

**LABORATORIO DE MEDICIÓN E INVESTIGACIÓN DE SONIDO PARA
DEPARTAMENTO DE MÚSICA Y SONOLOGÍA DE LA FACULTAD DE ARTE DE LA
UNIVERSIDAD DE CHILE ®.**

CONTENIDO

- 1. Procesos de diseño: Nuevos paradigmas.**
- 2. Sonido en términos de comportamiento físico/experiencial en el proyecto arquitectónico.**
- 3. Sonido: fenómeno físico.**
- 4. Cuestionamiento: introducción de variantes sonoras en el proyecto arquitectónico.**
- 5. Proposición de tema de trabajo: *Laboratorio de medición e investigación de sonido para departamento de música y sonología de la facultad de arte de la universidad de chile ®.***
- 6. Situación presente en arte centro: Carencias programáticas y relacionales en la estructura física.**
- 7. El usuario: ocupante en tránsito.**
- 8. Posición física territorial y su incidencia en la configuración del proyecto. (Elección e incidencia.)**
- 9. Partido general versus proceso: etapas de desarrollo en términos de devenir.**
- 10. Bibliografía**
- 11. Anexos**

- 1. Procesos de diseño: Nuevos paradigmas.**

“Las propuestas mas experimentales parecen confirmar que con el proceso informático, el concepto de autoría en la arquitectura no solo no desaparece sino que se amplía. Los arquitectos todavía diseñan y deciden, pero de otra forma. La modernidad se eleva a la enésima potencia. Sería como desplazar el diseño de arquitectura hacia la comunicación con los clientes, las condiciones de los lugares y los contextos, las condiciones legales, los flujos de energías, los materiales y las técnicas constructivas, etc. ,todos esos datos que han permanecido mas o menos invisibles al diseño hasta ahora. ¿Qué quiere decir todo esto?”¹.

El trabajo de diseño como medio por el que devienen los requerimientos y soluciones que plantea el encargo arquitectónico, reduciendo, lo mas posible, la etapa de traducción de información (o de corte), y transformarla en una reacomodación de información dentro de un aparato dinámico arquitectónico, más que a un objeto estático arquitectónico.

Utilizar el diagrama como herramienta de proyección, siendo esta la más adaptada al presente momento de la disciplina arquitectónica. Diagrama como estructura grafica de pensamiento ligada a un procedimiento o modo.

El proyecto necesita estar muy definido y controlado, al mismo tiempo que debe permitir asumir modificaciones sustanciales en el transcurso de su desarrollo. Ser ambiguo y concreto, voluble y firme. Los periodos de desarrollo o maduración se acaban abruptamente, si es necesario, en cualquier momento los esquemas se convierten en estados finales.

Los conocimientos deben ser generados y ordenados en cada nuevo proyecto. La experiencia siendo aprendida por itinerarios de trabajo, deviniendo el proyecto como el enlace instantáneo y prolongado del conocimiento y el material acumulado. Generación de documentos de código abierto permitiendo así que cualquier factor actuante lo modifique. Adaptarlos a sus propios lenguajes, especificaciones y usos. Es necesario preservar los datos básicos permanentes de las decisiones formales variables.

Permitir, de esta forma, que los componentes intangibles del proyecto participen en la producción de la forma final, no imponiendo una forma conceptual (cerebral) sobre una materia inerte.

Según lo anterior lo que motiva este proyecto de título es el interés, desarrollado durante años de aprendizaje, por la exploración de formas de investigación en función de los procesos de diseño que determinen el proyecto como “estados finales” de procesos de trabajo con voluntad de apertura, mas que la búsqueda de la manifestación física definitiva de un edificio.

Entendiendo que no existen proyecto definitivos en tanto el proyecto se ve inscrito en un tiempo y espacio físico, cultural, social, económico, político etc. que lo modificará permanentemente tanto en etapa de desarrollo como posterior a su construcción, se hace necesario, ya no ver y tratar al proyecto arquitectónico como un objeto estático si no comprender que éste es un artefacto dinámico.

2. Sonido en términos de comportamiento físico/experiencial en el proyecto arquitectónico.

“En Chile no se a logrado una conciencia publica de los efectos acústicos en el individuo. Somos nosotros los encargados de realizar el esfuerzo de hacer comprender al público, a los industriales, a los otros profesionales, la importancia y significación que tiene la acústica en sus múltiples actividades.

Parte importante de esta tarea será la cuantificación de los fenómenos acústicos, para ello será necesario recurrir a un grupo especializado con equipo de mediciones y análisis de sonidos.

¹ “Verb architecture boogazine” ed actar, 2001 Pág. 130

Esto cumplirá sus funciones, siempre y cuando, exista la participación de personas que investiguen y estén en contacto permanente con los problemas que día a día aparecen con el avance de la técnica.

El grado tecnológico que nos permite alcanzar la universidad como formación de arquitectos, no nos capacita para dar soluciones a los problemas prácticos de la acústica. Esto es notorio a través de múltiples problemas que a menudo pueden observarse en variados tipos de construcciones.

Ha llegado el momento en que el arquitecto tiene la obligación de resolver el conjunto de su proyecto, sin omitir estos aspectos tan abandonados.”²

Es conocida la importancia que posee el sonido como participante en la conformación de la experiencia en el espacio arquitectónico, pero es evidente que existe una preponderancia de lo visual, como factor manejado cuando hablamos de diseño. Prueba de esto es la cantidad de importación visual que ocupa el diseño arquitectónico para documentar sus obras, dejando poco espacio para formas de representación y de proyecto más relacionadas con lo háptico en relación a la experiencia empírica (*“háptico es mejor termino que táctil, puesto que no opone dos órganos de los sentidos, sino que deja entrever que el propio ojo puede tener una función que no es óptica”³*).

Desde esta comprensión se pretende explorar el poco manejado ámbito de el sonido dentro de el aparato arquitectónico, pero no por su inexistencia en este, sino mas bien por su poca participación en los procesos de diseño.

Será necesario estudiar los fenómenos vinculados con una propagación adecuada, fiel y funcional del sonido en un recinto, dependiendo de las características programáticas y espaciales_experienciales que posea. Esto involucra los temas, tanto del acondicionamiento acústico, como del aislamiento acústico.

3. Sonido: fenómeno físico.

Se entiende por sonido a una alteración física en un medio se originada por las vibraciones de un cuerpo sonoro. El sonido consiste en fluctuaciones de presión muy pequeñas que se propagan a una velocidad de variable que depende del medio por el que se manifieste. Se produce por una sucesión de altos y bajos niveles de presión en un punto dado del espacio. Cuando se habla de que un sonido tiene una frecuencia de 440 ciclos/seg, quiere decir que la presión del aire oscila 440 veces por un segundo.

La unidad de medida es el Hertz (Hz) y equivale a un ciclo por segundo. En este caso se dirá que la frecuencia es de 440 Hz. Al desplazarse el sonido, no existe desplazamiento de aire, sino oscilación de las moléculas atmosféricas, transmitiendo esto de una a la otra hasta llegar al oído, donde una serie de presiones y depresiones hace oscilar el tímpano al mismo ritmo y produce la sensación sonora. El oído percibe las variaciones de presión en forma de sonido cuando su periodicidad está entre las 20 a 20.000 variaciones por segundo (de 16 y 16.000 según otras teorías); es decir, cuando su frecuencia está entre 20 a 20.000 Hz (o 16 y 16.000 Hz).

El espectro de los sonidos se divide en:

² Leonardo Parma “antecedentes para el desarrollo de un laboratorio de acústica arquitectónica” Instituto de edificación experimental, Escuela de Arquitectura, Universidad de Chile, 1970. Pág. 2

³ Gilles Deleuze, Félix Guattari, “Mil Mesetas; capitalismo y esquizofrenia.” Ed. Pretextos, 1997.Pág. 499.

- INFRASONIDOS (menos de 20 Hz)
- AUDICION HUMANA (de 20 a 20.000 Hz)
- ULTRASONIDOS (más de 20.000 Hz)

Por otro lado, la banda de frecuencias audibles se descompone generalmente en tres regiones: frecuencias graves, medias y agudas.

Para estas perturbaciones se puedan propagar a través de un medio es necesario que el mismo tenga inercia y elasticidad, ya que si no es así la propagación de las ondas sonoras no es posible, es decir las ondas sonoras no se propagan a través de el vacío. La inercia es la propiedad que permite a un elemento del medio transferir la perturbación a otro adyacente, esto tiene una relación con la densidad del medio, es decir la masa de un elemento. La elasticidad es la propiedad que produce una fuerza sobre un elemento desplazado de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a su posición.

La propagación o transmisión se efectúa mediante ondas longitudinales; de esta forma la materia no sufre desplazamientos, pero las partículas vibran según la dirección de la onda.

Normalmente se entiende como sonido solamente el que se propaga en gases, especialmente en el aire. Evidentemente, también es posible la propagación de sonidos en los líquidos y en los sólidos.

Como la propagación en gases y en líquidos obedece a las mismas leyes físicas, se pueden estudiar conjuntamente, y luego, por separado, la propagación en sólidos.

a) En gases y líquidos

Aquí, la propagación del sonido no puede ser objeto de tensiones transversales, y las ondas sonoras son ondas de densidad con movimiento longitudinal. Esta propagación se puede caracterizar con dos magnitudes: la presión sonora, p (contracciones y dilataciones de volumen: variación de densidad), y la velocidad del sonido, c (movimiento).

Estas ondas longitudinales se propagan fundamentalmente de dos formas:

- Ondas planas progresivas (pistón indeformable).
- Ondas esféricas (esfera radiante).

b) En sólidos

En este caso, además de las ondas longitudinales, el sonido también se puede propagar mediante ondas transversales.

La propagación mediante unos tipos u otros de ondas depende, en parte, de la geometría del cuerpo sólido considerado.

Existen varios tipos de ondas según tengan componente longitudinal, transversal o ambos.

—Longitudinales: Ondas de densidad.

—Transversales: Ondas transversales y ondas de torsión.

—Longitudinales-transversales: Ondas de alargamiento, ondas superficiales o de Rayleigh y ondas de flexión.

Las más importantes desde el punto de vista de aislamiento acústico son las ondas de flexión. La particularidad de este tipo de ondas es que su velocidad de propagación c , al contrario que en los otros tipos de ondas, no es constante, sino que es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. Con este tipo de ondas, se produce una dispersión espacio temporal de las diversas longitudes de onda a su paso por el sólido; es decir, que en la propagación de un impulso con un amplio espectro de frecuencias llegan primero las altas frecuencias a un punto alejado del sólido.

La propagación del sonido no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación; es decir, la presión o la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco sonoro.

Para esta amortiguación existen diferentes causas que dependen de las características del medio físico y de la frecuencia del sonido.

Amortiguación «clásica», que incluye:

- Efecto de roce interno de las partículas excitadas por la vibración, condicionado a la viscosidad del medio.
- Efecto de la transmisión del calor generado por el roce de las partículas, dependiente de los coeficientes de transmisión.

Amortiguación por relajación molecular térmica, debido a las necesidades de energía para el retorno a la posición de equilibrio de las partículas excitadas por las vibraciones. Esta amortiguación es complementaria a la «clásica».

Por ser el aire el medio de propagación habitual, digamos que la amortiguación en dicho medio depende de la frecuencia del sonido considerado, de la humedad relativa y de la temperatura. Los sonidos de alta frecuencia son amortiguados en mayor medida que los de baja frecuencia. Por otra parte, la humedad relativa influye de manera importante en la amortiguación. El máximo de amortiguación se obtiene para un aire muy seco.

También como se ha indicado, influye la temperatura en la amortiguación, disminuyendo ésta al aumentar la temperatura para cualquier grado de humedad (especialmente a partir de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para arriba).

Las habitaciones o salas dedicadas a una aplicación determinada (por ejemplo para la grabación de música, para conferencias, para conciertos o complejos completos como hospitales, edificios de vivienda o equipamiento público de cualquier índole) deben tener cualidades acústicas adecuadas para dicha aplicación. Por cualidades acústicas de un recinto entenderemos una serie de propiedades relacionadas con el comportamiento del sonido en el recinto, entre las cuales se encuentran las reflexiones tempranas, la reverberación, la existencia o no de ecos y resonancias, la cobertura sonora de las fuentes, etc.

En un recinto o local cerrado, las ondas emitidas por una fuente determinada chocan con las superficies que limitan el local, dando origen a ondas reflejadas, las cuales a su vez se reflejan nuevamente, repitiéndose el fenómeno multitud de veces.

La presión acústica que existe en un punto determinado del recinto, después de haberse producido varias reflexiones del sonido, es la resultante de las presiones de las ondas emitidas en distintos momentos y que en el instante de la observación se cruzan en el punto considerado. Dicho de otro modo, la presión en dicho punto es el resultado de la presión del campo directo (ondas que se han propagado desde la fuente sin chocar) y del campo reverberado (ondas que han chocado una o varias veces contra las superficies que limitan el local)⁴,

¿Qué consecuencias tiene esto para las condiciones acústicas del recinto? Las resonancias se ponen de manifiesto cuando aparece un sonido de igual o similar frecuencia.

Por ejemplo, si un bajo ejecuta esta nota, la acústica de la habitación parecerá amplificar dicho sonido, en desmedro de los otros sonidos. A esto se agrega que para las frecuencias de resonancia el tiempo de reverberación es mucho más prolongado, por lo cual dicha nota se prolongará más que las otras. Esto se considera un defecto acústico importante. Entre las posibles soluciones, están:

- a) evitar las superficies paralelas, que favorecen las resonancias,
- b) agregar absorción acústica que reduzca el tiempo de reverberación,

⁴ Ver anexo de conceptos

c) ecualizar el sistema de sonido de modo de atenuar las frecuencias próximas a la resonancia o resaltar las otras frecuencias.

Las resonancias rellenan el espectro musical, lo cual favorece el canto solista, es decir las melodías sencillas y no demasiado rápidas. Por ese motivo resulta agradable cantar en el baño (especialmente para la voz masculina). Es un ambiente pequeño, y por lo tanto con resonancias notorias. Sin embargo, desde el punto de vista de la escucha de la música, no resulta tan agradable, porque distorsiona lo que se quiere escuchar.

Otra consecuencia de las resonancias es que la difusión del sonido no es satisfactoria, es decir que la distribución espacial del mismo no es uniforme: en algunos puntos el nivel sonoro es mucho mayor que en otros, siendo la diferencia mayor que la atribuible al campo directo.

A medida que crece el tamaño de una habitación, las resonancias tienden a estar cada vez más próximas entre sí, y se transforman en reverberación, mejorando también la difusión. Lo mismo sucede cuando la forma de la sala es irregular.

En el diseño de pequeñas salas o estudios de grabación o ensayo es primordial prestar atención a los problemas de difusión y de resonancias. Las siguientes son algunas recomendaciones:

- 1) Evitar las simetrías. Si la habitación tiene forma rectangular, las aristas deberían ser todas de diferente longitud (la forma cúbica de algunas habitaciones es particularmente deficiente desde el punto de vista acústico).
- 2) Si es posible, evitar los paralelismos. Esto puede lograrse inclinando una o dos paredes, e inclusive el cielorraso.
- 3) En casos severos, recubrir con material absorbente una de cada par de paredes paralelas.

Al diseñar una sala apropiada para la buena audición, interpretación o grabación de sonidos que van desde la voz hasta un espectáculo que incluya música (salas de grabación, salas de concierto, opera, cine, teatros o salas de conferencia etc.), se debe tratar que la curva característica de transmisión de frecuencia sea lo mas plana posible. La curva característica de transmisión se hace plana mientras:

- mayor es el numero de modos normales de vibración excitadas en el rango de frecuencia de interés.
- mas uniforme sea la distribución de los modos normales de vibración en el espectro de frecuencia.
- mas iguales sean las intensidades de excitación de los modos normales de vibración.

De esta forma se relaciona el número de modos normales en vibración con la frecuencia y el volumen del local (todo esto remitiéndonos a la teoría de Bolt)

Con lo anterior se entiende una cantidad importante de condicionantes en el momento de tratar el fenómeno de el sonido en el proyecto arquitectónico, cualquiera que este sea, ocupando esto tanto para llegar a situaciones de confort acústico adecuados para el edificio, como también emplear el mismo sonido como cualificador a de los espacios a crear, sin excluir los demás factores que finalmente generan la manifestación de el proyecto.

4. Cuestionamiento: introducción de variantes sonoras en el proyecto arquitectónico.

¿Por qué es más frecuente comenzar a hablar de acústica o de comportamiento sonoro en el diseño arquitectónico, cuando el tema es una sala de conciertos, un conservatorio de música o un teatro? ¿No es también necesario revisar todo tipo de proyección arquitectónica desde su posible respuesta en términos de acústica, comprendiendo la complejidad que supone cualquier tipología?

Existe una gran preocupación por la acústica en la arquitectura de auditorios, palacios de congresos, escuelas de música, escuelas de danza y en todo proyecto importante relacionado con el ruido ambiental. Por el contrario, no encontramos la más mínima preocupación en hoteles, viviendas, restaurantes, iglesias o polideportivos, lo que constituye un grave error ya que limita la funcionalidad del edificio, así como su habitabilidad y experiencia.

Muy eventualmente, en los procesos de diseño, los arquitectos solicitan colaboración de los especialistas acústicos para que supervisen sus proyectos. Si bien, esto implica que muchas veces tengan que modificar el diseño de su proyecto a favor de la acústica, normalmente los arquitectos prefieren que predominen aspectos de diseño sobre los acústicos.

De esta forma, cuando se introduce a un especialista acústico en el proceso de diseño del proyecto, este ya está muy avanzado o prácticamente terminado; entonces hay que empezar a modificar diversos factores que inciden en aspectos arquitectónicos. Si el proyecto ya está adjudicado hay que luchar contra la constructora para modificarlo con las dificultades que esto conlleva. Todo esto por la no inclusión del factor acústico como un condicionante desde el inicio del proceso de diseño.

Pasando por variadas etapas de desarrollo de interés relacionado con el fenómeno del sonido en la arquitectura, ésta finalmente desemboca en la necesidad de generar proyecto en función de los conocimientos adquiridos en términos de aplicación práctica de el sonido en la arquitectura, como herramienta de relación programática, calidad espacial y el logro de el confort acústico en cada recinto y edificio como total.

Y es que si tenemos en cuenta que la Acústica es una ciencia que cada día avanza más, como todos los estudios relacionados con el medio ambiente, calidad de vida, mayor confort en las viviendas, etc., por lo anterior, la Universidad de Chile debe poseer la voluntad de incorporar la Acústica arquitectónica en sus diversos planes de estudio, así como también su planta física debe responder a los requerimientos de lo anterior, para responder a las carencias y necesidades que presenta la actividad, todo esto inscrito en el rol de la universidad de generar docencia, investigación y extensión. De ahí el interés de trabajar un tema análogo a las necesidades antes expuestas.

Desde este punto, y finalmente, el proyecto se plantea indagar en las posibles formas de configuración espacial mediante lo sonoro, explorando, según esta premisa geometrías particulares, características de materiales, ordenamientos estructurales etc., que en definitiva sean herramientas útiles en el momento de generar proyecto.

5. Proposición de tema de trabajo: *Laboratorio de medición e investigación de sonido para departamento de música y sonología de la facultad de arte de la universidad de chile* ®.

El proyecto desde un origen se plantea como sistema de devenir de la información necesaria para la conformación de una solución lo mas acercada a una situación real, de esta forma el proceso de producción de un aparato arquitectónico pasa a tener tanta o mayor importancia que el edificio final que esto significa, en términos de lo valioso que resulta el conocimiento adquirido en el camino de generación de proyecto. Entendiendo este proceso como un sistema abierto, en el que desde el comienzo del proceso de diseño se van añadiendo mas y mas capas de información, desde los factores acústicos que debe solucionar el edificio, hasta las características de el usuario, la condicionantes de el terreno, las respuestas que se deben dar a la facultad de música y sonología en términos de las carencias antes descritas, pasando también a los temas urbanos, estructurales, constructivos y las manifestaciones formales del diseño mismo.

Como respuesta a esto se ha tomado la postura de determinar etapas de proyecto, mas que estados finales, en los que todos son validos pero que evidentemente las versiones mas recientes son más interesantes, por el solo hecho de incluir mayor información de proyecto manifestada en sus cuerpos.

6. Situación presente en arte centro: Carencias programáticas y relacionales en la estructura física.

La primera misión del proyecto es responder a la deficiente planta física y técnica del Departamento de Música y Sonología de la Facultad de Arte de la Universidad de Chile, en tanto esta área adolece de espacios para el desarrollo docente práctico e investigativo que debería caracterizar éste.

Tomando en cuenta además que este departamento se encuentra situado en dependencias de un edificio que no posee las características específicas (a nivel físico y acústico) que requieren este tipo de actividades.

Y la razón es, que para el desarrollo de un laboratorio de medición e investigación, a la vez de responder a necesidades asociadas a estos fines, es de prioridad tener como mínimo las cuatro salas acústicas que lo definen; las salas de grabación, la cámara anecoica, la cámara reverberante y las salas de medición ⁵.

De estas salas, el Departamento de Música y Sonología de la Facultad de Arte solo posee un complejo de grabación e interpretación, conocido como el Centro Tecnológico de la facultad ubicado en los subterráneos del edificio. Si bien se ha elaborado un acondicionamiento que se acerca a las condiciones de confort acústico requerido por este tipo de complejo, la llegada a la situación ideal se ve mermada, o por lo menos reducida, por la misma posición del mismo. Por un lado su ubicación es un factor en contra; justo arriba, en términos de piso, están las salas de ensayo de intérpretes de la carrera de Música, las cuales producen una serie de perturbaciones sonoras al normal desarrollo de las actividades que se realizan en el centro tecnológico, el cual se debe encontrar en condiciones de aislamiento estrictas en términos acústicos. Por otro lado este programa no posee vías expeditas para el traslado de equipos móviles, así como de instrumentos de interpretación musical de gran dimensión y de los intérpretes (si es que fueran un gran número de ellos).

Ahora, hablando en términos de acústica aplicada al diseño de la sala de interpretación, esta no logra producir las condiciones apropiadas para el desempeño óptimo de la captación de la música que se interpreta, por tres razones; primero esta sala al tener que acondicionarse a un espacio que no está predeterminado para salas

⁵ **CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DE ALGUNOS TIPOS DE SALAS.**

Cámara anecoica.

La función de la cámara anecoica, es simular el espacio libre con un nivel de ruido de fondo extremadamente bajo (tratando de llegar a cero), para medir la potencia acústica efectiva de una fuente sonora, si como también la sensibilidad de transconductores y estimar patrones polares. Así, las superficies límites son tratadas de forma que la intensidad del sonido reflejado se mínimo. Para ello, todas las paredes, cielo y piso, son cubiertos con materiales altamente absorbentes. Para simular esta característica de campo abierto, el coeficiente de absorción, sonoro, medio no debe ser menos que 0.99. Para este tipo de salas, se define como frecuencia de corte (de baja frecuencia), aquella donde el coeficiente de absorción comienza a ser menor de 0.99.

La forma de alcanzar estos altos coeficientes de absorción, es distribuir el material absorbente poroso de manera que no formen superficies planas, ya sea utilizando sistemas de cuñas, pirámides o en otros casos, cubos dispuestos al azar.

También, es importante que el tratamiento interno sea homogéneo para que la absorción sonora sea uniforme.

La dimensión mínima (distancia desde el extremo de una cuña hasta otra situada sobre la pared opuesta), no debe ser menor que la longitud de onda de la superficie de corte.

Cámara reverberante.

Este tipo de cámara se utiliza usualmente para realizar mediciones de los coeficientes de absorción de materiales. La norma ISO/R 354, establece que la sala no tenga un volumen menor que 180 m³ y que las superficies límites sean duras, suaves y no paralelas. De esta forma esta sala posee la propiedad de exacerbar la intensidad y el tiempo de prolongación del fenómeno de la reberverancia. Por otro lado, el material que se investiga debe tener un área de 10 m².

Cámara de medición o aislamiento.

La función de las cámaras de medición es la de testear las propiedades de acondicionamiento acústico de materiales o sistemas constructivos empleados en la formación de recintos, determinando así cual es su coeficiente de transmisión acústico puntual. Este sistema de medición consta de dos cámaras enfrentadas e independientes estructuralmente, en cuyo límite se posiciona el material o sistema constructivo a medir, de esta forma en una cámara se ubica una fuente sonora y en la otra una serie de captadores de sonido, con los cuales identificar la transmisión sonora específica del elemento testeado.

acústicas, sus proporciones no corresponden a las que son necesarias para la estimulación de un amplio espectro de frecuencias sonoras (gráfico de Bolt). Segundo, esta sala se encuentra en una zona de importancia estructural para el edificio, lo cual se traduce en una molestia para las actividades de grabación, al ser posible una transmisión de sonido indeseado por impacto desde los pisos superiores; y por último, en la sala de interpretación, específicamente en el centro del recinto, atraviesan elementos estructurales del edificio de arte centro, produciendo, a parte de la introducción de los sonidos indeseados antes descritos, distorsiones en la recepción de el sonido que se pretende grabar al no presentarse un campo libre entre el interprete y el micrófono de grabación.

Desde el punto de vista de la docencia, investigación y extensión de podría efectuar la facultad de música y sonología, se hace tremendamente nocivo, para esta tarea, no poseer la cámara anecoica (para fines docentes solo existen tres en Chile y ninguna de la Universidad de Chile), la cámara de reverberante y las salas de medición antes mencionadas. Sobre todo poseer estas cámaras representaría un avance en términos de extensión tanto para la Facultad de Música y Sonología, como para a la Universidad, dicho sea, por la próxima reforma a la Ordenanza de Urbanismo y Construcción, específicamente en lo referente a el decreto 47, en el cual se hará obligatorio un aislamiento sonoro específico en las viviendas unifamiliares que se construyan desde la reforma en adelante (la cual corresponde a 45 dB en aislamiento de ruido aéreo y 75 dB por contacto).

Actualmente en Chile, no existe ningún centro que congregate las cámaras básicas de medición sonora y que posea este equipamiento en norma, hablando en términos de estructura física, técnica y administrativa establecido por el Registro Oficial de Laboratorios de Control Técnico de Calidad de Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, lo que nos habla de una importante carencia en esta área de investigación y servicios, y ,finalmente, de una evidente necesidad por parte de la Universidad de crear el primer espacio de estas características para esta área.

7. El usuario: ocupante en tránsito.

El usuario del proyecto es de muy diversa índole y esta determina do por las funciones que se establecen en el complejo. Primero esta el ocupante que proviene de las facultades de arte centro, dentro de los cuales están los estudiantes (de las carreras de música, acústica, electroacústica, danza teatro y artes visuales), los docentes de cada facultad, además del personal administrativo de la Universidad de Chile. Esta cantidad de ocupantes universitarios, son una respuesta a la permanente voluntad de las facultades de arte de generar un intercambio y utilización de las distintas estructuras físicas y tecnológicas de las que disponen, enfocados a la integración de las distintas disciplinas artísticas.

Por otro lado, el laboratorio de medición tendrá dos tipos de usuario: los dependientes del mismo laboratorio encargados de los servicios de medición a usuarios externos (pertenecientes al área de la construcción).

Y por ultimo se encuentran los usuarios de proyectos externos, pertenecientes a otras facultades de la Universidad de Chile, que necesiten asesoría o la ocupación de el programa y la tecnología de el edificio (en áreas de conocimiento que van desde la arquitectura, ingeniería, hasta medicina, entre otras).

De esta forma el *Laboratorio de medición e investigación de sonido para departamento de música y sonología de la facultad de arte de la universidad de chile* ® debería estar en condiciones de albergar entre 200 y 250 usuarios en los momentos de servicio mas intensos, teniendo además conciencia que la característica común de esta diversidad de individuos es su transitoriedad de ocupación en el complejo, entendido éste como un apoyo tecnológico y programático de sus distintas actividades, y no un edificio de permanencia prolongada.

8. Posición física territorial y su incidencia en la configuración del proyecto. (Elección e incidencia.)

La elección del terreno de proyecto tiene directa relación con la dependencia del proyecto con las facultades de arte de la Universidad de Chile, ubicadas en el centro de Santiago. El edificio es en si un proyecto utilitario de estas facultades en tanto presta servicios a cada una de ellas (relación mucho mas fuerte, evidentemente, con la facultad de Música y Sonología), produciéndose una condición satelital del edificio hacia estas casas de docencia, en términos de que este existe solo por la atracción de uso que produce la necesidad de docencia practica, investigación y extensión por parte de la universidad de Chile.

De esta forma tomando en cuenta condicionantes como cercanía de el proyecto a las facultades de arte en términos de distancias abarcables por un peatón, a la vez de encontrar una ubicación con posea factibilidad de ser adquirido por la Universidad en dentro de el centro de Santiago, incluyendo también la posibilidad de emplazarse en una zona de fácil acceso vehicular y peatonal a mayor escala en términos de la ciudad.

Después de lo anterior de determina la ubicación de el proyecto en un solar rectangular de 50mt por 9mt actualmente utilizado como estacionamiento vehicular en

la esquina nororiente de las calles Compañía y Manuel Rodríguez, cuya arista de mayor dimensión enfrenta a esta última calle. De esto se entiende que la ubicación es de exposición directa a la AVDA. PDTE. Jorge Alessandri R. Este punto es conocido como uno de los que poseen mayor contaminación acústica del centro de Santiago, tanto por el flujo vehicular de la avenida Norte-Sur, como por la calle Compañía⁶.

Si bien las características de posición y dimensión del terreno a intervenir son de una complejidad importante para el tipo de proyecto planteado, el fin de esta decisión se ve enmarcado en la necesidad de generar un equilibrio en las condicionantes de gestión, cercanía a las facultades ubicadas en el centro de la comuna de Santiago y de fácil acceso a larga distancia, a la vez que representa una oportunidad de plantear una solución específica de un proyecto en una ubicación que no se establece como una respuesta ideal a éste, si no más bien, nace de situaciones previas a la configuración de el proyecto como tal.

Esto es importante, en tanto con este proyecto de título se pretende generar la solución a un problema real (incluyendo en este caso la ubicación) en vez de producir el escenario ideal para la realización anodina de un edificio. Transformando, de esta forma, la aparente complicación de las condicionantes en una instancia por la cual explorar posibilidades de la disciplina arquitectónica para solucionar problemas arquitectónicos de mayor complejidad a los normalmente planteados.

⁶ La contaminación acústica

El ruido es el contaminante más común, y puede definirse como cualquier sonido que sea calificado por quien lo recibe como algo molesto, indeseado, inoportuno o desagradable. Así, lo que suena como música para una persona, puede ser calificado como ruido por otra. El ruido es una de las agresiones más siniestras de nuestra civilización contemporánea, y sus efectos se van acumulando en el tiempo. El efecto más importante de este tipo de contaminación es la sordera. Hay además otros posibles efectos, los que pueden ir desde alteraciones al ritmo cardíaco hasta estrés.

El efecto que el ruido sobre la salud humana es similar al asociado al miedo y la tensión, con un aumento de pulsaciones, modificación del ritmo respiratorio, tensión muscular, presión arterial, resistencia de la piel, agudeza de visión y vasoconstricción periférica.

Estos efectos no son permanentes, desaparecen al cesar el ruido, aunque se pueden presentar estados de nerviosismo asociado. La pérdida de audición inducida por el ruido es irreversible, por la incapacidad de regeneración de las células ciliares de la audición. La sordera podría aparecer en casos en que se deba soportar niveles de ruido de 90 dB o más en forma sostenida. Además, el ruido puede causar efectos sobre el sistema cardiovascular, con alteraciones del ritmo cardíaco, riesgo coronario, hipertensión arterial, etc.

Los expertos indican que la única solución efectiva al problema del ruido pasaría por incorporar estudios de niveles acústicos en los procesos de planificación urbana, con el fin de crear "islas sonoras" o insonorizar los edificios y construcciones próximos a los puntos de mayor ruido, lo cual involucra costos elevadísimos. Sin duda alguna, la mejor forma de contribuir a aminorar el problema es a través de la educación ambiental, cooperando todos para generar menores niveles de ruido.

Debido a que nuestro oído no responde igual a todas las frecuencias de un ruido, vale decir, que escuchamos mejor ciertos sonidos que otros, dependiendo de su frecuencia, se inventó el decibel A (dBA). Está es otra unidad basada en el decibel que es una aproximación de la percepción auditiva del oído humano y se obtiene mediante la utilización de un filtro incluido en el instrumental de medición, el sonómetro.

Por supuesto que el hombre no es capaz de percibir ni los ultra ni los infra sonidos, siendo el nivel normal para el ser humano los 16 a 30 Hz.

Por otro lado, la unidad que mide la intensidad relativa del sonido (sea audible por el hombre o no) y que te será quizás más familiar, es el

DECIBELIO (dB), siendo el máximo permitido 70 dB (un avión, al despegar, emite una intensidad sonora de 130 dB, aproximadamente).

Por tanto, y usualmente, la contaminación acústica o sónica en las ciudades se encuentra relacionada directamente con la actividad industrial, la construcción y los medios de movilización terrestres y aéreos, resaltando siempre como mayor fuente contaminante, el tráfico vehicular (bocinas).

Se calcula que los vehículos a motor generan el 80% del ruido en una ciudad; el 10% corresponde a las industrias; el 6% a ferrocarriles o trenes urbanos; y el 4% a locales comerciales, de entretenimiento, talleres industriales, etc. Hay zonas especialmente afectadas por estar construidas cerca de vías férreas o aeropuertos. En general, las personas sufren una multiexposición a ruidos ya sea en las calles, o en los hogares y sitios de trabajo, lo cual incide sobre la salud personal dependiendo del tiempo de exposición que se sufre y el grado de sensibilidad que posea cada individuo.

Clases de ruidos

Existen tres tipos de ruidos básicos:

Ruido blanco: esta compuesto por todas las frecuencias audibles a la misma amplitud; es parecido a un Shshshsh, como el que hace el televisor cuando se corta la emisión.

Ruido rosa: esta compuesto sobre todo por frecuencias graves y agudas, medias atenuadas; es similar a un Fsfsfsf.

Ruido marrón: esta compuesto principalmente por ondas graves y medias; es parecido a Jffjffjff.

9. Partido general versus proceso: etapas de desarrollo en términos de devenir.

En este contexto de datos es en la que se sitúa el inicio de la propuesta de laboratorio. De esta forma el proyecto se constituye, en un principio, sobre la base de tres modalidades de manifestación; la de cuerpo sonoro en tanto generador de territorio sonoro⁷, los modos o maneras de ocupación acústica (configuración o comportamiento de este cuerpo)⁸, y finalmente la posición del cuerpo con respecto a su entorno externo e interno, en términos del “modo de ubicación”⁹.

De lo anterior se desprende la necesidad de generar tres organizaciones o entidades, que constituyan el objeto del proyecto; una relacionada con los distintos recintos que lo componen en términos de laboratorio además de su evidente interrelación (o no relación), todo esto apuntado a hacer efectivo un buen funcionamiento de este organismo de investigación (diagrama de relaciones espaciales y de funcionamiento); una siguiente configuración vinculada a las necesidades acústicas específicas de cada recinto, al mismo tiempo comprendiendo que están inscritos en una estructura mayor que deviene edificio total (diagrama de relaciones de aislamiento acústicos); y finalmente la conformación de distintas superficies y medio de sonoridad dependiendo de cada voluntad expresiva háptica_sonora de los recintos, su devenir de uno a otro y la manifestación de esto en un cuerpo sonoro que actúa como unidad (diagrama de relaciones de acondicionamiento acústicos).

⁷ “Para obras sublimes como la fundación de una ciudad, o la fabricación de un Golem, se traza un círculo, pero sobre todo se camina alrededor del círculo como en una ronda infantil, y se combinan las consonantes y la vocales rimadas que corresponden tanto a las fuerzas internas de la creación como a las partes diferenciadas de un organismo.” Gilles Deleuze, Félix Guattari, “Mil Mesetas; capitalismo y esquizofrenia.” Ed. Pretextos, 1997. Pág. 318.

⁸ “Allí donde la visión es próxima, el espacio no es visual, o mas bien el propio ojo tiene una función háptica y no óptica: ninguna línea separa la tierra y el cielo, que son de la misma sustancia: no existe horizonte, ni fondo, ni perspectiva, ni limite, ni contorno o forma, ni centro: no existe ninguna distancia intermedia, o toda distancia es intermedia.” Gilles Deleuze, Félix Guattari, “Mil Mesetas; capitalismo y esquizofrenia.” Ed. Pretextos, 1997. Pág. 501.

⁹ “el acto de andar, si bien no constituye una construcción física de el espacio, implica una transformación de el lugar y de sus significados. Solo la presencia física del hombre en un espacio no cartografiado, así como la variación de la percepciones que recibe del mismo cuando lo atraviesa, constituyen ya formas de transformación del paisaje que, aunque no dejan señales tangibles, modifican culturalmente el significado de el espacio en si mismo.” Francesco Careri, “Walkscapes. El andar como practica estética.” Ed. GG 2002. Pág. 51

Lo anterior se explica en términos de una exploración en la dinámica de comprensión y manejo del comportamiento del sonido, entendiéndolo como fenómeno físico, vinculado a la generación de vibraciones de un cuerpo sonoro y su interacción con distintos medios de propagación, mediante superficies de contacto, incluyendo toda la gama de situaciones que esto representa.

En términos de plantearse frente a la configuración y estructuración del edificio, nos topamos frente a varios desafíos, en relación a la materialización de éste, siendo preponderante el generar un proyecto que vincule de forma importante los espacios relacionados con el sonido como configurador y limitante de éstos.

El proyecto se plantea como el “**Laboratorio de Medición e Investigación de Sonido del Departamento de Música y Sonología de la Universidad de Chile**®”, en tanto será un organismo satélite de la Facultad de Arte Centro, complementando y ampliando la planta física de las distintas licenciaturas que en ella se imparten, creando además una serie de espacios técnicos específicos para las actividades de docencia, investigación y extensión de éstas, buscando asimismo la elaboración de un espacio que logre un eficiente relacionador de las distintas instancia tecnológicas de el proyecto, así como también lograr un entorno satisfactorio para el desenvolvimiento de los distintos usuarios que lo ocupan.

Esta solución no se plantea como una nueva sede de el Departamento de Música y Sonología, si no mas bien como un complemento a las carencias que éste presenta, en términos docentes, investigativos y de extensión, en definitiva un soporte satelital a la facultad de arte centro.

Este laboratorio tendrá, a su vez, la función de generar las mediciones e investigaciones acústicas respectivas al ámbito de la construcción, planteando a el proyecto como un organismo capaz de sustentarse, en términos económicos, según los servicios que pueda prestar al ámbito de la construcción en lo referente a las propiedades acústicas de los distintos materiales y elementos de construcción aplicados y su respectiva aprobación o reprobación según lo dictado en las normas de acústica referentes a la Ordenanza de Urbanismo y Construcción.

De esta forma el proyecto en si, evidencia su naturaleza universitaria y de aporte al País al ser un instrumento acorde con la necesidad actual de generar respuestas a los múltiples problemas planteados en esta área de conocimiento.

Este punto debería traducirse en un aparato arquitectónico que logre íntegramente:

-Responder a la posición determinada que sea plantea, entendiendo su complejidad en representación a sus condicionantes de superficie, legislación, orientación y el impacto que recibe acústicamente.

-Encontrar una solución estructural eficiente en términos acústicos para el total del edificio, así como también de las partes que lo componen, enfocado esto a lograr condiciones óptimas de control del aislamiento acústico parcial y total de éste.

-Establecer una relación espacial que haga eficiente las relaciones entre los programas en función de los distintos usuarios de circulan por las dependencias de los laboratorios.

-Generar envolventes y cerramientos acordes con su situación de acondicionamiento y aislamiento acústicos puntuales en cada área del edificio, utilizando distintas respuestas a diversas condiciones en el interior del complejo, en relación a las partes que lo componen, como también con relación a su exterior.

-Satisfacer a las necesidades de los distintos usuarios en tanto a condiciones espaciales relacionales en áreas comunes y circulaciones, teniendo en cuenta que los individuos representan ocupaciones transitorias.

PROGRAMA.

Para definir una primera organización es necesario fundar un primer programa de recintos de funcionamiento para el proyecto. Este programa, al entenderse como un conjunto de espacios funcionales, estarán agrupados en subconjuntos o divisiones de un total, para su mejor relación.

DIVISIONES:

- D.1 GRABACIÓN**
- D.2 MEDICIÓN**
- D.3 INVESTIGACIÓN**
- D.4 PROYECTOS**
- D.5 DOCENCIA**
- D.6 COLECTIVA**

PROGRAMA ESPECIFICADO.

D.1 DIVISIÓN GRABACIÓN

- D.1.a* sala interpretación.
- D.1.b* sala grabación técnica.
- D.1.c* sala edición.
- D.1.d* sala post producción.
- D.1.e* sala soporte técnico.
- D.1.f* discoteca de registros propios.
- D.1.g* área administrativa de división.

D.2 DIVISIÓN MEDICIÓN

- D.2.a* salas de aislamiento (servicio externo).
- D.2.b* salas de aislamiento (docencia).
- D.2.c* sala de medición técnica.
- D.2.d* talleres de construcción.
- D.2.e* área de almacenamiento.
- D.2.f* área de carga y descarga.
- D.2.g* área administrativa de división.

D.3 DIVISIÓN INVESTIGACIÓN

- D.3.a* cámara anecoica.
- D.3.b* cámara reverberante.
- D.3.c* sala de medición técnica.
- D.3.d* sala de soporte técnico.
- D.3.e* sala de equipos.
- D.3.f* área de almacenamiento.
- D.3.g* área de carga y descarga.
- D.3.h* área administrativa de división.

D.4 DIVISIÓN PROYECTOS

- D.4.a* taller de construcción.
- D.4.b* áreas de confluencia con las divisiones anteriores.

- D.4.c* salas de ensayo no _ sonoro (danza, teatro, artes visuales).
- D.4.d* área administrativa de división.

D.5 DIVISIÓN DOCENCIA

- D.5.a* salas de docencia práctica.
- D.5.b* áreas de confluencia con las divisiones anteriores (salvo la de proyectos).
- D.5.c* secretaria.

D.6 DIVISIÓN COLECTIVA

- D.6.a* accesos peatonales.
- D.6.b* vestíbulos.
- D.6.c* cafetería/cocina.
- D.6.d* salas de reunión informal.
- D.6.e* sala de presentaciones.
- D.6.f* baños.
- D.6.g* estacionamientos (posible).
- D.6.h* área administrativa total.

Lo anterior se suma a los requerimientos específicos de este proyecto en tanto que es un laboratorio de sonido, lo cual presupone una serie de condiciones ideales para los ensayos que se realizarán en él. Esto incluye tanto a las cámaras de medición, como entidades aisladas sonoramente, como también a su relación con los elementos y espacios que componen el edificio, así como también su exterior (con toda la información que el contexto pueda suponer y manifestar).

Esta raíz corresponde al tema del sonido, pero no observado únicamente desde el punto de vista de la acústica en edificios, sino que el mismo sonido como protagonista del proyecto, en tanto el proyecto a gestar será un soporte para la investigación y aprendizaje de este fenómeno poco desarrollado a nivel del diseño arquitectónico, incluyendo de esta forma los factores de acondicionamiento acústico y aislamiento acústico.

De esta forma el proyecto se propone resolver dos necesidades puntuales, pero que a la vez se encuentran relacionadas la una con la otra, ya que las dos pasan por un tema de soporte y generación de conocimiento.

10. Bibliografía

1. Sommerhoff, Jorge. *Acústica de locales Acondicionamiento acústico interior de salas*. Facultad de ciencias de la ingeniería, instituto de acústica, Universidad Austral de Chile, 1989.
2. Ferrari, Cristian. *Geometría acústica en la arquitectura*. Facultad de arquitectura y urbanismo, universidad de chile, 1995.
3. Parma, Leonardo. *Antecedentes para el desarrollo de un laboratorio de acústica arquitectónica*. Instituto de edificación experimental, Escuela de Arquitectura, Universidad de Chile, 1970.
4. Deleuze, Gilles. Guattari, Félix. *Mil mesetas .capitalismo y esquizofrenia*. Ed. Pretextos, 1997.
5. Arau, Higinio. *ABC de la acústica arquitectónica*. 1999.
6. Recuero, Manuel. *Acondicionamiento acústico*. 2001
7. Souper, M. Verónica. *Acústica aplicada en salas especializadas*. Facultad de arquitectura y urbanismo, Universidad de Chile, 1978.
8. Jourquer, Maria Luz. *Acústica en salas de ensayo de música*. Facultad de arquitectura y urbanismo, Universidad de Chile, 1979.
9. Francesco Careri, *Walkscapes. El andar como practica estética*. Ed. GG 2002.

11. Anexos

CONCEPTOS

FORMACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Un medio puede transmitir ondas sonoras porque es elástico. Esta es la propiedad que poseen algunos materiales consistentes en que se reintegran a su forma o volumen originales cuando quedan liberadas de la fuerza que las oprime. Un sencillo ejemplo, lo constituye la goma. Si se estira un trozo de goma y luego se suelta, volverá a su estado original. En cambio, el plomo muestra muy poca o ninguna elasticidad. El acero también posee elasticidad. Hasta cierto punto vuelve a su forma primitiva al dejar de actuar sobre él alguna fuerza.

Los gases también son elásticos, pero de modo diferente. Si una capa de gas, tal como el aire disminuye de volumen porque una fuerza ejerce presión sobre ella, al cesar dicha fuerza volverá a ocupar el mismo volumen que en un principio. A esta propiedad se debe que el aire transmita las vibraciones de un cuerpo sonoro en forma o movimiento ondulatorio.

Hay dos puntos muy importantes que señalar respecto a cualquier tipo de movimiento ondulatorio:

1. Se propaga energía.

2. No se produce desplazamiento del medio transmisor tomado como conjunto.

El primer punto es evidente, ya que es imprescindible la existencia de una energía que produzca vibraciones en el receptor. El segundo se refiere a que las partículas del medio no hacen sino vibrar alrededor de su posición de reposo normal.

Otro aspecto importante es el modo de variar con el tiempo. Una manera sencilla de distinguir los conceptos de distancia y tiempo es la de considerar que cuando se habla de distancia se concibe la onda sonora como un conjunto en un instante dado; y cuando considera el tiempo, se piensa en una partícula determinada.

AMPLITUD

La amplitud es el valor máximo del movimiento de una onda. Así, por ejemplo, la distancia máxima a que una partícula se aleja de su posición de reposo es la amplitud de desplazamiento.

LONGITUD DE ONDA

Volviendo a considerar la onda en el espacio, la distancia entre dos compresiones o entre dos expansiones se denomina *longitud de onda* (λ);

y si se imagina a la onda pasando por un punto dado en el espacio y se empieza a contar justamente cuando una compresión pasa por este punto, el tiempo que transcurre hasta producirse el paso de otra compresión se llama *período* (T).

FRECUENCIA

Se define la *frecuencia* como el número de cambios (de una compresión a otra, por ejemplo) que ocurren en un lugar dado en el transcurso de un segundo. Se mide en ciclos por segundo (Hz) y para expresarla nos servimos del símbolo *f*. La frecuencia y el período se relacionan como sigue:

Frecuencia = 1/ Período o bien: $f = 1/T$

VELOCIDAD DEL SONIDO

Las ondas sonoras se propagan en el aire con una cierta velocidad, que guarda la siguiente relación con la longitud de onda y con el período:

Velocidad = Distancia recorrida/ tiempo

En condiciones normales se acepta que la velocidad del sonido es de 344 metros por segundo.

Entre los factores que determinan la velocidad se cuenta la temperatura. A 0°C es de 331 metros por segundo. Al elevarse la temperatura, aumenta la velocidad.

He aquí ahora, a manera de comparación, las velocidades de las ondas sonoras en otros medios distintos del aire:

En el oxígeno: 317 metros por segundo.
En el hidrógeno: 1.270 metros por segundo.
En el agua salada: 1.504 metros por segundo.
En el acero: 5.000 metros por segundo.

TONO

Se define el *tono* como la cualidad subjetiva de una nota que hace posible situarla en una escala musical. Tono y frecuencia han de estar evidentemente en estrecha relación. La frecuencia de un sonido depende de las vibraciones de la fuente. Si el número de vibraciones se altera, cambia la frecuencia y con ella el tono. Aunque éste se halla determinado principalmente por aquélla, hay circunstancias en que el tono de una nota puede variarse cambiando su intensidad sin alterar la frecuencia.

El tono de un sonido puede también modificarse habiendo un movimiento relativo entre la fuente y el oyente. Este fenómeno es muy común y casi todo el mundo lo habrá observado en alguna ocasión. El ejemplo usual que se cita es el de un tren expreso sonando constantemente su silbato al entrar en la estación; pero hay otros, como es el de un automóvil al pasar delante de nosotros.

El hecho básico es que cuando la distancia entre una fuente sonora y un oyente disminuye, la distancia entre dos compresiones - o expansiones- se vaya reduciendo. Lo cual significa que la longitud de onda efectiva decrece, y con ello aumenta el tono aparente. De modo similar, al incrementarse la distancia entre la fuente y el oyente, la longitud de onda se hace mayor y el tono aparente disminuye. Así, pues, el tono de la nota que produce el silbato de un tren se reduce al pasar éste. Al alejarse, es más bajo que al aproximarse. Este cambio de tono con la variación de distancia se le denomina efecto Doppler.

ONDAS ESFERICAS Y PLANAS

Empecemos imaginando una fuente sonora que irradia igualmente en todas direcciones.

Se conoce con el nombre de fuente puntual. Si a corta distancia de la fuente pudiéramos ver cómo se propaga la energía sonora, observaríamos que la onda tiene un frente curvado. En efecto, la energía total se radia sobre la superficie de una esfera. De aquí el término de «ondas esféricas», puesto que el frente de las mismas toma la forma de una de dichas figuras geométricas en continua expansión. En la práctica, sin embargo, una verdadera fuente puntual es imposible, aunque si las dimensiones de la fuente son pequeñas comparadas con la longitud de onda, puede decirse que se radian ondas aproximadamente esféricas.

Tal curvatura se va aplanando a muy grandes distancias de la fuente. El frente de onda, considerado en una reducida área, puede considerarse como un plano perpendicular a la dirección en que la onda sonora se propaga. En este caso, se denomina «onda plana».

INTENSIDAD

Es la proporción de energía que se transfiere a través del medio, o la potencia que pasa por unidad de área - generalmente 1 cm²- del frente de onda. Una manera fácil de imaginarla es considerar de nuevo que la fuente puntual radia en todas direcciones y que su potencia se mide en vatios. A una distancia pequeña del manantial, esta potencia ha de estar distribuida sobre la superficie de una esfera. Puesto que dicha área es $4\pi r^2$ (siendo r la distancia desde el manantial, o más sencillamente, el radio de la esfera), tendremos:

Intensidad = potencia de la fuente / $4\pi r^2$ (vatios/cm²)

La intensidad y la potencia sonora se hallan en evidente relación: Cuanta más energía, más potente es el sonido. La intensidad mínima necesaria para percibir una nota de 1.000 Hz es de 10-16 vatios/cm².

La fórmula expuesta más arriba nos permite apreciar una importante ley de física referente a cómo se distribuye la energía de una fuente. Si ésta es de potencia constante, resulta:

$$\text{Intensidad} = f (1/r^2)$$

Dicho en palabras: la intensidad disminuye inversamente al cuadrado de la distancia. Esta ley es general y se conoce como «Ley de las inversas de los cuadrados». No hace falta que la fuente sea sonora, pues puede ser luminosa e indica que la iluminación se debilita al alejarnos del foco. La intensidad y la presión de una onda sonora tienen que estar forzosamente relacionadas.

Cabe demostrar que la primera es proporcional al cuadro de la segunda. Expresado en términos matemáticos:

$$\text{Intensidad} = f (\text{presión}^2)$$

Sustituyendo ahora presión² por intensidad en la fórmula penúltima tenemos: presión² = f (1/r²) o bien: presión = f (1/r)

Si dibujamos un gráfico que relacione la presión y la distancia a la fuente hallamos que, cerca de la fuente, un ligero aumento de la distancia desde A a B produce un gran descenso de presión. En cambio, aumentando la misma distancia, pero esta vez desde C hasta D, la variación de presión es mucho menor.

INTENSIDAD Y DECIBELIOS

Existe una enorme gama de intensidades de ondas sonoras, algo así como de 1 billón hasta 1. En la mayoría de los casos no es la intensidad real de una nota lo que es importante, sino su comparación con otras notas. Esta comparación ha sido definida por la ley de Weber-Fechner, según la cual el efecto sobre el oído de un cambio de intensidad depende de la intensidad que precede al cambio. Una forma simple de comprender esto es comenzar con una nota de determinada intensidad, digamos 10 unidades, incrementarla luego a 100 y después a 1.000 unidades. Estos dos cambios los interpretaría el oído como idénticos en potencia, puesto que la proporción de 100/10 es igual a 1000/100. Otro modo de expresar lo que decimos es escribir los valores de las intensidades en potencias de diez: 10¹, 10², 10³. Se ve que los cambios iguales en potencia vienen dados por cambios iguales al logaritmo de la intensidad. Se dice que el oído tiene una respuesta logarítmica y en mediciones de acústica se emplea una unidad llamada BELIO. Si la intensidad inicial **I1** se incrementa hasta un nuevo valor **I2** se tiene:

$$\text{Relación en BELIOS} = \log I2/I1$$

En la práctica, el belio es demasiado grande y por ello se emplea el DECIBELIO (dB). La relación en decibelios será entonces:

$$\text{dB} = 10 \text{ Log } I2/I1$$

Los logaritmos representan un recurso muy útil de cálculo, y a esto se debe que el decibelio se use universalmente en ingeniería electrónica para comparar dos potencias eléctricas. Así, por ejemplo, si la potencia de entrada de un amplificador es P_{ent} y la de salida P_{sal} , la amplificación en decibelios será:

$$A = 10 \log P_{sal}/ P_{ent} \text{ dB}$$

En acústica se suele tratar con mayor frecuencia con presiones que con intensidades, y con dos presiones, la relación en decibelios sería:

$$20 \text{ Log } \text{Presión}^2/\text{Presión}^1 \text{ (dB)}$$

A esta relación se llega de la siguiente manera: $\text{dB} = 10 \log I_2/I_1$

Pero como intensidad = f (presión²)

Decibelios = $10 \log (\text{presión}_2)^2 / (\text{presión}_1)^2 = 20 \log \text{presión}_2 / \text{presión}_1$

ONDAS VIAJERAS Y ESTACIONARIAS

En una habitación las paredes, el techo, el suelo, los muebles, etc., reflejan las ondas sonoras. Cuando una de éstas se refleja volviendo por su trayectoria original, interferirá a la onda incidente que llega de la fuente. El tipo de interferencia que se produce tiene gran efecto sobre la distribución de la energía sonora. Evidentemente, la intensidad y la distribución del sonido reflejado dependen del tamaño y la forma de la superficie u objeto reflectante, como ya veremos en páginas posteriores.

Para comprender este problema lo mejor es tomar como ejemplo una forma de onda del desplazamiento en una cuerda que tiene un extremo fijado rígidamente a una pared. Se hace vibrar el otro extremo libre para que una onda de desplazamiento se propague por la cuerda hacia la pared. Como ésta se supone completamente rígida, la energía en la cuerda debe ser reflejada completamente hacia atrás a lo largo de la cuerda.

Es por esto que este tipo de onda se llama onda estacionaria, es decir, que no progresa por la cuerda. Ciertas partes del hilo vibran, y otras partes no se mueven. En una onda viajera todas las partes del medio vibran.

Los puntos donde no hay desplazamiento se llaman nodos. Los puntos de máximo desplazamiento se denominan antinodos.

ECOS

El fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido es el **eco**, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos **100 ms** (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo t relacionado con la distancia d a la superficie más próxima por la expresión $t = 2d / c$, donde c es la velocidad del sonido, es decir **345 m/s**. El factor **2** se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie. De esta fórmula se deduce que para tener un eco la superficie más próxima debe estar a unos **17 m**.

Cuando hay *dos* paredes paralelas algo distantes se puede producir un eco repetitivo.

REFLEXIONES TEMPRANAS

Cuando la fuente sonora está rodeada por varias superficies (piso, paredes, techo) un oyente recibirá el sonido directo, y además el sonido reflejado en cada pared. Las primeras reflexiones recibidas, que se encuentran bastante separadas en el tiempo, se denominan **reflexiones tempranas**.

En salas no demasiado grandes, las primeras reflexiones está bastante cerca en el tiempo unas de otras, de manera que no se llegan a percibir como eco.

AMBIENCIA

La distribución en el tiempo de las reflexiones tempranas crea la sensación de **ambiencia**, es decir la sensación que permite al oyente identificar auditivamente el espacio en el que se encuentra. Las personas no videntes desarrollan una especial habilidad para interpretar la información espacial contenida en la ambiencia.

Arquitectónicamente, el control de la ambiencia se puede lograr mediante un cuidadoso diseño que involucra trazar, sobre un plano de la sala, "rayos" acústicos, medir cuidadosamente sus recorridos, y de allí determinar los tiempos de llegada de las correspondientes reflexiones.

ABSORCIÓN SONORA

Las superficies de un recinto reflejan sólo parcialmente el sonido que incide sobre ellas; el resto es absorbido. Según el tipo de material o recubrimiento de una pared, ésta podrá absorber más o menos el sonido, lo cual lleva a definir el **coeficiente de absorción sonora**, abreviado con la letra griega α (alfa), como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E \text{ absorbida}}{E \text{ incidente}}$$

El coeficiente de absorción tiene una gran importancia para el comportamiento acústico de un ambiente, y por esa razón se han medido y tabulado los coeficientes de absorción para varios materiales y objetos. En general, los materiales duros, como el hormigón o el mármol, son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.

Se proporcionan para varias frecuencias, ya que α depende bastante de la frecuencia. En general la absorción aumenta con la frecuencia, debido a que para frecuencias altas la longitud de onda es pequeña y entonces las irregularidades de la superficie o el propio espesor del material son más comparables con la longitud de onda. En algunos casos, sin embargo, algún fenómeno de resonancia entre el material y la pared puede mejorar la absorción en bajas frecuencias.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Después del periodo de las reflexiones tempranas, comienzan a aparecer las reflexiones de las reflexiones, y las reflexiones de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente, dando origen a una situación muy compleja en la cual las reflexiones se densifican cada vez más. Esta permanencia del sonido aún después de interrumpida la fuente se denomina reverberación.

Ahora bien; en cada reflexión, una parte del sonido es absorbido por la superficie, y otra parte es reflejada. La parte absorbida puede transformarse en minúsculas cantidades de calor, o propagarse a otra habitación vecina, o ambas cosas. La parte reflejada mantiene su carácter de sonido, y viajará dentro del recinto hasta encontrarse con otra superficie, en la cual nuevamente una parte se absorberá y otra parte se reflejará. El proceso continúa así hasta que la mayor parte del sonido sea absorbido, y el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible, es decir, se extinga.

Para medir cuánto demora este proceso de extinción del sonido se introduce el concepto de tiempo de reverberación, T , técnicamente definido como *el tiempo que demora el sonido en bajar 60 dB por debajo de su nivel inicial* (se ha elegido 60 dB porque con esa caída se tiene la sensación de que el sonido se ha extinguido completamente).

Como ejemplo, si al interrumpir un sonido de 90 dB éste se reduce a 30 dB en 3 s, entonces será $T = 3$ s. Salvo para sonidos inicialmente muy intensos, antes de caer 60 dB el sonido se vuelve inaudible por quedar enmascarado por el ruido de fondo o ruido ambiente.

El tiempo de reverberación depende de cuán absorbentes sean las superficies de la sala. Así, si las paredes son muy reflectoras (es decir que reflejan la mayor parte del sonido que llega a ellas), se necesitarán *muchas reflexiones* para que se extinga el sonido, y entonces T será grande. Si, en cambio, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta del sonido, por lo tanto en unas pocas reflexiones el sonido será prácticamente inaudible, por lo cual T será pequeño. Dado que los materiales duros, como el hormigón o los azulejos, son poco absorbentes del sonido, un ambiente con paredes de este tipo tendrá un tiempo de reverberación largo. Una sala cubierta con materiales absorbentes como cortinados, alfombras, etc., por el contrario, tendrá un tiempo de reverberación corto.

CAMPO SONORO DIRECTO Y REVERBERANTE

Un segundo elemento que interviene en la acústica de un ambiente es cómo se distribuye en él el campo sonoro. Por campo sonoro se entiende el valor que adquiere la presión sonora en cada punto del espacio. A los efectos del análisis, el campo sonoro se divide en dos componentes: el campo directo y el campo reverberante. El campo directo contiene la parte del sonido que acaba de ser emitido por la fuente, y que por lo tanto *aún no experimentó ninguna reflexión*, y el campo reverberante, en cambio, incluye el sonido *después de la primera reflexión*.

Estas dos componentes tienen comportamientos muy diferentes. El campo directo disminuye con la distancia a la fuente, y lo hace a razón de 6 dB por cada duplicación de la distancia. Así, si a 1 m de una fuente sonora se mide un nivel de presión sonora de 80 dB, a 2 m (el doble de 1 m) tendremos 74 dB; a 4 m (el doble de 2 m) habrá 68 dB; a 8 m (el doble de 4 m) existirá un campo directo de 62 dB, y así sucesivamente.

El campo reverberante, en cambio, es *constante* en los ambientes cerrados, como habitaciones, salas y otros recintos. Esto se debe a que el sonido sufre multitud de reflexiones, y todas ellas se superponen entre sí, resultando una *distribución prácticamente uniforme* del sonido.

En el descampado, donde el sonido puede propagarse libremente sin que se produzcan reflexiones, *sólo existe la componente de campo directo*. Por esta razón, el nivel de presión sonora disminuye rápidamente con la distancia. Así, una persona hablando normalmente a 50 m se escuchará sólo muy débilmente. En un ambiente cerrado, en cambio, si bien muy cerca de la fuente predomina el campo directo, a cierta distancia predomina el campo reverberante.

Existe una distancia denominada distancia crítica que limita las regiones en las que predomina uno u otro campo. Para distancias menores que la distancia crítica, predomina el campo directo, y para distancias mayores, predomina el campo reverberante. Por esta razón se suele denominar también campo cercano y campo lejano a las componentes directa y reverberante.

Una característica del campo directo es que es bastante direccional, mientras que el campo reverberante es difuso, es decir adireccional. Por esta razón, en un teatro, cerca del escenario se percibe claramente la procedencia de los sonidos, pero más lejos no tanto (aunque por efecto Haas, el sonido directo, que llega siempre primero, permite percibir la dirección del sonido aún con un importante campo reverberante).

El campo reverberante permite explicar por qué dentro de una habitación los sonidos se perciben con mayor sonoridad que en un ámbito abierto. En éste último sólo existe el campo directo. En una habitación el sonido se ve *reforzado* por el campo reverberante, que *acumula la energía sonora que no es absorbida en las reflexiones*. En el descampado, al no haber reflexiones, la energía sonora simplemente se aleja continuamente de la fuente, *sin posibilidad de acumularse*.

De lo anterior se desprende que el campo reverberante será tanto mayor cuanto más reflectoras del sonido sean las superficies de un ambiente (o, lo que es lo mismo, cuanto menor sea el coeficiente de absorción), ya que en ese caso será mayor la energía acumulada. Como también el tiempo de reverberación aumenta cuando aumenta la reflexión, resulta que *a mayor tiempo de reverberación, mayor campo reverberante*.

Esto explica por qué en los ambientes con paredes duras, como los gimnasios, a igualdad de la fuente el nivel sonoro es tan alto. A esto se agrega el hecho de que el campo reverberante tiende a enmascarar el habla, por lo que la gente inconscientemente sube la voz para aumentar el campo directo, y poder comunicarse por lo menos con las personas más próximas. Esto a su vez incrementa el campo reverberante, pues significa más energía sonora para acumular en el ambiente.

RESONANCIAS

En las salas pequeñas, aparece un elemento que incide en la calidad acústica, que son las resonancias o modos normales de vibración. Esto sucede como consecuencia de las reflexiones sucesivas en paredes opuestas. Si en una habitación se genera una

onda sonora que viaja perpendicularmente a dos paredes enfrentadas, al reflejarse en una de ellas lo hará también perpendicularmente, de modo que volverá sobre sí misma y posteriormente se reflejará en la pared opuesta. Así, se generará lo que se denomina una onda estacionaria, es decir una onda que va y vuelve una y otra vez entre las dos paredes. Esta onda es, de hecho, una onda sonora que se escuchará precisamente como un sonido.