

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Acondicionamiento acústico del local de la asociación, Casa Andalucía de Benicarló”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

Isaac Soler Forés

Director/es:

Fco. Javier Redondo Pastor

GANDIA, 2011

En primer lugar quisiera agradecer a Javier Redondo Pastor la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto y aprender de él, y al Departamento de Física aplicada el permitirme realizarlo.

A mis padres, porque sin ellos nada de esto habría sido posible, sus consejos siempre me han ayudado. Y por supuesto al resto de mi familia, mi hermano, mis abuelos, mis tías, primas, ... por vuestra confianza en mí.

A todos mis profesores, desde el colegio hasta la universidad, por todo lo que he aprendido gracias a vosotros.

A todos mis compañeros y amigos de la universidad, porque sin todos vosotros, vuestros resúmenes, vuestros consejos, y vuestra ayuda seguro que no estaba escribiendo estas líneas.

A todos mis amigos de siempre, Marcos, Xavi, Carlos, Eugenio, Mix... y a todos los demás que siempre estáis ahí.

Y por último y no por eso menos importante a Ainhoa, porque tu apoyo durante toda la carrera ha sido muy importante para mí.

Gracias.

INDICE

| | |
|---|----|
| ANALIZANDO LA HISTÓRIA DE LA ACÚSTICA DE SALAS | 7 |
| INFORMACIÓN NECESARIA PARA PODER REALIZAR EL TFC | 12 |
| CAMPO SONORO EN RECINTOS | 12 |
| TEORIAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO SONORO EN RECINTOS | 18 |
| TEORÍA ESTADÍSTICA | 20 |
| TEORÍA GEOMÉTRICA | 23 |
| TEORÍA ONDULATORIA | 28 |
| MATERIALES PARA ACONDICIONAMIENTO Y AISLAMIENTO ACÚSTICO. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS | 29 |
| CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS RECINTOS | 36 |
| DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SALA | 38 |
| NORMATIVA | 42 |
| MEDICIONES DEL RECINTO | 44 |
| MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN | 44 |
| MEDICIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE LA SALA Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE ESTA | 45 |
| SIMULACIÓN | 49 |
| DISEÑO | 49 |
| TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA VACÍA | 51 |
| TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA LLENA | 51 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS | 52 |
| MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN | 52 |
| LANA DE ROCA | 54 |
| MEDICIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE LA SALA Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE ESTA | 58 |
| CONCLUSIONES | 60 |
| ANEXO I | 61 |
| BIBLIOGRAFÍA | 63 |

ANALIZANDO LA HISTÓRIA DE LA ACÚSTICA DE SALAS

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 Massachussets, 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 deseemos.

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 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 esta 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 m³. 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 m³, 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, esta 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 es 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.

INFORMACIÓN NECESARIA PARA PODER REALIZAR EL TFC

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).

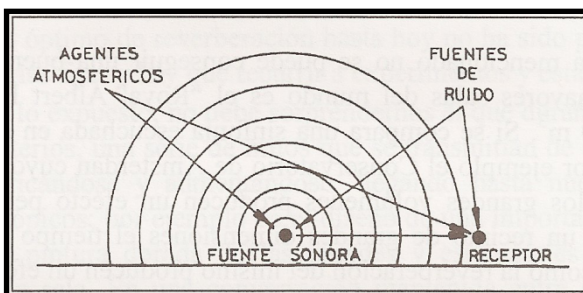


Figura1: Ondas sonoras en un campo abierto sin viento, con ruido de automóviles y aviones junto con agentes atmosféricos.

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 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.

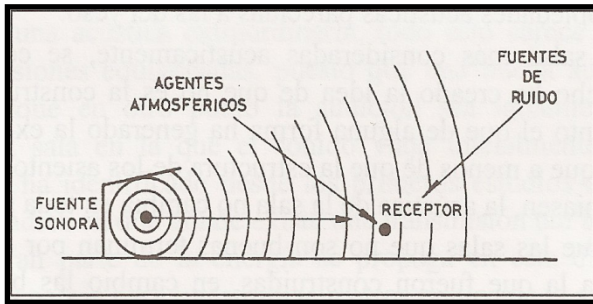


Figura2: Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta y sin viento.

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 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.

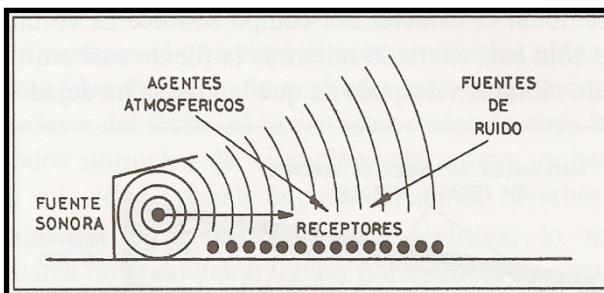


Figura3: Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados horizontalmente al aire libre.

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 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.

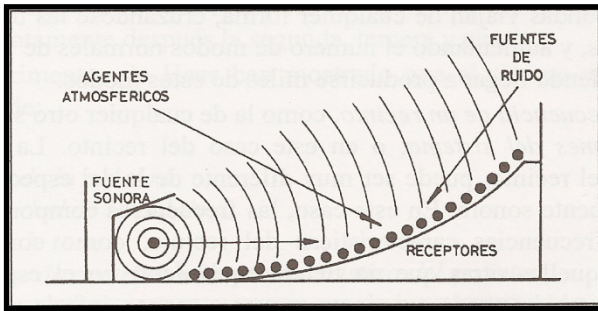


Figura4: Ondas producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados a diferentes niveles del suelo.

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 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.

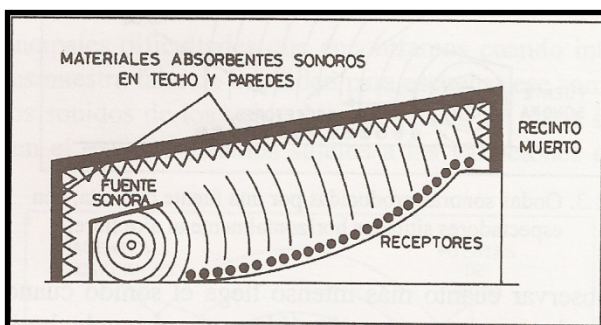


Figura5: Ondas sonoras producidas por una fuente cubierta, con espectadores situados a diferentes niveles en zona cubierta.

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.

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 que 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 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.

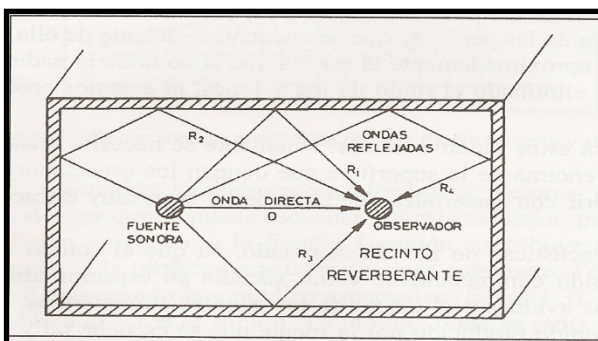


Figura6: Gráfico de la onda directa, así como de varias reflexiones en las paredes y techo de un recinto.

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 7), y sumar su energía evitando que el intervalo entre los impulsos no exceda de un tiempo específico. En la figura 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 (R1), posteriormente se ven las reflexiones R2, R3, R4 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.

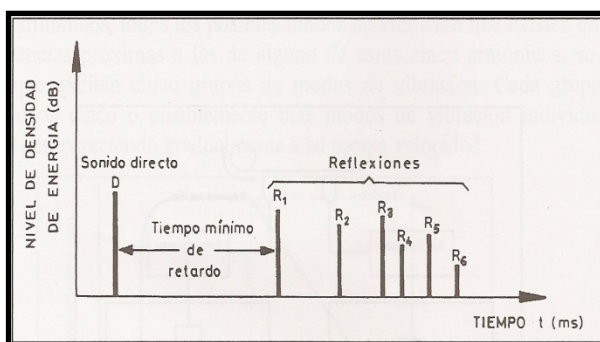


Figura7: Diagrama de llegada de las ondas sonoras directa y reflejada al receptor.

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:

1. Acompañando a la señal básica con unas reflexiones, que pueden tomar la forma de un eco, alterando su estructura en el tiempo.
2. Alterando su color de tono, al introducir cambios en su espectro de frecuencia.
3. Incrementando su nivel, mediante la energía de los modos normales de vibración del recinto.
4. 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 8. Los recintos primarios y secundarios son respectivamente los de registro y reproducción del sonido.

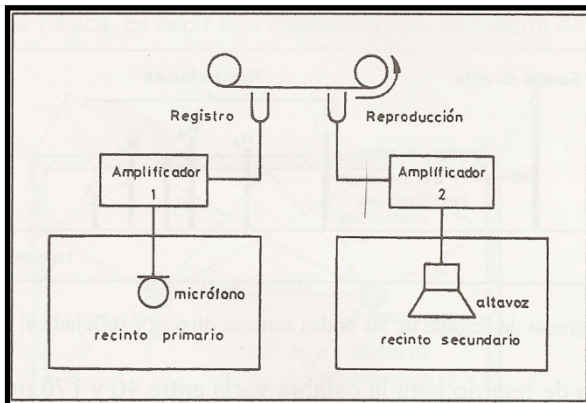


Figura8: Diagrama de bloques de un proceso de transmisión sonora.

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 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.

TEORIAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO SONORO EN RECINTOS

La característica de un campo sonoro que está encerrado total o parcialmente, esta 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 Helmholtz 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.

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 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.

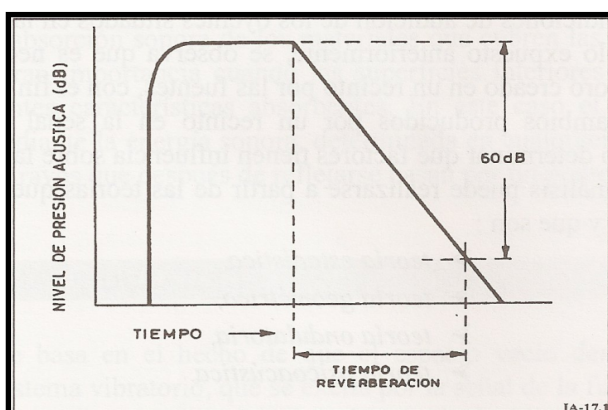


Figura 9: Proceso de crecimiento y disminución de la energía sonora en un recinto.

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 las tres primeras teorías:

TEORIA 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.

Tiempo de reverberación:

Si el gráfico de la figura 10, se dibujase de tal forma que la densidad de energía fuera expresada en una escala logarítmica sobre el eje vertical, el nuevo gráfico tendría la forma expresada en la figura 11. Esta elección de escala muestra que el inicio de sonido en un recinto es un proceso relativamente rápido, mientras que el proceso de descenso es más lento.

El gráfico de la relación entre el logaritmo de la densidad de energía y el tiempo, tiene interés práctico ya que expresa aproximadamente cómo se escucha realmente el sonido. Esto se debe al hecho de que el oído no reacciona a la intensidad de la perturbación, sino a un valor próximo al logaritmo de esta intensidad.

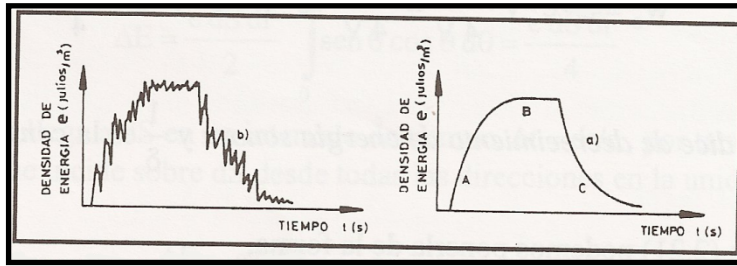


Figura 10: Curvas de crecimiento (A) y decrecimiento (C) de la energía sonora: a) cuando la absorción es constante, b) en condiciones reales.

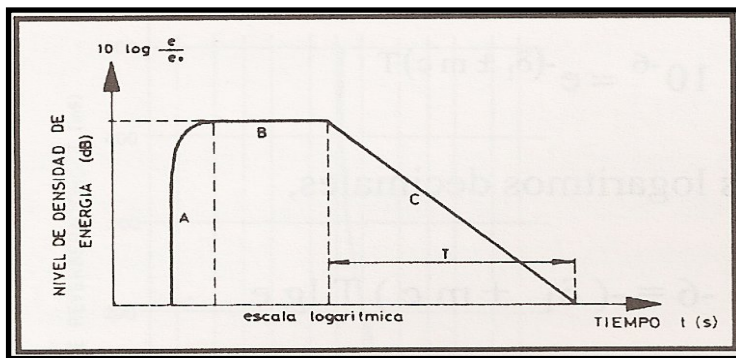


Figura 11: Gráfico de percepción auditiva del proceso de crecimiento y decrecimiento de sonido en un recinto.

Puesto que la palabra, la música y otros sonidos naturales, que son irregulares, son series de señales que se suceden unas a otras, la prolongación originada por la disminución puede hacer que cada señal se solape en el tiempo con la siguiente, enmascarándola hasta cierto punto. El efecto de enmascaramiento mostrado en la figura 12, puede producir interferencias, y dependiendo de la duración del eco, impedir la calidad sonora.

El proceso de disminución de la energía en el recinto se conoce como reverberación, y la duración del eco, o sea el tiempo que la señal necesita para reducirse hasta el umbral de audición, se conoce como tiempo de reverberación.

Observando la interferencia originada por el sonido al disminuir, el tiempo de reverberación se usa en la teoría estadística como un factor que facilita la evaluación de las propiedades acústicas de un recinto.

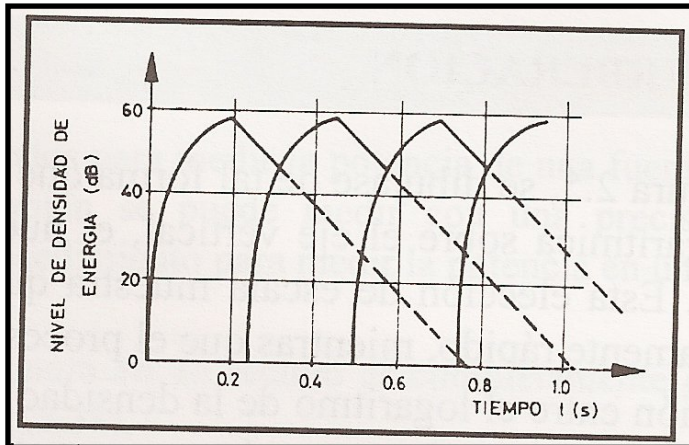


Figura 12: Gráfico de crecimiento y decrecimiento de impulsos en un recinto.

El tiempo de reverberación está relacionado no sólo con los factores que caracterizan al recinto (S , V y α) sino también con la densidad de energía inicial e_0 , si el valor de e_0 crece, más largo será el tiempo necesario para que el sonido caiga hasta el umbral de audición. Ya que la reverberación debería definirse sólo en términos de las propiedades acústicas del recinto, y que no debería depender de la intensidad de energía radiada por la fuente, por lo que se ha adoptado una definición normalizada.

Se denomina tiempo de reverberación normalizado T , según propuso W.C. Sabine, al tiempo empleado por la energía sonora en un recinto para disminuir a 10^6 veces su valor original (una disminución en el nivel de energía de 60 dB).

- Tiempo de reverberación Eyring $\rightarrow Tr = \frac{0,162 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)}$
- Tiempo de reverberación de Sabine $\rightarrow Tr = \frac{0,162 \cdot V}{A_{tot}} = \frac{0,162 \cdot V}{S_{tot} \cdot \alpha}$

TEORÍA GEOMÉTRICA

La teoría estadística sólo se puede utilizar para el estudio de recintos caracterizados por una distribución de energía sonora uniforme. Pero existe un gran número de recintos que no cumplen esta condición, por lo que en estos casos, es necesario realizar un minucioso estudio

del recinto, especialmente de las superficies interiores, que originan esa falta de uniformidad en la distribución de la energía, encontrándolas y neutralizando sus efectos.

Si los materiales absorbentes se distribuyen arbitrariamente dentro del recinto, algunas superficies reflectantes pueden crear una fuerte onda reflejada, en ciertas partes del mismo. Cuando esta fuerte onda reflejada se suma a otras reflexiones difusas, se perturba notablemente el proceso normal de reverberación, produciéndose el efecto de una segunda fuente sonora en el recinto. Estas superficies reflectantes deben localizarse y neutralizar sus efectos, cambiándolas de posición o tratándolas con materiales absorbentes de buena calidad. También produce un efecto negativo sobre la distribución uniforme de energía en un recinto, la existencia en él de superficies cóncavas que pueden producir concentraciones de energía.

Otro fenómeno digno de tenerse en cuenta es el del ECO, irregularidad ésta que se produce cuando la diferencia de tiempo entre la llegada al oyente de la onda directa y la primera onda reflejada es mayor que un cierto tiempo mínimo de retardo.

La localización de las superficies perjudiciales a las condiciones acústicas del recinto, así como las concentraciones de energía sonora en determinadas regiones, se realiza mediante el llamado "método geométrico", que consiste en la construcción, valiéndose de las reglas ópticas, de diagramas que indican las trayectorias de los rayos reflejados, que es el término generalmente aceptado para indicar las direcciones de propagación de las ondas según un ángulo sólido infinitamente pequeño.

Una regla óptica aplicable a la acústica, es la igualdad entre el ángulo de incidencia y el de reflexión, de un rayo incidente sobre una superficie, así como que cada rayo reflejado puede considerarse procedente de un foco sonoro imaginario S' , simétrico del foco real S , respecto al plano de incidencia (figura 13).

Esta analogía entre el método geométrico en óptica y en acústica es tanto mayor, cuanto menor es la longitud de la onda sonora respecto a las dimensiones de las superficies reflectantes, esto significa que el método geométrico se puede emplear con exactitud sólo cuando comparativamente se consideran grandes superficies reflectantes o bien cuando analizamos sonidos de media y alta frecuencia. Sólo en el caso de grandes recintos, donde existe el peligro de aparición de ecos, o de recintos con grandes superficies reflectantes donde existe la posibilidad del efecto de perturbación direccional de los rayos reflejados, o de recintos que tienen superficies curvas, o con un extraño rincón donde existe la posibilidad de concentraciones anómalas de energía, el carácter del campo sonoro se determina mediante diagramas de rayos reflejados, dibujándose estos diagramas en el plano de una sección

horizontal o vertical del recinto, de tal manera que incluyan las superficies que perturban el campo sonoro.

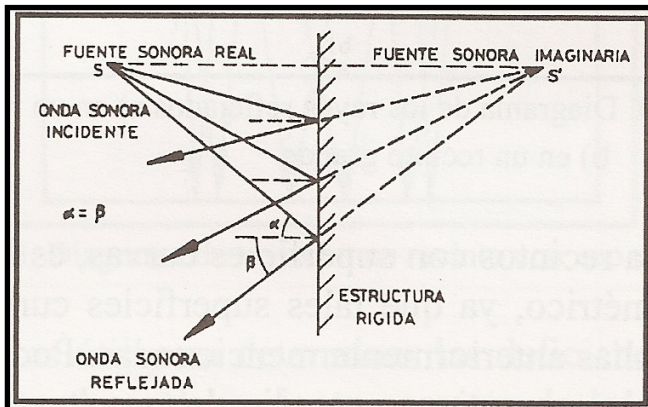


Figura 13: Diagrama de construcción de rayos reflejados y de la fuente sonora imaginaria.

De acuerdo con esta teoría, los rayos incidentes sobre una superficie curva tienden a ser o bien concentrados o dispersados, dependiendo de que la superficie sea cóncava o convexa (figura 14). La difracción de los rayos está presente, siendo el efecto más pronunciado para bajas frecuencias (longitud de onda grande) que para altas frecuencias (longitud de onda pequeña).

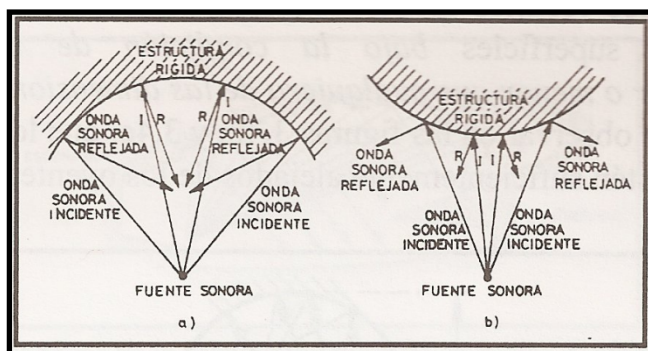


Figura 14: Reflexión de rayos sonoros, a) superficie cóncava, b) superficie convexa.

Se ve fácilmente la necesidad de realizar estos diagramas a escala, permitiéndonos calcular la longitud de los rayos directos y reflejados, lo que nos ayuda a determinar la posición de las superficies reflectantes. En la figura 15, Se puede ver el diagrama de los rayos reflejados en el techo de un recinto alto (15a), y el de los rayos reflejados en el techo y la pared posterior de un recinto grande (15b). En ambos casos, la condición para que se produzca en el interior del recinto eco, viene dada por la relación,

$$\left(\frac{l_1 + l_2}{c}\right) - \left(\frac{l_0}{c}\right) \geq \tau$$

donde $l_1 + l_2$ longitud del rayo reflejado, l_0 longitud del rayo directo, τ tiempo mínimo de retardo.

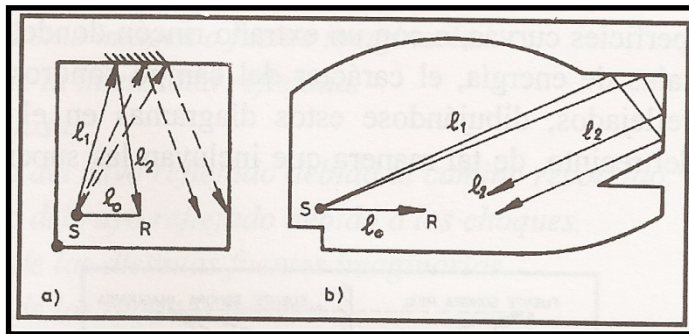


Figura 15: Diagrama de los rayos reflejados a) en un recinto alto, b) en un recinto grande.

Particularizando para recintos con superficies curvas, es fundamental el empleo de los diagramas del método geométrico, ya que tales superficies curvas hacen que estos recintos sean muy dados a las anomalías anteriormente mencionadas. Podemos ver en la figura 16a, el caso de la bóveda de un recinto que tiene un radio de curvatura aproximadamente igual a su altura, por lo que se produce una concentración de rayos reflejados, en la región donde están situados los oyentes (zona oscura donde van a parar los rayos en el suelo), afectando negativamente las condiciones de audición, debido principalmente a la superposición en esa zona de las ondas directa y reflejadas. A esto y a la existencia de zonas con gran concentración de energía sonora, junto a otras de mínima concentración hay que añadir la posibilidad de aparición del eco, debido a la acumulación en un punto del recinto de rayos reflejados de segundo, tercer orden, etc., con un tiempo de retardo superior al mínimo, y que han adquirido una intensidad comparable a la de los rayos directos. Todo eso implica la necesidad de evitar en los recintos mencionados, la existencia de superficies curvas o al menos utilizar dichas superficies bajo la condición de un radio de curvatura considerablemente mayor o menor que cualquiera de las dimensiones del recinto, con esto se consigue, según se puede observar en las figuras 16b, y 16c, que los puntos de concentración de los rayos reflejados, estén suficientemente alejados de los oyentes.

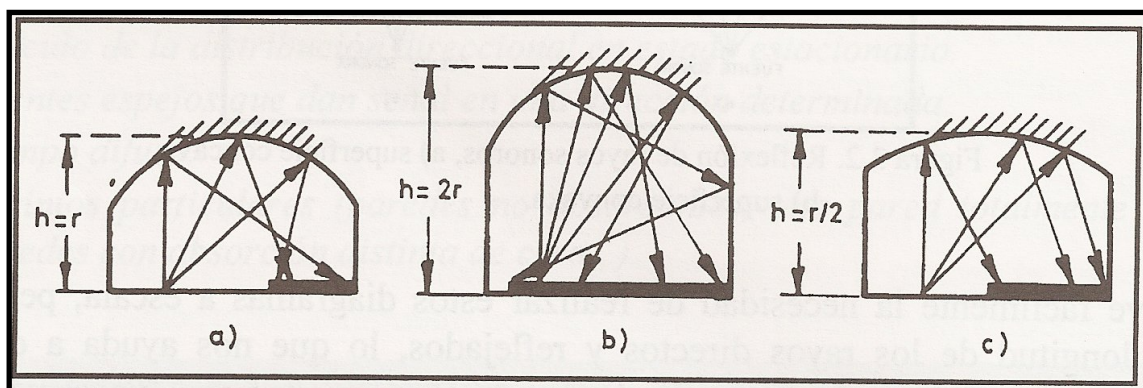


Figura 16: Diagrama de rayos en recintos con techos: a) con el radio de curvatura r igual a la altura del recinto; b) cuando r es igual a $h/2$ y c) cuando r es igual a $2h$.

Hay otro efecto negativo, que debe tenerse en cuenta, producido por la concentración de energía sonora en determinados puntos de un recinto. Ya que las superficies curvas pueden provocar las concentraciones de rayos reflejados de alta o media frecuencia pero no de baja frecuencia, en los que la longitud de onda puede ser superior al radio de curvatura de la superficie reflectante, la distribución de la energía sonora en este caso variará con la frecuencia.

Generalmente en los recintos con dos grandes superficies paralelas (el suelo y el techo) débilmente absorbentes frente a las otras superficies, o con una superficie reflectante curva, aparece el eco repetido múltiple, debido al retorno por un punto determinado de varias reflexiones (punto A figura 17). Las condiciones bajo las cuales se produce este eco múltiple, se determinan mediante el método geométrico.

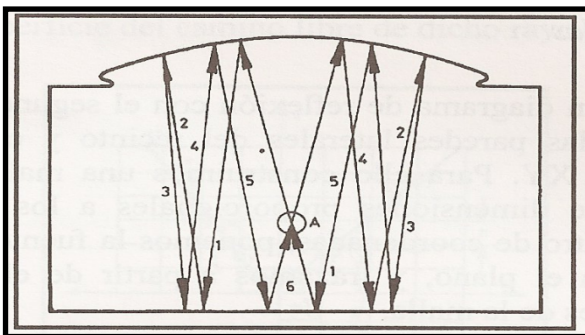


Figura 17: Diagrama de rayos en un recinto con eco múltiple.

Este método no sólo es útil para determinar las deficiencias acústicas de un recinto, sino también para caracterizar el emplazamiento correcto de las superficies reflectantes que permiten una distribución uniforme de la energía, dirigiendo los rayos reflejados de primer orden paralelamente, orientándolos hacia el final del recinto donde el nivel de la onda directa es más bajo, dispersándolos mediante superficies convexas para lograr la máxima difusión del campo sonoro, etc.

Como hemos expuesto, el concepto de rayo sonoro, y el estudio de la trayectoria de los rayos, juega un papel importante en el diseño de grandes recintos y auditorios. La figura 18, presenta la construcción que se puede adoptar para la colocación de los reflectores en el techo de una sala, con el fin de mejorar la distribución sonora.

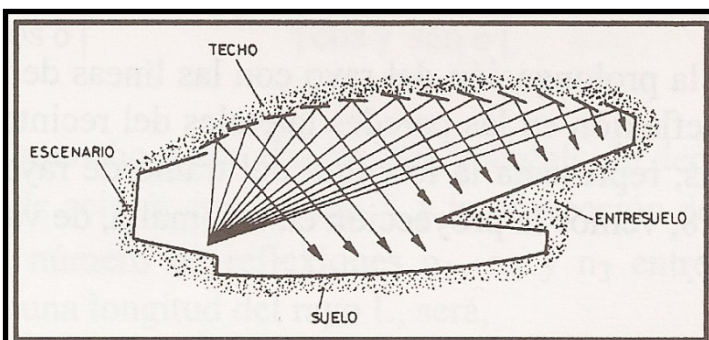


Figura 18: Diagrama de la primera reflexión de las ondas sonoras en una sala.

Una limitación a la gráfica de las reflexiones, consiste en que sólo la primera y como mucho la segunda reflexión se puede estudiar antes de que el rayo se pierda en el campo sonoro reverberante.

TEORÍA ONDULATORIA

El análisis de los procesos sonoros en un recinto no sólo se realiza mediante una idealización particular del campo, como en las teorías estadística y geométrica, sino que puede efectuarse también sobre la base de un plano físico real del fenómeno ondulatorio. La importancia de realizar este tipo de análisis de una forma sistemática reside en el hecho de que al contrario del análisis estadístico o geométrico, este método revela la realidad del fenómeno sonoro en un recinto, así como sus características básicas.

Recordemos que el volumen de aire en un recinto cerrado es un sistema vibratorio complejo que puede asimilarse a una combinación de un número de sistemas simples. Cuando una fuente sonora funciona en un recinto, origina un proceso vibratorio, con vibraciones forzadas y modos normales de vibración, llegando a una situación estacionaria en el recinto cuando éstas se amortiguan. Las vibraciones de este estado estacionario, al contrario de lo que sucede cuando se distribuyen en un espacio abierto, pueden expresarse como la suma de un gran número de ondas estacionarias. Cuando se desconecta la fuente sonora, el sistema pierde el equilibrio, conservando solamente sus modos normales de vibración, que también tienen la forma de ondas estacionarias, las cuales disminuyen gradualmente siguiendo una ley exponencial, que es común para todos los modos normales de vibración.

La experiencia demuestra que en recintos normales se observa el fenómeno de la reverberación para cualquier frecuencia de la fuente, lo que sólo es posible, si estos recintos tienen un gran número de frecuencias características próximas unas de otras, además se sabe que un número infinitamente grande de frecuencias características, se asocia con un número igual de sistemas vibratorios con constantes distribuidas uniformemente. Por tanto, desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, el volumen de aire en un recinto es un sistema vibratorio complejo con parámetros distribuidos, que cuando se excita por un impulso sonoro, genera sus modos propios de vibración, que se amortiguan gradualmente. Puesto que el fenómeno de la reverberación puede representarse como el amortiguamiento de las frecuencias características del espacio aéreo de un recinto, es necesario estudiar detenidamente la naturaleza de estas vibraciones.

MATERIALES PARA ACONDICIONAMIENTO Y AISLAMIENTO ACÚSTICO. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Los materiales y estructuras para tratamiento acústico, se pueden describir como aquellos que tienen la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas sonoras que chocan contra ellos. Pueden emplearse para aislar y para acondicionar acústicamente, de diferentes maneras como:

1. Estructuras para reducir la transmisión sonora.
2. Elementos para barreras y cerramientos.
3. Unidades suspendidas individuales.
4. Recubrimientos de paredes, suelos y techos.

El aislamiento acústico consiste en impedir la propagación de una señal sonora a través del aire, mediante diferentes obstáculos reflectores, para lo que son necesarias paredes duras y pesadas, que reflejan el sonido, pero no lo absorben. También se puede realizar el amortiguamiento del sonido, mediante la absorción del mismo. Es difícil en la realidad conseguir una estructura que refleje todo el sonido, sin que absorba una parte del mismo. La pérdida por transmisión PT indica la capacidad de una pared para atenuar las ondas.

El aislamiento de vibraciones, consiste en impedir la propagación de las vibraciones mediante sistemas que vibren en concordancia de fase, es decir con cuerpos de dimensiones pequeñas frente a la longitud de onda. La frecuencia límite entre sonido y vibración de un cuerpo sólido se puede situar alrededor de los 100 Hz.

Cuando una onda sonora choca contra una pared, una parte de la energía que transporta la onda se transmite a través de la pared, y otra parte se refleja. La capacidad que tiene una pared para impedir que el sonido se transmita a través de ella, se da mediante su aislamiento acústico normalizado R, dado en Dby a las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, que nos informa sobre el aislamiento acústico que presenta esa pared entre dos recintos adyacentes.

Los materiales empleados para aislar el ruido aéreo, que es el sonido no deseado transmitido por el aire, son ladrillos de diferentes tipos, como por ejemplo de 2 pies o 1 pie, huecos, macizos, etc. Asimismo, se emplean otros materiales como yeso, cartón-yeso, fibras de diferentes densidades, así como otros muchos tipos de materiales. Un factor importante en la elección de materiales para paredes maestras con relación a su aislamiento acústico a ruido aéreo, es la masa de la pared por metro cuadrado de superficie. En la práctica, para masas iguales las paredes de madera son menos conductoras de sonido que los ladrillos que dan mejores resultados que el concreto. Desde el punto de vista del ruido aéreo, las paredes maestras

y las fachadas de los edificios que se hacen pesadas y gruesas por razones de solidez, pueden asegurar suficiente aislamiento acústico a ruido aéreo (50-55 Dby); sin embargo, esas paredes muy frecuentemente sirven para transmitir vibraciones a través de la estructura. Los métodos más simples de defensa son el uso de materiales aislantes en la estructura de los edificios y el empleo de rellenos de materiales densos o plásticos (gomas, corcho). El primer método reduce la posibilidad de la transmisión indirecta de ruidos por medio de vibraciones longitudinales, el segundo impide la distribución de las vibraciones longitudinales y de las flectoras; el espesor de la capa elástica puede elegirse entre 25 y 40 mm, algunas veces se emplean muelles de metales especiales como rellenos elásticos.

Un método más efectivo para luchar contra los ruidos que penetran a través de los elementos de la construcción de un edificio, es tener una separación total entre la estructura del edificio y el recinto que debe protegerse del ruido. Este método se emplea cuando se necesita un aislamiento muy bueno, como en estudios de radio, televisión, etc. Tal sistema de protección, conocido como "flotante", tiene al recinto totalmente aislado de los elementos sustentadores de la construcción y descansando sobre artificios de plástico o suspendidos de ellos. La atenuación introducida por la conexión oscilante da como resultado una gran reducción de ruido aéreo, percusivo o vibratorio. Si es necesario aislar el recinto del ruido de maquinaria, se recomienda que además de montar la misma en unos cimientos separados deberá colocarse en un recinto separado. Las paredes se hacen de un material opaco al sonido (ladrillo), con un tratamiento interno de materiales absorbentes sonoros.

Las paredes interiores no pueden ser macizas y gruesas debido a su elevado costo económico y a la imposibilidad de colocar cargas pesadas en las partes de soporte de carga de la estructura. Por tanto, surge la necesidad de aumentar el aislamiento de las paredes con masas comparativamente pequeñas. Esto se realiza mediante el uso de construcciones de capas múltiples y de materiales porosos. Es deseable que dos elementos de pared formando una construcción compleja, siempre que sea posible, sean de diferentes materiales, uno de otro en masa, espesor y elasticidad. Tales medidas reducen la posibilidad de la aparición de resonancias que causan depresiones en la característica de frecuencia del aislamiento. En el caso de una pared ligera de dos capas se puede aumentar a un nivel similar al de una pared grande y sólida colocando en la cavidad una capa de material poroso blando. Aparte del aislamiento adicional, esto introduce un desorden dentro del sistema, que reduce las resonancias mejorando el rendimiento del sistema.

Los suelos, que como muchas paredes son fronteras límites, se distinguen de ellas por el hecho de que están más expuestos a los golpes (pisotones, movimientos de muebles, etc). Como se observa en la transferencia de sonido aéreo, los suelos no son diferentes de las paredes y su

aislamiento aumenta con el incremento de la masa. Los suelos normales con un peso de 200 - 300 Kg/m² tienen una pérdida de transmisión de 45 - 50 dB. Sin embargo, este aislamiento es insuficiente para protegerlo contra los impactos y se tienen que tomar medidas adicionales. Algunos caminos posibles de transmisión sonora a través de una estructura son: 1º) directa a través de la pared común, 2º) por flancos a través tanto de elementos comunes como de otros elementos de la partición. El techo suspendido reduce la transmisión directa a través del suelo pero no la influencia de la transmisión por flancos. El suelo flotante reduce el , impacto generado por la fuente y disminuye la transmisión por flancos a través del suelo. Un aislamiento adicional de las paredes del recinto reduciría el remanente de la señal directa y la transmisión por flancos.

Un techo flotante, suspendido sobre resortes, puede aumentar el aislamiento si su masa no es muy pequeña, si la capa de aire entre el techo y el suelo tiene un espesor de 10 cm, y si el puente del techo flotante tiene ranuras ocupadas con rellenos elásticos donde se apoyan las paredes. En este caso, se crea una partición normal de dos capas, cuyo aislamiento se puede aumentar todavía más colocando una hoja de material poroso en el espacio aéreo (fibra de vidrio o fieltro). Un suelo flotante presenta una protección contra los impactos de ruido, debiendo estar el suelo completamente aislado de la pared y del verdadero suelo soporte de carga. Por esto, el falso suelo se coloca sobre rellenos blandos resistentes (fibra de vidrio, corcho o caucho, gomas), separado de la pared por rellenos similares. Así, con un suelo flotante y debajo de un techo flotante, el suelo se vuelve como una construcción de tres capas, cuyo aislamiento total es mucho más elevado que cualquier suelo ordinario. Finalmente, la transmisión del impacto se puede reducir todavía más si la superficie del suelo se cubre de materiales blandos. En particular, donde el suelo está cubierto de una alfombra de caucho esponjoso, el aumento del aislamiento es de 14 dB, y con varias capas es de 20 dB.

Los materiales acústicos se emplean también como superficie de acabado de diferentes tipos de construcciones, con el fin de satisfacer unas determinadas condiciones. Algunas de las propiedades que merecen consideración, además de la absorción sonora, son el efecto decorativo, reflectividad lumínica, mantenimiento, duración, resistencia al fuego, etc. Las pérdidas de energía en los materiales se pueden caracterizar mediante el coeficiente de absorción sonora α entendiendo por tal la relación entre la energía sonora absorbida por un material y la energía sonora incidente sobre dicho material por unidad de superficie y que puede variar desde un 1 o 2 % al 100 %, para diferentes materiales. El coeficiente de absorción sonora de un material depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con el que la onda incide sobre la superficie. Ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen dar los mismos a las frecuencias de 125, 250, 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz.

Los materiales de acabado de interiores tales como hormigón, yeso, vidrio, mampostería, terrazo, etc., son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser muy reflectantes, con unos coeficientes de absorción inferiores a 0,05, sobre todo a las bajas frecuencias.

Las alfombras y cortinas proporcionan una buena absorción, en virtud de su porosidad. La absorción de las alfombras depende de un cierto número de factores, que incluyen altura de pelo, peso, tipo de apoyo, espesor y material del forro. En la mayoría de las alfombras, la absorción crece con la frecuencia, alcanzando valores elevados en la zona de las altas frecuencias. La absorción de las cortinas varía ampliamente, dependiendo de su peso y de la cantidad de pliegues. La absorción se incrementa especialmente a las bajas frecuencias, separando las cortinas algunos centímetros de la pared. El mobiliario así como las personas pueden añadir un incremento en la absorción en un local. El coeficiente de absorción de cualquier material, varía considerablemente con el ángulo de incidencia de las ondas. Cuando los materiales se emplean para recubrir las superficies de un recinto, están expuestos normalmente a las ondas sonoras que inciden bajo diferentes ángulos aleatoriamente distribuidos. Como consecuencia de esto, los coeficientes de absorción sonora comerciales se determinan por el método de la cámara reverberante. Este es básicamente un método de integración, en el que las ondas chocan con la muestra de ensayo simultáneamente desde diferentes direcciones. El coeficiente se calcula a partir del efecto medio de la muestra en el campo sonoro de la cámara, considerando el resultado como un valor medio para todos los ángulos de incidencia. Este coeficiente se llama de Sabine α_0 , para distinguirlo del coeficiente de incidencia normal o de Kundt α_{90} , que se aplica al caso de ondas que chocan perpendicularmente con la superficie y que se mide por el método de Kundt.

No existe una relación fija o exacta entre el coeficiente de incidencia normal o de Kundt y el de incidencia aleatoria o de Sabine para los diversos materiales. Es decir, dos materiales que tengan el mismo coeficiente de incidencia normal, no tienen porqué tener el mismo coeficiente de incidencia aleatoria. El coeficiente de absorción Sabine, tiene un valor superior al coeficiente de Kundt. Para materiales muy absorbentes el valor puede exceder a la unidad hasta en un 20 o 30 %, como consecuencia de las técnicas de medida empleadas en su cálculo.

Si en el interior de un local existen diferentes objetos y personas, para encontrar la absorción total de un número de objetos del mismo tipo, se multiplica la absorción equivalente de un objeto por el número total de objetos en el recinto.

Se define como absorción equivalente de un objeto, a la absorción total de un metro cuadrado de superficie, cuyo coeficiente de absorción es numéricamente igual a la absorción

producida por un objeto. El coeficiente de reducción de sonido (NRC) es el promedio de la absorción a 250, 500, 1.000 y 2.000 Hz, redondeando al más próximo en 0,05.

Un elemento que interviene en la absorción sonora, principalmente en el campo de las bajas frecuencias, es el espesor del volumen de aire existente entre la cara del material y la superficie rígida que lo soporta. Este volumen puede variar en la práctica desde cero cuando el material se monta directamente sobre el soporte rígido, hasta algunos metros como en el caso de los techos acústicos suspendidos. Es necesaria una anchura de al menos 10 cm para mantener una alta absorción a las bajas frecuencias (figura 19).

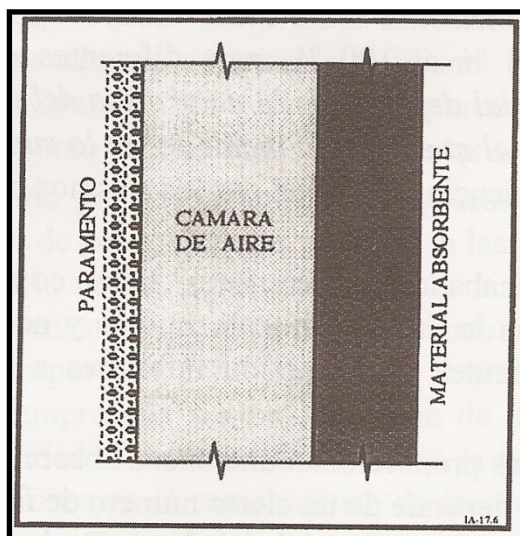


Figura 19: Detalle de colocación de un material con una cámara de aire.

En general, los materiales acústicos, presentan una curva de absorción en función de la frecuencia en forma de campana, con un pico más o menos agudo en función de la anchura de volumen de aire. Los materiales acústicos comerciales utilizados para recubrir superficies de paredes y techos, se pueden clasificar de diferentes formas, dependiendo de las propiedades físicas y estructurales que se consideren (figura 20), pudiendo exponerse unas ideas generales sobre los siguientes tipos.

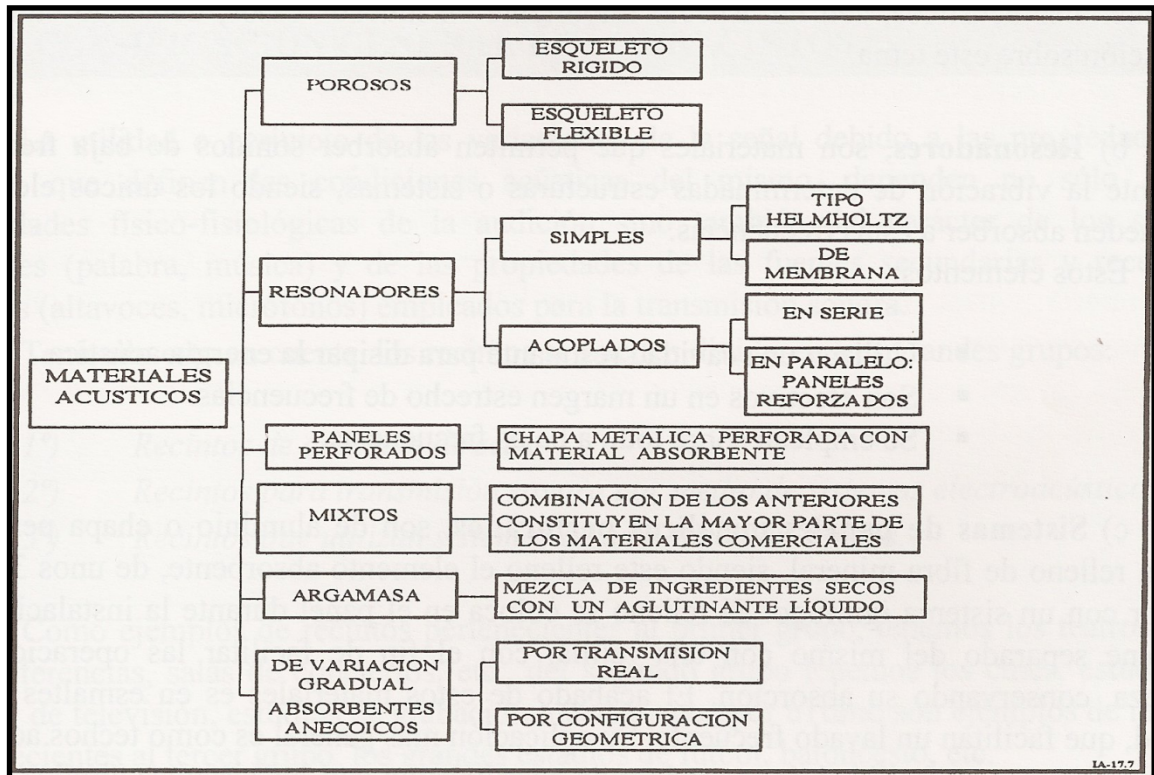


Figura 20: Esquema de los materiales absorbentes.

a) **Materiales porosos**, son de estructura granular o fibrosa, siendo importante el espesor de la capa y la distancia entre ésta y la pared. El espesor del material se elige de acuerdo con el valor del coeficiente de absorción deseado, ya que si es demasiado delgado se reduce el coeficiente de absorción a las bajas frecuencias, mientras que si es muy grueso resulta más caro. En la práctica, el empleo de materiales fibrosos absorbentes, se asocia a varias cubiertas perforadas que pueden ser de madera contrachapada, cartón, yeso, etc. Suelen presentarse en forma de paneles y tableros acústicos de fácil adaptación e instalación, tanto en nuevas construcciones, como en edificios ya existentes. La mayoría de estos materiales pueden colocarse como un techo suspendido por medio de elementos metálicos, debiendo cuidarse el problema de las humedades, que pueden originar la flexión de los mismos. Estos sistemas permiten la combinación de techos absorbentes, con la iluminación y el aire acondicionado en cualquier disposición deseada, permitiendo un fácil acceso al espacio superior. En un panel acústico, el incremento de su espesor, aumenta la absorción principalmente a las frecuencias de 250, 500 y 1.000 Hz, con un efecto prácticamente despreciable fuera de este rango. Si se monta este material dejando un espacio de aire, entre él mismo y la pared, aumenta la absorción a 250 Hz y algo a 125 Hz. Existe también una disminución característica de absorción a 500 Hz en todos los montajes con espacio de aire, pero no existe o es muy pequeño el cambio a frecuencias

más altas. La mayoría de los materiales presentan cambios insignificantes en la absorción a medida que el espacio de aire se incrementa de 20 a 40 cm.

La mayoría de los paneles acústicos empleados para acondicionamiento acústico, tienen una alta reflectancia lumínica del orden de 0,7 a 0,8. Para mantener la reflectancia lumínica próxima a su valor inicial, se puede hacer mediante lavado normalizado o repintado, tan frecuentemente como sea necesario, sin dañar las características de absorción del material consultando al fabricante con respecto a las pinturas recomendadas y las técnicas de aplicación. Algunos materiales se suministran con acabados de pintura lavables, aplicados en fábrica, otros materiales se presentan con una membrana decorativa superficial, por lo que son más fáciles de mantenimiento. Las losetas se pintan con pinturas que no cubren los poros, como pueden ser soluciones de agua coloreadas. Las propiedades de resistencia al fuego de los materiales acústicos, son un aspecto importante en muchos casos, debiendo cumplir la legislación sobre este tema.

b) **Resonadores**, son materiales que permiten absorber sonidos de baja frecuencia mediante la vibración de determinadas estructuras o sistemas, siendo los únicos elementos que pueden absorber a estas frecuencias.

Estos elementos:

- Utilizan una cavidad resonante para disipar la energía acústica.
- Son efectivos en un margen estrecho de frecuencias.
- Se emplean sobre todo a bajas frecuencias.

c) **Sistemas de paneles metálicos perforados**, son de aluminio o chapa perforada, con un relleno de fibra mineral, siendo este relleno el elemento absorbente, de unos 3 cm de espesor con un sistema ignífugo. El relleno se coloca en el panel durante la instalación y se mantiene separado del mismo con una rejilla, con el fin de facilitar las operaciones de limpieza, conservando su absorción. El acabado de estos materiales es en esmaltes de alta calidad, que facilitan un lavado frecuente. Su aplicación más general es como techos acústicos suspendidos, por su facilidad de montaje y de coordinación con los sistemas aire/luz. Todos estos materiales, tienen un alto rendimiento como absorbentes, variando sus valores en función de la forma de perforación, de la densidad y espesor del elemento absorbente, así como el espacio de aire existente detrás de él.

d) **Materiales para argamasa**, son materiales acústicos que se aplican en estado húmedo con paleta o pistola para formar superficies continuas de un espesor deseado. Estos materiales están compuestos de una mezcla de ingredientes secos, a los cuales se les añade un aglutinante líquido. Los morteros se aplican normalmente a una capa de cemento o sobre cualquier otro

material. La aplicación puede ser en dos o más capas, empleando métodos normales de fratasado, aunque se está utilizando cada vez más el método a pistola.

e) **Sistemas de paneles rígidos**, tienen ventajas artísticas y de construcción frente a los materiales porosos, como son resistentes a los golpes, duración, posibilidad de pintado, barnizado, etc. La absorción de cada elemento del sistema, se determina mediante los datos de construcción, tales como tipo de material, dimensiones del sistema, distancia a la que está colocada de la pared, forma de ensamblaje, debiendo prestar gran atención, ya que todo ello repercute en los parámetros acústicos del sistema. Los sistemas de paneles rígidos se suelen emplear para corregir la absorción a bajas frecuencias, creando un campo sonoro más difuso.

f) **Absorbentes suspendidos**, se utilizan en algunos recintos en los que existen pocas superficies susceptibles de colocar materiales absorbentes. En este caso, se suelen emplear unidades de materiales suspendidos libremente en el recinto a cierta distancia de sus superficies límites. Normalmente toman la forma de láminas planas o pantallas de material absorbente colgadas verticalmente en hileras continuas. La absorción de estos sistemas se calcula normalmente en función de la absorción de cada uno, por el número de unidades. Este valor aumenta con la separación entre los absorbentes y se aproxima a un valor constante con grandes separaciones. Entre los elementos suspendidos en hileras continuas de hilos de acero o cables tendidos entre paredes o vigas del techo, la separación puede variar desde 0,6 a 1,8 m y las hileras pueden correr en una o dos direcciones.

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS RECINTOS

La utilidad o perjuicio de las variaciones de la señal debido a las propiedades del recinto, que definen las condiciones acústicas del mismo, dependen no sólo de las propiedades físico-fisiológicas de la audición sino también del carácter de los sonidos naturales (palabra, música) y de las propiedades de las fuentes secundarias y receptores sonoros (altavoces, micrófonos) empleados para la transmisión sonora.

Teniendo esto en cuenta, los recintos se pueden dividir en tres grandes grupos:

1. Recintos de audición directa.
2. Recintos para transmisión sonora por medio de sistemas electroacústicos.
3. Recintos que utilizan sistemas de amplificación sonora.

Como ejemplos de recintos pertenecientes al primer grupo, tenemos los teatros, salas de conferencias, salas de conciertos, etc., del segundo grupo tenemos los cines, estudios de radio y

de televisión, estudios de grabación musical, etc., por último son ejemplos de recintos pertenecientes al tercer grupo, los grandes estadios de fútbol, baloncesto, etc.

En el primer grupo de recintos, utilizados para audición directa, la radiación de las señales así como la recepción en los oídos del oyente, suceden en el mismo recinto, o sea, estos procesos son comunes en espacio y tiempo. En este tipo de recintos, una importante característica, es que la potencia de las fuentes sonoras que en ellos se utilizan, es relativamente pequeña, estando condicionada por ejemplo por las limitaciones de la voz humana o de los instrumentos musicales. En estos casos es muy importante el efecto amplificador debido a los modos propios de vibración del recinto excitados, sobre todo en recintos de grandes dimensiones. También es importante que la reverberación producida no sea demasiado prolongada, con el fin de que no interfiera la claridad del sonido.

En el segundo tipo de recintos por medio de un sistema electroacústico, se utilizan dos tipos de recintos, el primario, que contiene las fuentes sonoras y el micrófono, para el proceso de registro y el secundario, que aloja al altavoz y a los espectadores que toman parte en el proceso de recepción. En este tipo de recintos la fuente sonora está separada de los espectadores, realizándose la conexión entre ellos por medio de un sistema electroacústico, los procesos de registro y reproducción están en algunos casos separados en el espacio y en el tiempo (registro y reproducción de la banda sonora de una película) o en otros solamente en el espacio (emisoras de radio). Por tanto, las señales sonoras reproducidas por los altavoces en el recinto secundario llevan la reverberación característica del recinto primario. Además, las ondas sonoras experimentan nuevos cambios debido a los efectos que sobre ellas ejerce el recinto secundario. Teniendo todo esto en cuenta, en los recintos diseñados para audición (por ejemplo cines) las señales que se emiten, se amplifican de 10 a 15 dB, por lo que la amplificación de las señales supone también la amplificación de la reverberación, la distorsión total en este caso es mayor que en condiciones de audición directa.

Los recintos pertenecientes al tercer grupo, tienen las propiedades del recinto de audición directa, ya que el espectador está en el mismo recinto que la fuente primaria, y también tiene las propiedades de los recintos para transmisión sonora, ya que existen micrófonos y fuentes secundarias (altavoces). La presencia de dos medios de transmisión sonora de la información, desde la fuente al espectador, tiene como resultado un solapamiento de ecos que resulta de la vibración de los modos propios excitados por las dos fuentes i primaria y secundaria. Debido a esto la influencia de la acústica del recinto sobre la calidad de la transmisión sonora es más importante que en recintos para audición directa. En algunos recintos con sistemas de amplificación sonora, se presenta una importante diferencia entre las distancias que separan al

espectador de las fuentes primaria y secundaria, debido a esto se alteran las relaciones de tiempo entre las dos señales básicas, llegando al espectador por dos caminos diferentes.

Como las condiciones acústicas en recintos están relacionadas con el carácter de la señal transmitida e incluso con el tipo de emisor o receptor sonoro, el primero y el segundo tipo de recintos se pueden dividir además en subgrupos. El primero por ejemplo en recintos para oratoria y para música, el segundo en recintos para registro sonoro y recintos para reproducción sonora.

En la práctica en la clasificación de recintos, no sólo hay que tener en cuenta el carácter de las fuentes y de los receptores utilizados en el proceso de transmisión, sino también el uso que se va a hacer de ese recinto. Dada la gran variedad de recintos destinados a usos diferentes en la transmisión de sonido, deben hacerse exigencias particulares para cada uno de ellos, de acuerdo con sus condiciones acústicas. Estas exigencias se realizan después de un detallado estudio de los procesos sonoros en el recinto, de los factores que influyen en ellos, y también de las condiciones que aseguren la mejor recepción sonora.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SALA

La sala que se va acondicionar acústicamente, pertenece a la asociación de la Casa de Andalucía de Benicarló, dicha sala va a ser destinada para realizar diferentes actos de esta asociación, como puede ser por ejemplo:

- Charlas, conferencias, etc.
- Conciertos con instrumentos.
- Conciertos del coro rociero.

Las características generales de la sala son las siguientes:

-Superficie total $\rightarrow 116,335 \text{ m}^2$

-Superficie escenario $\rightarrow 25,103 \text{ m}^2$

-Superficie total menos el escenario $\rightarrow 91,232 \text{ m}^2$

-Superficie platea $\rightarrow 75 \text{ m}^2$

-Volumen total $\rightarrow 484,0344 \text{ m}^3$

A la superficie total menos el escenario, se ha quitado $16,323 \text{ m}^2$ para dejar sitio a los accesos y pasillos. En la superficie de platea que ha quedado podemos acomodar a 88 personas, si se toma como referencia $0,85\text{m}^2$ por persona.

Como podemos ver, el principal problema que tiene esta sala, son sus grandes dimensiones y por eso tiene un tiempo de reverberación mas alto de lo necesario.

Por ello podemos tener los siguientes problemas:

- **Aumento del nivel de ruido** → La reverberación producida en locales cerrados aumenta las reflexiones del sonido y, por tanto, el nivel acústico en el local.
- **Deficiente inteligibilidad de la palabra** → La reverberación provoca reflexiones de distintas fuentes, que dificultan el entendimiento de la palabra.

A continuación se muestran unas ilustraciones de la sala:







NORMATIVA

La normativa que se va a utilizar para realizar las pertinentes mediciones en el local, son las siguientes:

- **UNE-EN ISO 3382** → Acústica: Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos (ISO 3382:1997)

- **UNE-EN ISO 3382-1** → Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos

Parte 1: Salas de espectáculos (ISO 3382-1:2009)

- **UNE-EN ISO 3382-2** → Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos

Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008)

La descripción de cada una de ellas se adjunta en el Anexo I.

A continuación se muestra una tabla resumen obtenida a partir de la normativa 3382-2, para medir el **tiempo de reverberación** del local :

| CALCULO TIEMPO DE REVERBERACIÓN | | | | |
|---|---------------------------|--|-------------------|------------------|
| OBSERVACIONES | | Las mediciones del tiempo de reverberación se deberán realizar en un recinto sin personas. (Se permite hasta 2 personas.) | | |
| | | En recintos grandes, la atenuación por el aire puede contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas. | | |
| | | Para las mediciones de precisión, se debe medir la temperatura y la humedad relativa del aire en el recinto. | | |
| | | La contribución de la absorción del aire es baja si el tiempo de reverberación es inferior a 1,5 s a 2 kHz e inferior a 0,8 s a 4 kHz. | | |
| EQUIPO | FUENTE ACÚSTICA | La fuente debería ser lo más omnidireccional posible. | | |
| | MICRÓFONOS | Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales: <ul style="list-style-type: none"> • Diámetro diafragma máximo 27mm. • Diámetro diafragma mínimo 14mm. | | |
| | EQUIPO DE ANÁLISIS | <ul style="list-style-type: none"> • Promediado exponencial continuo. • Promediado exponencial discreto. • Promediado lineal. | | |
| POSICIONES DE MEDICIÓN | | | | |
| OBSERVACIONES | | Las posiciones de la fuente pueden ser las posiciones normales en función del uso del recinto. | | |
| | | En los recintos pequeños conviene colocar una posición de la fuente en una esquina del recinto | | |
| | | Las posiciones de micro deben estar separadas 1'4m | | |
| | | La distancia a cualquier superficie reflectante debe ser 0'7m | | |
| | | Hay que evitar cualquier posición simétrica | | |
| | | En el caso especial de un micrófono móvil, el radio de barrido debe ser de al menos 0,7 m | | |
| | | El plano de barrido no debe encontrarse a menos de 10° de cualquier plano del recinto (pared, suelo, techo) | | |
| | | La duración de un período de barrido no debe ser inferior a 15 s | | |
| La distancia máxima que un micro ha de estar de la fuente es: | | $d_{\min.} = 2\sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}}$ | | |
| COMBINACIONES POSIBLES | | CONTROL | INGENIERÍA | PRECISIÓN |
| Combinaciones fuente-micrófono | | 2 | 6 | 12 |
| Posiciones de la fuente | | ≥ 1 | ≥ 2 | ≥ 2 |
| Posiciones de micrófono | | ≥ 2 | ≥ 2 | ≥ 3 |
| Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido) | | 1 | 2 | 3 |

MEDICIONES DEL RECINTO

En el recinto se va a realizar dos tipos de mediciones:

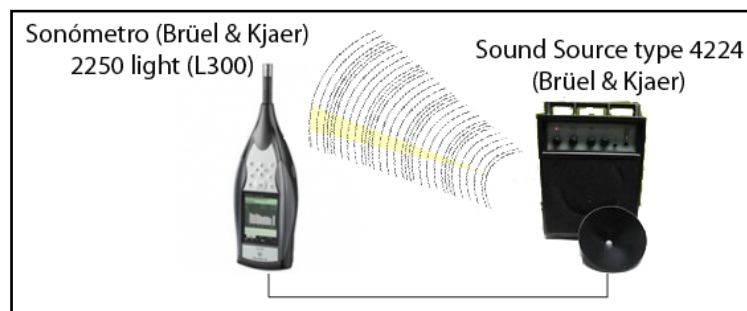
- Medición del tiempo de reverberación.
- Medición de la respuesta al impulso de la sala y valores característicos de esta.

MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Para poder realizar la medición del tiempo de reverberación, voy a utilizar el siguiente equipo:

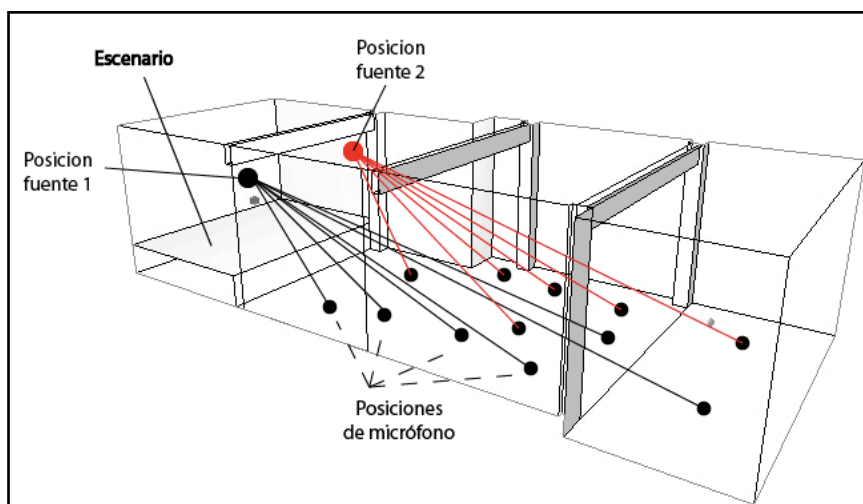
- Sonómetro (Brüel & Kjaer) 2250 light (L300).
- Sound Source type 4224 (Brüel & Kjaer)

La interconexión de los equipos es la siguiente:



Como vemos en la imagen, el sonómetro se conecta a la fuente para excitarla.

Aplicando la normativa antes descrita y utilizando el método de **INGENIERÍA**, hemos llevado a cabo la siguiente distribución de fuente-micrófono en la sala vacía de gente:



Obtenido los siguientes resultados:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|-----|------|------------|-------------|------|------|
| Tr [s] | 3 | 2,92 | 2,7 | 2,54 | 2,42 | 2,18 |

Esta tabla muestra los valores medios, obtenidos a partir de todas las medidas realizadas en la sala por frecuencia.

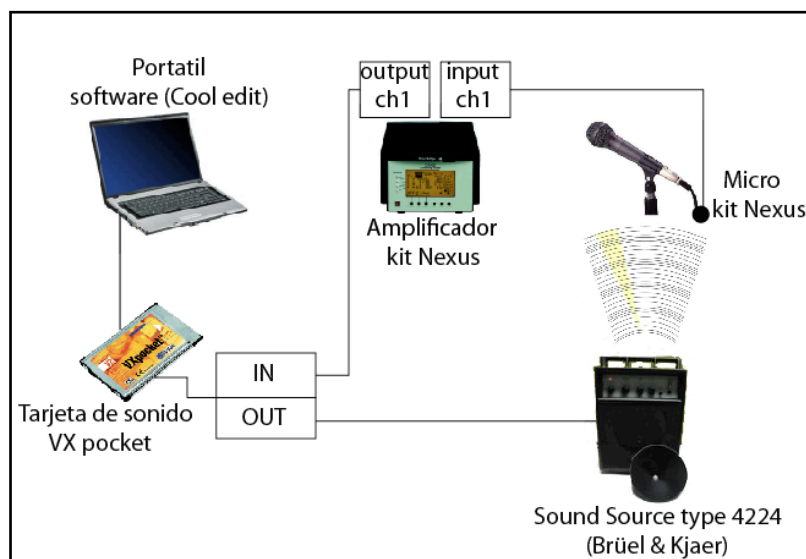
Para trabajar, se va a utilizar el Tr de 500 o el de 1000 HZ

MEDICIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE LA SALA Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE ESTA

Para realizar esta medición, se ha tenido que disponer del siguiente material:

- Sound Source type 4224 (Brüel & Kjaer)
- Ordenador portátil (DELL)
- Kit Nexus (Brüel & Kjaer)
- Tarjeta de sonido VX pocket

La interconexión de los equipos es la siguiente:



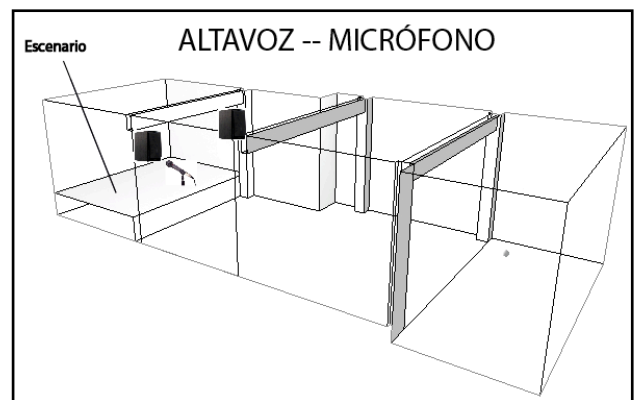
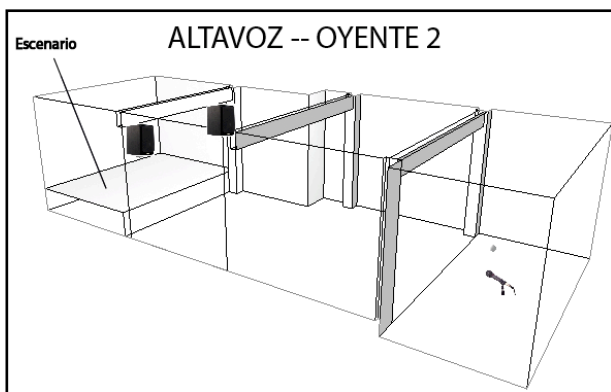
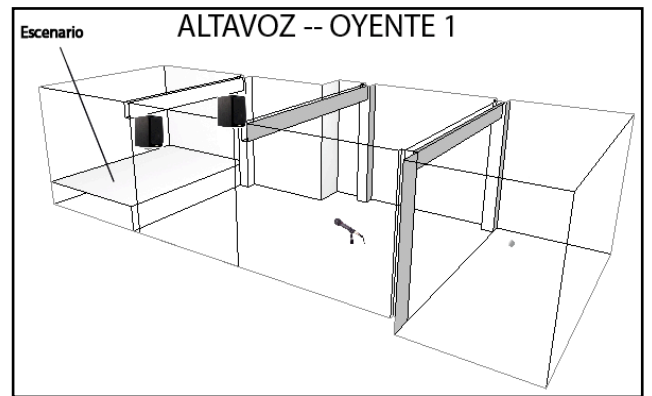
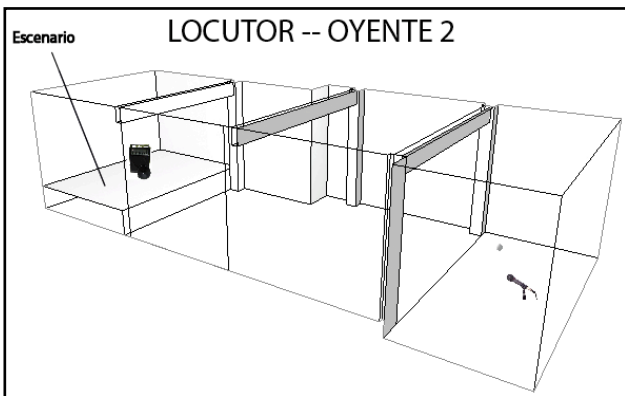
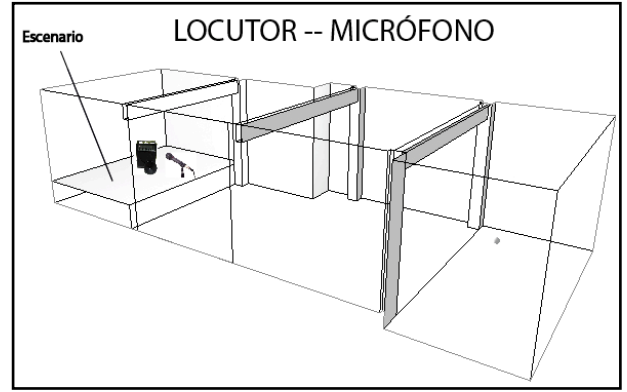
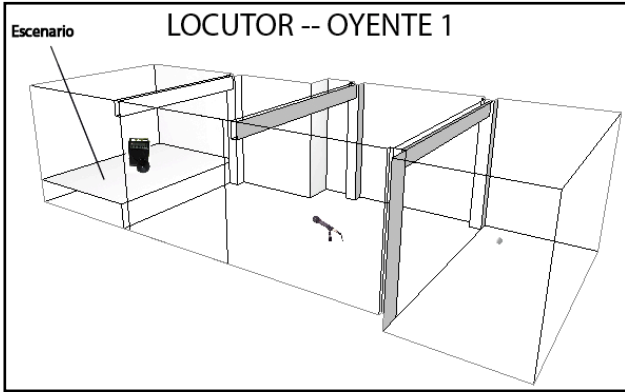
Respetando la normativa antes descrita, vamos a realizar la pertinentes mediciones para conseguir la respuesta al impulso de la sala. Se van ha realizar 6 mediciones distintas con la siguiente relación:

1. Locutor – Micrófono
2. Locutor – Oyente 1
3. Locutor – Oyente 2
4. Altavoz – Micrófono
5. Altavoz – Oyente 1
6. Altavoz – Oyente 2

En nuestro caso, el locutor va a ser la Sound Source type 4224 (Brüel & Kjaer) y los oyentes 1 y 2, va a ser el micrófono del Kit de la Nexus. El altavoz hace referencia a los propios altavoces de que dispone la sala, que son los siguientes:



A continuación se muestra una ilustración de cada una de las combinaciones:



A continuación se muestran los valores característicos de la sala, obtenidos a partir de las medidas anteriores:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C80 [dB] | -2,64 | -2,45 | -2,41 | -1,02 | -0,69 | 0,02 |
| D50 [%] | 63,91 | 52,99 | 57,91 | 64,19 | 56,09 | 51,37 |
| Ts [ms] | 221,66 | 218,54 | 194,06 | 162,80 | 148,78 | 121,47 |
| EDT [s] | 3,39 | 3,29 | 2,77 | 2,56 | 2,44 | 2,02 |

En esta tabla aparecen algunos de los parámetros que caracterizan una sala:

C80 → La claridad musical puede cuantificarse mediante el parámetro C80. Indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Se determina a partir de la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega después de los primeros 80ms, calculada en cada banda de frecuencias entre 125Hz y 4kHz. Los valores recomendados dependen del tipo de música. El valor promedio para frecuencias medias-altas (500Hz, 1kHz y 2kHz) puede aceptarse entre -4 y 8 dB.

D50 → La Definición D50 es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125Hz y 4kHz. Su valor deberá ser siempre $D > 50\%$; Cuanto más elevado sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad.

EDT → El Tiempo de Reverberación (RT) lo determinaremos a partir del Primer Tiempo de Descenso (EDT) que es más subjetivo y mayoritariamente utilizado por expertos acústicos, dada su mejor correlación con la impresión subjetiva de viveza. Se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

Ts → Tiempo central o centro de gravedad de la curva de caída:

- $T_s > 80$ → es negativo el efecto sobre la claridad.
- $T_s < 80$ → es positivo el efecto sobre la claridad.

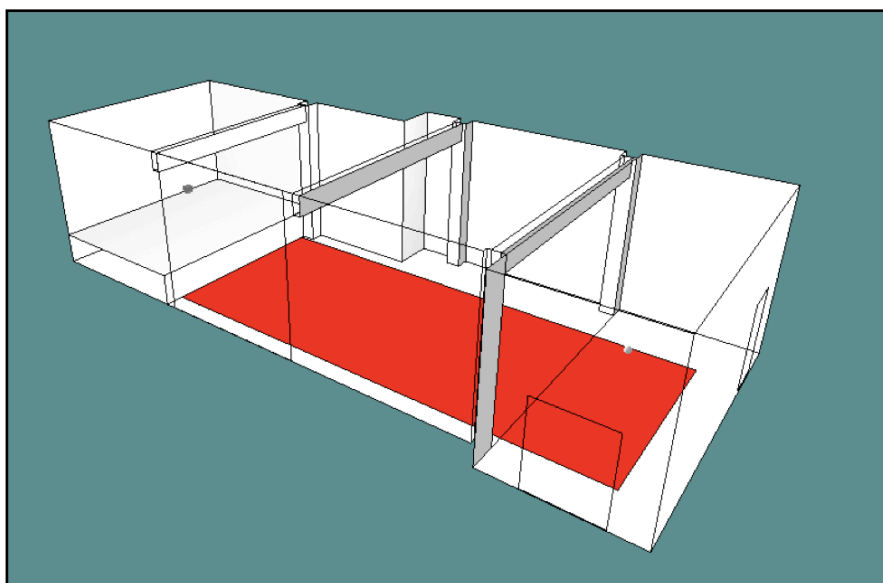
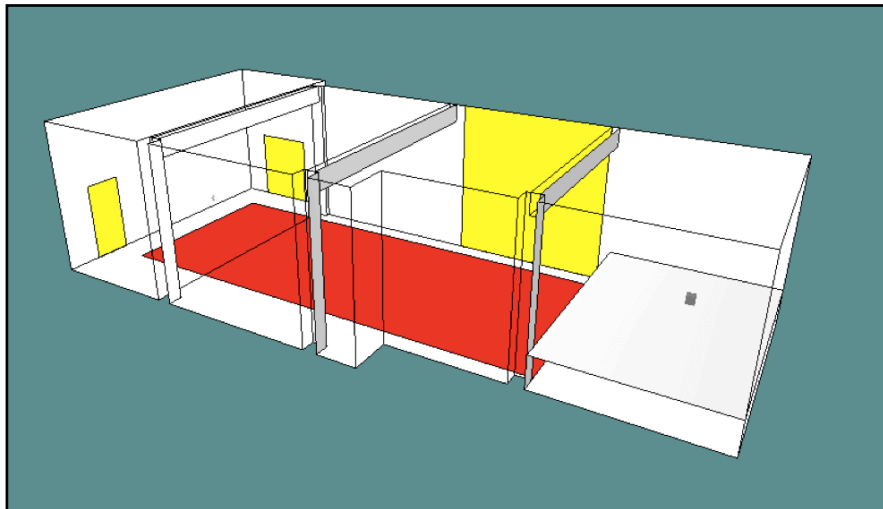
SIMULACIÓN

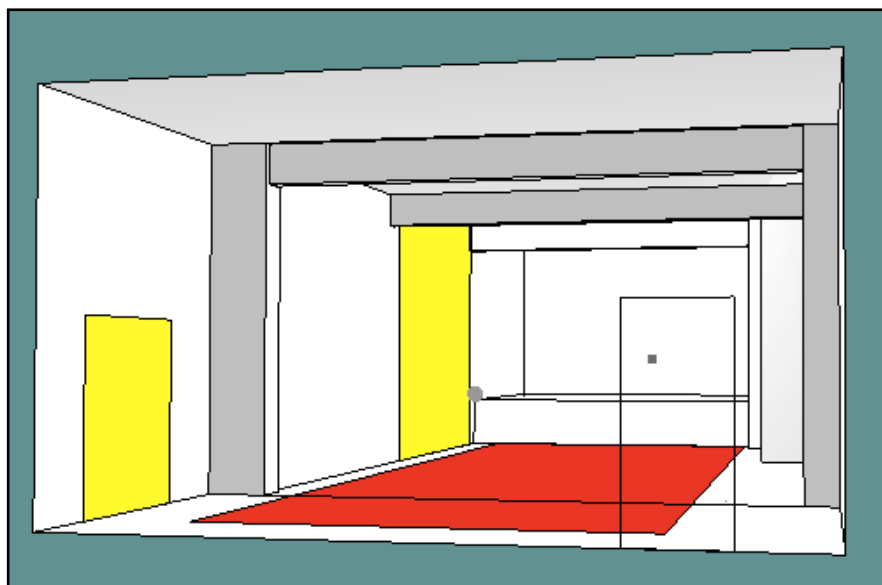
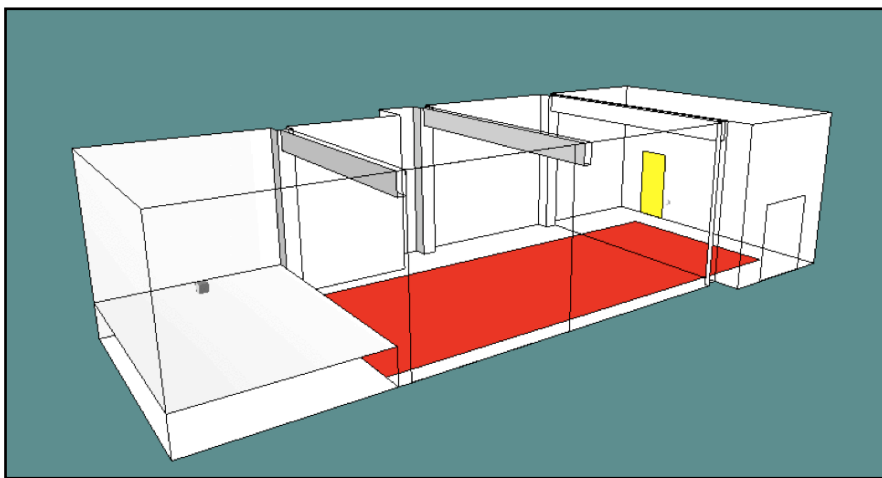
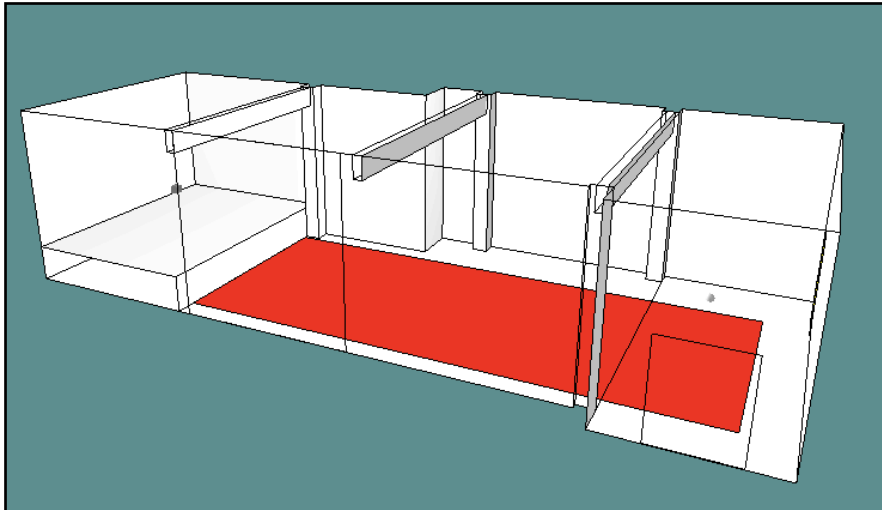
La simulación se va a realizar con el programa CATT-Acoustic:

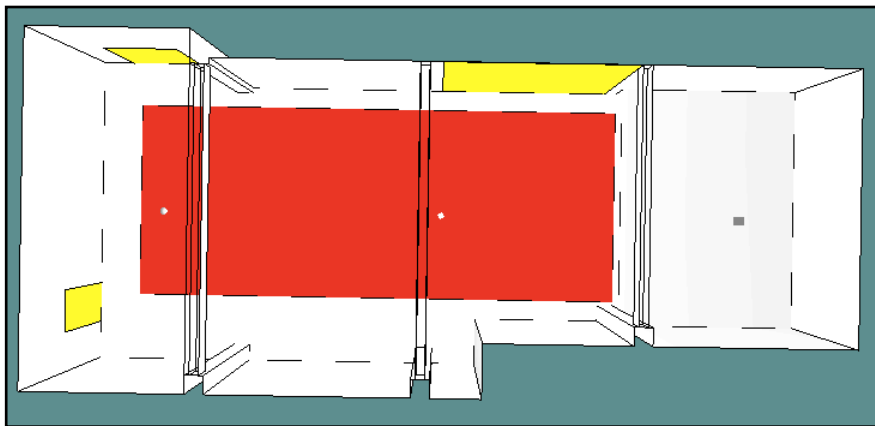
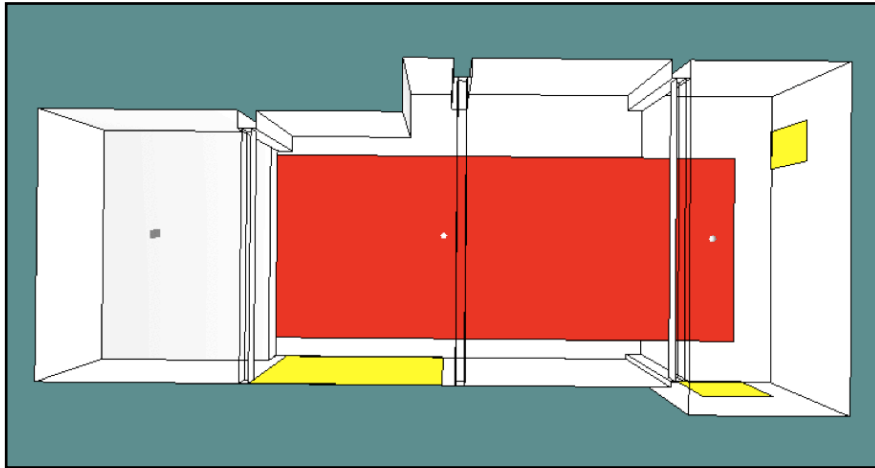
El programa **CATT acoustic** es un simulador acústico que permite el diseño de salas (pueden ser importadas de CAD) y su posterior análisis. Permite estudiar virtualmente el comportamiento acústico de la sala a futuro, antes de construirla. Permite reproducir sonidos en la sala y ver el comportamiento de los mismos en la pantalla.

Se va a seguir los siguientes pasos:

DISEÑO → Primero de todo se diseña la sala:







Una vez está diseñada la sala, se realizan las distintas simulaciones:

A) Simulación del tiempo de reverberación con la sala vacía:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Tr [s] | 2,97 | 2,90 | 2,78 | 2,52 | 2,41 | 2,14 |

B) Simulación del tiempo de reverberación con la sala llena:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Tr [s] | 2,37 | 1,98 | 1,70 | 1,36 | 1,27 | 1,04 |

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se van a analizar los resultados obtenidos en los apartados de Mediciones del recinto y Simulación.

MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Primero de todo vamos a ver el tiempo de reverberación óptimo que queremos tener en nuestra sala, para ello se dispone de un tabla que aparece en el libro (Diseño acústico de espacios arquitectónicos, autor: Antoni Carrión Isbert), que es la siguiente:

| TIPO DE SALA | RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s) |
|---|----------------------------------|
| Sala de conferencias | 0,7 – 1,0 |
| Cine | 1,0 – 1,2 |
| Sala polivalente | 1,2 – 1,5 |
| Teatro de ópera | 1,2 – 1,5 |
| Sala de conciertos (música de cámara) | 1,3 – 1,7 |
| Sala de conciertos (música sinfónica) | 1,8 – 2,0 |
| Iglesia/catedral (órgano y canto coral) | 2,0 – 3,0 |
| Locutorio de radio | 0,2 – 0,4 |

Como podemos ver en la tabla, los tiempos de reverberación que aparecen son referidos a salas llenas de personas o salas ocupadas. En nuestro caso como la sala se va a utilizar para diferentes actos, se coge como referencia la **Sala polivalente → 1,2 – 1,5 s**

Las mediciones que se han hecho del tiempo de reverberación, han sido tomadas con la sala vacía, para ello se realiza lo siguiente:

1. Primero de todo, comparamos los valores obtenidos del sonómetro con los valores obtenidos en la simulación (con la sala vacía), esto se realiza para afianzar la simulación y efectivamente nos damos cuenta que son muy similares:

Esta tabla muestra los valores del tiempo de reverberación de la sala vacía, obtenidos con el **sonómetro**:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|-----|------|-----|------|------|------|
| Tr [s] | 3 | 2,92 | 2,7 | 2,54 | 2,42 | 2,18 |

Esta tabla muestra los valores del tiempo de reverberación de la sala vacía, obtenidos con el **CATT-Acoustic (T-30)**:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Tr [s] | 2,97 | 2,90 | 2,78 | 2,52 | 2,41 | 2,14 |

Una vez se ha demostrado que los valores obtenidos en ambos casos son muy parecidos, podemos pasar al siguiente paso.

2. A continuación se obtienen los valores del tiempo de reverberación de la sala llena, con el **CATT-Acoustic (T-30)**:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|------|------|-------------|------|------|------|
| Tr [s] | 2,37 | 1,98 | 1,70 | 1,36 | 1,27 | 1,04 |

3. Si nos fijamos en la frecuencia de 500 Hz (1,70 s), nos damos cuenta que incluso con la sala llena de gente, el tiempo de reverberación es superior al tiempo óptimo que nos muestra la tabla (**Sala polivalente → 1,2 – 1,5 s**). Cogemos 1,2 s como referencia, de esta forma si la sala no se llenara al completo, aun estaríamos dentro de los tiempos recomendados.

Para conseguir el tiempo de reverberación óptimo, se va a necesitar añadir material absorbente, para reducir el tiempo de reverberación. En nuestro caso se va a utilizar **Lana de roca**:

Definición → La lana de roca, pertenece a la familia de las lanas minerales, es un material fabricado a partir de la roca volcánica. Se utiliza principalmente como aislamiento térmico y como protección pasiva contra el fuego en la edificación, debido a su estructura fibrosa multidireccional, que le permite albergar aire relativamente inmóvil en su interior.

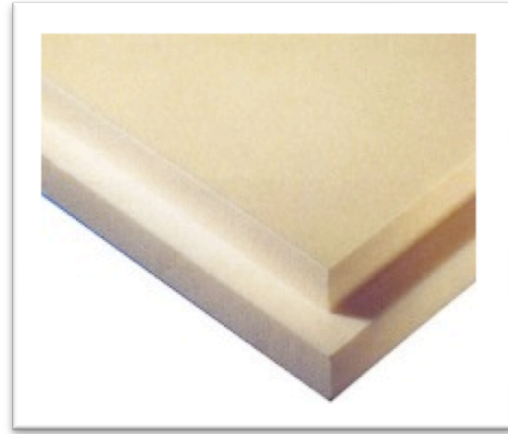
História → La lana de roca es un producto natural descubierto por primera vez en Hawái a principios del siglo XX, fruto de la acción natural de los volcanes. A raíz de este descubrimiento, se da con la manera de fabricar este material de manera artificial. En el año 1937 la empresa Rockwool, 1 comienza su producción en Hedehusene, Dinamarca.

Fabricación → El proceso de fabricación de la lana de roca pretende emular la acción natural de un volcán. La roca basáltica (diabasa) es fundida a más de 1600 °C en un horno (cubilote) para así retornarla a su estado inicial de lava. La lava es vertida en unas ruedas que giran a gran velocidad, y se transforma en fibras debido al efecto de la fuerza centrífuga. Tras la pulverización de un ligante orgánico, se reúnen las fibras para formar un colchón de lana primaria. Después de haber sido más o menos comprimido, dependiendo de las prestaciones buscadas, ese colchón pasa a la última fase de curado donde el producto adopta su forma final.

La composición de la lana de roca fruto de este proceso es aproximadamente de 98% roca volcánica y 2% ligante orgánico.

Comportamiento acústico → Debido a su estructura multidireccional y elástica, la lana de roca frena el movimiento de las partículas de aire y disipa la energía sonora, empleándose como acondicionador acústico para evitar reverberaciones y ecos excesivos. Asimismo se emplea como absorbente acústico en sistemas "masa-muelle-masa".

Al ser un material muy utilizado para el acondicionamiento acústico de salas la relación calidad-precio es muy buena. A continuación se muestran las características técnicas del material:



■ Datos Técnicos

| DATOS TÉCNICOS | VALOR | UNIDAD | NORMA |
|--|-------------------|--------------------|----------------------|
| Aislamiento acústico entre tabiques hueco doble | 46 | dBa | EN 140-3 EN 717 |
| Tolerancia espesor | -5 / +15 | mm | EN 823 |
| Planimetría | 6 | mm | EN 824 |
| Rectangularidad | 5 | mm/m | EN 825 |
| Tolerancia Longitud | ± 2 | % | EN 822 |
| Tolerancia Anchura | ± 1.5 | % | EN 822 |
| Estabilidad dimensional de temperatura y humedad (espesor, longitud y anchura) | ≤ 1 | % | EN 1604 |
| Densidad | 30 | Kg/m ³ | EN 845 |
| Reacción al fuego del producto | A1 | Euroclase | EN 13501-1 |
| Conductividad térmica | 0.037 | w/mK | EN 12667 EN 12939 |
| Resistencia térmica | 1.35 | m ² K/w | EN 12667 EN 12939 |
| Coefficiente de absorción acústica | 0.65 | - | EN 20354 |
| Código designación CE | MW-EN 13162-T2-WS | - | - |

■ Datos Técnicos Adicionales

Facilitamos los coeficientes de absorción del material en 40 mm de espesor.

| Frecuencia Hz | a _s |
|----------------|----------------|
| 125 | 0.15 |
| 250 | 0.40 |
| 500 | 0.75 |
| 1000 | 0.90 |
| 2000 | 0.90 |
| 4000 | 0.90 |
| NRC | 0.75 |
| a _w | 0.65 |

Se va a utilizar el coeficiente de absorción a 500Hz.

Una vez se tienen los valores técnicos de la Lana de Roca, se realizan los cálculos siguientes para saber la cantidad óptima de Lana de Roca, que se tiene que añadir a la sala para reducir el tiempo de reverberación, y de esta forma conseguir el tiempo de reverberación deseado:

$$Tr = \frac{0,162 \cdot V}{A_{tot}} = \frac{0,162 \cdot V}{S_{tot} \cdot \bar{\alpha}}$$

$$A_{tot} = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n$$

$$S_{tot} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_{tot}}$$

Utilizaremos la formula de **Sabine**, porque el coeficiente de absorción ($\bar{\alpha}$) es menor de 0,2

$$\bar{\alpha} < 0,2$$

- A_{tot} → absorción total del recinto
- V → volumen del recinto (m³)
- S_{tot} → Superficie total del recinto (paredes+techo+suelo)
- $\bar{\alpha}$ → coeficiente medio de absorción

-Absorción total del recinto (A_{tot}):

$$1,70 = \frac{0,162 \cdot 484,0344}{A_{tot}} \rightarrow \text{despejamos} \rightarrow A_{tot} = \frac{0,162 \cdot 484,0344}{1,70} = 46,1256$$

Absorción total (A_{tot}) = 46,1256

-Superficie total del recinto (S_{tot}):

$$\text{Suelo} = 116,335 \text{ m}^2$$

$$\text{Techo} = 116,335 \text{ m}^2$$

$$\text{Paredes} = 203,63394 \text{ m}^2$$

Superficie total (S_{tot}) = 436,30394 m²

-Coeficiente medio de absorción ($\bar{\alpha}$) :

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_{tot}} = \frac{46,1256}{436,30394} = 0,1057$$

Coeficiente medio de absorción ($\bar{\alpha}$) = 0,1057

A partir de la siguiente formula, se obtiene la superficie de lana de roca óptima para reducir el tiempo de reverberación al tiempo deseado:

$$Tr = \frac{0,162 \cdot V}{(S_{tot} - S_{lana}) \cdot \bar{\alpha} + S_{lana} \cdot \alpha_{lana}}$$

- S_{lana} → Superficie de lana de roca
- α_{lana} → Coeficiente de absorción de la lana de roca a 500Hz

$$Tr = \frac{0,162 \cdot V}{(S_{tot} - S_{lana}) \cdot \bar{\alpha} + S_{lana} \cdot \alpha_{lana}} \rightarrow 1,2 = \frac{0,162 \cdot 484,0344}{(436,30394 - S_{lana}) \cdot 0,1057 + S_{lana} \cdot 0,75}$$

despejamos $S_{lana} \rightarrow S_{lana} = 29,8422m^2$

Superficie de lana de roca necesaria (S_{lana}) = 29,8422m²

El lugar mas apropiado para instalar esta superficie de lana de roca, sería al final de la sala, para evitar posibles ecos y reflexiones innecesarias. Pero como la pared del final no es suficientemente grande para abarcar toda la superficie de lana de roca, el resto se colocaría en el techo, ya que es un lugar donde no molesta y hace su función correctamente.

MEDICIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE LA SALA Y VALORES CARACTERÍSTICOS DE ESTA

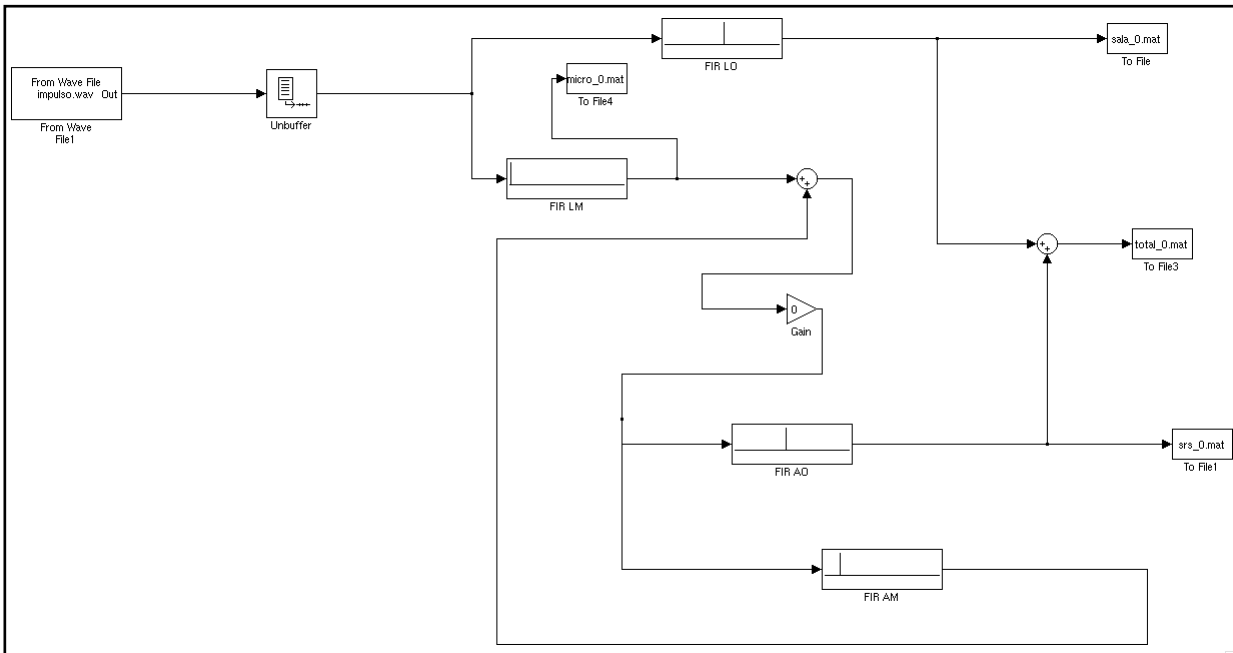
A partir de las mediciones que se han realizado, y con la ayuda del programa Adobe Audition (**Adobe Audition (anteriormente Cool Edit Pro) es una aplicación en forma de estudio de sonido destinado para la edición de audio digital de Adobe Systems Incorporated que permite tanto un entorno de edición mezclado de ondas multipista no-destructivo como uno destructivo, por lo que se lo ha referido como el "cuchillo suizo multiuso" del audio digital por su versatilidad**) se han obtenido 6 respuestas al impulso de la sala:

1. Locutor – Micrófono
2. Locutor – Oyente 1
3. Locutor – Oyente 2
4. Altavoz – Micrófono
5. Altavoz – Oyente 1
6. Altavoz – Oyente 2

De estas 6 se utilizan solo 5. Un exalumno de la E.P.S.G. ha realizado como proyecto final de carrera un programa que trabaja sobre MATLAB, este programa se encarga de cargar las distintas respuestas al impulso de la sala y a partir de una respuesta al impulso cualquiera a la entrada obtener:

- La respuesta al impulso solo filtrada por el filtro Locutor-oyente → **sala_0.mat**
- La respuesta al impulso filtrada por Locutor-micro, se le aplica una ganancia, filtrada por el filtro Altavoz-micro y finalmente filtrada por el filtro Altavoz-oyente → **srs_0.mat**
- Por último tenemos la respuesta al impulso total, que pasa por todos los filtros y se le aplica una ganancia → **total_0.mat**

A continuación se muestra un esquema para mejor entendimiento:



Este programa puede ser muy útil si se quiere saber como responderá la sala, en función de lo que vayamos a emitir. También podremos ver la ganancia máxima que podemos tener evitando la realimentación.

A continuación vamos a comprobar si los valores característicos de la sala están dentro de los exigidos:

| Freq [Hz] | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C80 [dB] | -2,64 | -2,45 | -2,41 | -1,02 | -0,69 | 0,02 |
| D50 [%] | 63,91 | 52,99 | 57,91 | 64,19 | 56,09 | 51,37 |
| Ts [ms] | 221,66 | 218,54 | 194,06 | 162,80 | 148,78 | 121,47 |

| Parámetro acústico | Valor recomendado | Resultado |
|--------------------|--|--|
| C80 [dB] | entre -4 y 8 dB | Si cumple |
| D50 [%] | D>50% | Si cumple |
| Ts [ms] | Ts > 80 → Es negativo el efecto sobre la claridad. Ts < 80 → Es positivo el efecto sobre la claridad. | Es negativo el efecto sobre la claridad. |

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que se ha solucionado el principal problema de la sala, el tiempo de reverberación. Pero para este problema existen múltiples formas de solucionarlo, dependiendo del material absorbente que vayamos a colocar a la sala. Ya que cada material absorbente tiene sus propias características y su propio coeficiente de absorción por frecuencias.

Si se hubiera escogido un material absorbente con un coeficiente de absorción mayor al que se ha elegido en este caso, no hubiera hecho falta añadir tanto material, pero el precio de material hubiera sido más caro. Por eso a la hora de elegir el material más adecuado, tenemos que ver del espacio que disponemos en la sala y del presupuesto; y con estas dos cosas adaptar la solución más óptima para la sala en concreto.

En cuanto a la simulación, existen muchos programas de diseño y simulación de salas acústicas. En este caso se ha elegido principalmente el CATT-Acoustic porque es el que hemos estudiado en la Universidad, es un programa muy potente con muchas posibilidades y las simulaciones son muy completas.

Como podemos ver, los valores obtenidos de la simulación del tiempo de reverberación con la sala vacía, son muy similares de los obtenidos con el sonómetro, estos valores nunca podrán ser iguales, porque el coeficiente de absorción que utiliza el CATT-Acoustic para los materiales que hay en la sala (paredes, puertas, gente), nunca va a ser igual que el que tenemos en la realidad, pero si podemos hacer una aproximación lo suficientemente buena para trabajar con ella.

Si nos fijamos en los parámetros característicos de la sala que hemos obtenido, tanto la claridad (C80) y la definición (D50), están dentro de los márgenes recomendados, pero si nos fijamos en el tiempo central o centro de gravedad de la curva de caída, vemos que los valores que hemos obtenido nos perjudica la claridad, por otra parte la claridad sigue estando dentro de los valores recomendados, por ello este problema no es significativo.

Sería muy recomendable, una vez realizado la instalación del material absorbente en la sala, volver a realizar las pertinentes mediciones, para confirmar que todos los parámetros siguen cumpliendo las recomendaciones y el tiempo de reverberación es el esperado.

ANEXO I

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- [1] Carrión Isbert, Antoni “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”
- [2] Recuero López, Manuel “Acondicionamiento acústico”

Artículos en revistas:

- [1] La revista del club instaladores Climaver (Julio 2006) N°20

