia de un recinto, como la de cualquier otro sistema vibratorio, depende de las dimensiones del sistema, o en este caso del recinto. La característica de frecuencia de respuesta del recinto, puede ser muy diferente de la del espectro de frecuencia de la señal básica de la fuente sonora. En este caso, las frecuencias componentes de la señal que coinciden con las frecuencias características del recinto, como consecuencia de la resonancia, resaltan de aquellas otras que no tienen equivalente en el espectro normal de frecuencia del recinto. También puede existir un mayor o menor énfasis en las frecuencias componentes de la señal básica, como consecuencia de las diferentes velocidades de amortiguamiento de los modos normales de vibración. Todo esto produce un cambio en la estructura de la señal básica, es decir nos conduce a una alteración de su color de tono.

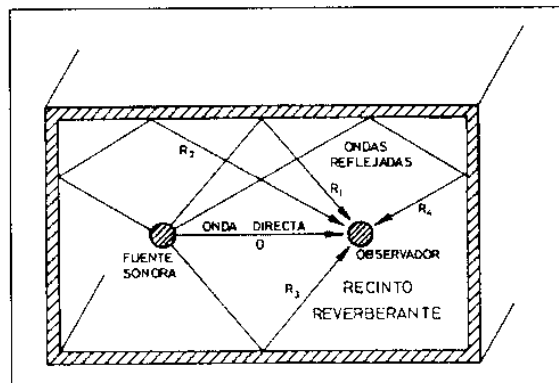


Figura 1.6. Gráfico de la onda directa, así como de varias reflexiones en las paredes y techo de un recinto.

Para juzgar las características acústicas de los recintos, no sólo se puede realizar mediante consideraciones sobre el aspecto físico del proceso sonoro, sino que debe efectuarse una evaluación subjetiva de dichos procesos, con la ayuda de aparatos especiales, que permitan efectuar un juicio más real. El sonido en *un recinto reverberante se compone de dos partes, en primer lugar del sonido directo y en segundo del sonido reverberante*. El verdadero sonido de una fuente sonora, es el que viaja directamente a los oídos de un espectador (figura 1.6), el sonido directo. Una fracción de segundo más tarde escucha la primera reflexión procedente de las paredes y del techo, al viajar estas ondas de atrás hacia adelante por todo el recinto, producen modos normales de vibración, que como ya hemos indicado, cada uno disminuye a su propia velocidad, creando la parte del sonido reverberante.

Desde el punto de vista de percepción auditiva, lo más interesante son las características particulares de la audición, como por ejemplo la capacidad del oído de recibir secuencias de impulsos sonoros (figura 1.7), y sumar su energía evitando que el intervalo entre los impulsos no exceda de un tiempo específico. En la figura 1.7, se ve como llega al receptor primero el sonido directo (D) en el gráfico de tiempos, seguido por el sonido reflejado en la pared lateral (R_1), posteriormente se ven las reflexiones R_2 , R_3 , R_4 que llegan al receptor en un tiempo posterior. *La diferencia entre el tiempo de llegada al receptor entre el sonido directo y el primer sonido reflejado se denomina tiempo mínimo de retardo (gap)*. Desde el punto de vista de la percepción auditiva, una de las características más interesantes de la audición, es la de la posibilidad que tiene el oído para recibir secuencias de impulsos sonoros y sumar su energía.

Como vemos en este diagrama el sonido directo llega antes de todas las reflexiones, ya que viaja por el camino más corto, después de un tiempo mínimo de retardo, llega la primera reflexión, inmediatamente después la segunda, tercera y cuarta.

Los experimentos de Haas han mostrado que el *tiempo mínimo de retardo* para la palabra depende de:

- *Ritmo de la palabra.*
- *Intensidad de la palabra.*
- *Color de tono.*
- *Tiempo de reverberación característico del recinto.*

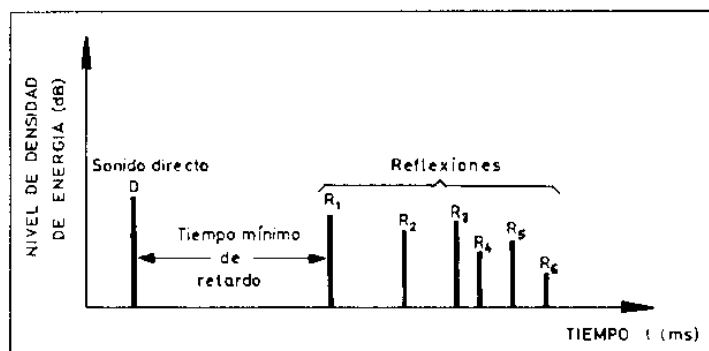


Figura 1.7. Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejada al receptor.

El tiempo mínimo de retardo para la palabra varía entre 40 y 170 ms; para la música es mayor llegando a ser de 150 a 250 ms.

De esta forma, si la estructura de tiempo de la señal básica y los modos normales de vibración del espacio vacío del recinto, que acompañan a la señal básica, son tales que el intervalo de tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión no excede del tiempo

mínimo de retardo, en el oído se combinan los dos sonidos como reverberación. Pero si los intervalos son mayores que el tiempo mínimo de retardo, el oído identifica la reflexión como un eco distinto, que se detecta especialmente cuando el nivel de presión sonora de la reflexión es comparable con el nivel de la señal directa.

Los modos normales de vibración excitados por la señal básica, se combinan con ésta y la intensifican, por lo que dan a las señales sonoras una cierta amplificación, cuyo grado depende de la absorción de energía en los límites del recinto. Esto se demuestra en la práctica, por el hecho de que un cambio en la distancia entre la fuente y el receptor, tiene como resultado una variación mucho más pequeña en el nivel de la señal, en un recinto que en un espacio abierto.

Los cambios en las condiciones en los límites del recinto, producen una alteración en las reflexiones, así como en el incremento del nivel de presión sonora, producido por los modos normales de vibración del mismo, que hacen el campo sonoro desigual.

Por tanto, el espacio vacío de un recinto, tiene una influencia sobre la señal que se propaga en él:

- 1º) *Acompañando a la señal básica con unas reflexiones, que pueden tomar la forma de un eco, alterando su estructura en el tiempo.*
- 2º) *Alterando su color de tono, al introducir cambios en su espectro de frecuencia.*
- 3º) *Incrementando su nivel, mediante la energía de los modos normales de vibración del recinto.*
- 4º) *Creando diferentes condiciones de recepción en los distintos puntos del recinto.*

Por todo esto vemos que el recinto es un elemento que juega un papel importante en el proceso de radiación y recepción del sonido, teniendo además una influencia significativa sobre la calidad del mismo. En el caso de la transmisión de sonido por medio de una cadena de radiodifusión, el recinto puede considerarse como uno de los eslabones de la cadena, junto con micrófonos, amplificadores, altavoces, etc., esto se puede ver en la figura 1.8. Los recintos primarios y secundarios son respectivamente los de registro y reproducción del sonido.

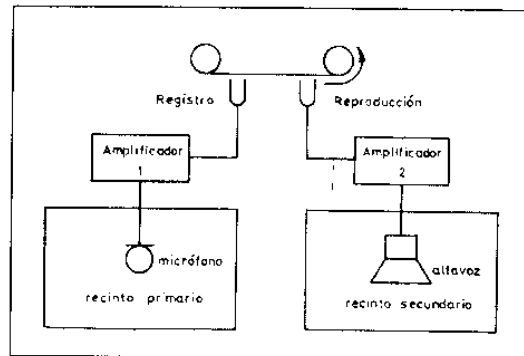


Figura 1.8. Diagrama de bloques de un proceso de transmisión sonora.

Los cambios que un campo sonoro experimenta, si la fuente está situada en un espa

ilimitado o si se encuentra en el interior de un recinto, pueden ser útiles y perjudiciales a la vez, desde el punto de vista de la percepción auditiva. La prolongación que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música), puede ser útil siempre que la duración sea la debida. escuchándose la palabra más *animada* y la música más *clara*, debido al encadenamiento entre los sucesivos tonos musicales. Si la prolongación es muy grande, la palabra es menos inteligible, y en la música se produce solapamiento entre las notas musicales, por lo que la audición se empeora, al tener menos calidad.

El énfasis de algunos modos propios (frecuencias características) frente a otros del recinto, producen un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente sonora, originando un efecto adverso sobre la recepción de la palabra y la música.

En ciertas condiciones el nivel de presión sonora de la señal básica, se incrementa, como consecuencia de la excitación de los modos propios de vibración del aire del recinto, lo que es útil ya que este incremento en el nivel, es sensible especialmente para los oyentes que se encuentran más alejados de la fuente; pero la posible desigualdad en el incremento del nivel, en los diferentes puntos del recinto, como consecuencia de las variaciones en la absorción de energía en los límites del mismo, resulta indeseable puesto que perturba la uniformidad en las condiciones de audición de los oyentes situados en los distintos puntos del recinto.

4. TEORÍAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO SONORO EN RECINTOS

La característica de un campo sonoro que está encerrado total o parcialmente, está íntimamente relacionada con las dimensiones lineales del recinto. Cuando las dimensiones lineales son pequeñas frente a la longitud de onda, como por ejemplo en un tubo o en un resonador de Hemholtz los modos normales de vibración en el espacio son sólo de unas pocas frecuencias. luego el número de modos es pequeño. Los que tienen unas dimensiones lineales que son grandes frente a la longitud de onda; incluso para las frecuencias bajas, el volumen de aire que encierran estos recintos son sistemas vibratorios con un gran número de modos normales de vibración. En recintos de este tipo, si un instrumento produce un tono, por ejemplo con cinco armónicos, todos los posibles modos de vibración que existen en el recinto y que tienen frecuencias próximas a las de alguno de estos cinco armónicos, se ponen en vibración. por lo que excitan cinco grupos de modos de vibración. Cada grupo contiene aproximadamente unos cinco o posiblemente más modos de vibración individuales, cada grupo de modos va desapareciendo gradualmente a su propia velocidad.

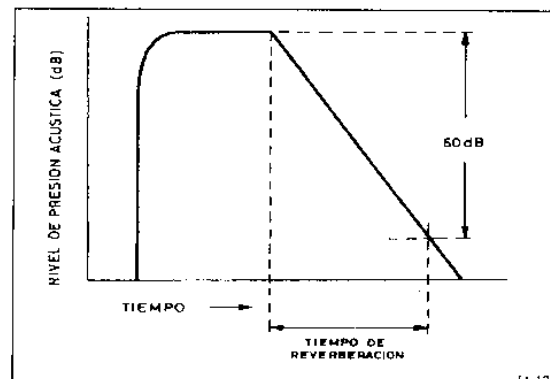


Figura 1.9. Proceso de crecimiento y disminución de la energía sonora en un recinto.

Cuando se conecta una fuente sonora en un recinto, como consecuencia de las reflexiones, existe un crecimiento gradual de la energía, cesando posteriormente el aumento después de cierto tiempo, alcanzando la energía en el recinto un valor constante.

Si una vez alcanzado este valor, la fuente deja de emitir, el sonido que recibe el observador no desaparece inmediatamente. Un corto tiempo después de que la fuente ha dejado de emitir, desaparece la onda directa y el observador recibe la energía de la primera onda reflejada, después la segunda, tercera, etc., ondas reflejadas y así sucesivamente, siendo la energía de estas ondas cada vez más pequeña. Después de un cierto intervalo de tiempo, la energía de las ondas que llegan al observador, ha disminuido tanto, que el oído no puede percibir las y el sonido desaparece.

Si se elige para representar gráficamente esta variación una escala logarítmica, se observa que el proceso de crecimiento es relativamente rápido, mientras que el de descenso es más lento, representando además este gráfico la forma real de escucha del sonido, puesto que el oído no reacciona a la intensidad de la perturbación, sino a un valor próximo al logaritmo de esta intensidad (figura 1.9). *El proceso de persistencia y disminución de la energía en un recinto, una vez desconectada la fuente sonora, recibe el nombre de **reverberación**, y el tiempo que la señal sonora necesita para reducirse hasta el umbral de audición, se conoce como **tiempo de reverberación**.*

El recinto es un elemento que juega un papel importante en el proceso de radiación y recepción del sonido, teniendo además una influencia significativa sobre la calidad del mismo. Los cambios que un campo sonoro experimenta, si la fuente está situada en un espacio ilimitado o si se encuentra en el interior de un recinto, pueden ser útiles y perjudiciales a la vez, desde el punto de vista de percepción auditiva. La reverberación que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música), puede ser útil siempre que la duración sea la debida, escuchándose la palabra más clara y la música más animada, debido al encadenamiento entre los sucesivos tonos musicales. Si la reverberación es muy grande, la palabra es menos inteligible, y en la música se produce un solapamiento entre las notas musicales, por lo que la audición se empeora al tener menos calidad. El énfasis de algunos modos propios frente a otros del recinto, produce un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente, originando un efecto adverso sobre la recepción de la palabra y la música.

En ciertas condiciones, el nivel de presión sonora de la señal básica se incrementa, como consecuencia de la excitación de los modos propios de vibración del recinto, lo que es útil ya que este incremento en el nivel de presión sonora, es sensible especialmente para los oyentes que se encuentran más alejados de la fuente; pero es indeseable la posible desigualdad en el incremento del nivel de presión sonora en los diferentes puntos del recinto, debido a las variaciones en la absorción de energía en los límites del mismo, puesto que perturba la uniformidad en las condiciones de audición de los oyentes situados en las distintas posiciones del recinto. Por todo lo expuesto anteriormente, se observa que es necesario un cuidadoso estudio del campo sonoro creado en un recinto por las fuentes, con el fin de determinar en qué condiciones ciertos cambios producidos por un recinto en la señal básica, son útiles o perjudiciales, así como determinar qué factores tienen influencia sobre la calidad de la palabra y de la música. Este análisis puede realizarse a partir de las teorías que permiten estudiar la acústica de un recinto, y que son :

- *teoría estadística,*
- *teoría geométrica,*
- *teoría ondulatoria,*
- *teoría psicoacústica.*

Veamos seguidamente unas ideas generales sobre cada una de estas teorías.

TEORÍA ESTADÍSTICA

De la misma forma que la energía de una fuente sonora se radia en todas direcciones, las ondas reflejadas en cualquier punto dentro del recinto, también viajan en todas las posibles direcciones. Las fases de las ondas que transfieren cada uno de estos puntos, puede considerarse que están distribuidas de una forma aleatoria, debemos recordar que los sonidos naturales (palabra y música) producidos en el interior del recinto son señales aleatorias e irregulares. Esto nos permite determinar la energía en cualquier punto del recinto, sin tener en cuenta los retrasos de fase entre las ondas, así como la suma de los valores medios de la energía de las reflexiones que alcanzan el punto del recinto en estudio.

Las combinaciones de fenómenos aleatorios que tienen propiedades comunes, tales como son las combinaciones de las reflexiones que alcanzan cada punto dentro del recinto se estudian mediante la matemática estadística basada en la teoría de la probabilidad. El método estadístico no descubre los detalles físicos intrínsecos del fenómeno, sin embargo su ventaja consiste en el hecho de que mediante unas matemáticas simples, basadas en datos de los resultados del proceso, nos permite obtener unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso, así como de sus posibles defectos.

Al aplicar matemáticas estadísticas a sucesos aleatorios, si por cualquier causa el fenómeno deja de ser aleatorio, nos da una baja descripción del proceso, por ejemplo si algunas de las superficies interiores del recinto tienen propiedades de enfoque, la naturaleza aleatoria de la dirección de llegada de las ondas reflejadas es menor, por lo que en este caso el análisis estadístico no se puede aplicar.

Se define como tiempo de reverberación normalizado T en segundos, para una determinada frecuencia o banda de frecuencia al intervalo de tiempo empleado por la presión sonora en un recinto para que se origine una disminución de 60 dB en el nivel de presión una vez desconectada la fuente sonora.

1.4.2. TEORÍA GEOMÉTRICA

Cuando no se puede aplicar la teoría estadística, debe utilizarse otra en la que el campo sonoro se considera como una combinación de rayos, contruidos a partir de las leyes de la óptica geométrica; de esa forma la onda sonora se ha sustituido por un rayo, a lo largo del cual se propaga la energía sonora. Mediante esta teoría se pueden determinar los puntos de incidencia de las ondas sobre las superficies límites del recinto, así como las pérdidas de energía debidas a la absorción sonora de los materiales que cubren las superficies límites del recinto. Esto tiene gran importancia cuando las superficies interiores están recubiertas con materiales de diferentes características absorbentes. En este caso el campo sonoro en un recinto se estudia mediante la energía sonora, determinada en cualquier punto, calculando las pérdidas de todos los rayos que después de reflejarse pasan por un punto.

1.4.3. TEORÍA ONDULATORIA

Esta teoría se basa en el hecho de que el espacio vacío dentro de un recinto, se comporta como un sistema vibratorio, que se excita por la señal de la fuente sonora. De forma análoga los modos normales de vibración de una cuerda (unidimensional), una membrana