

GUIA DEL USUARIO

INDICE

INTRODUCCION

Principios Generales 2

PARTE PRIMERA LAS FUNCIONES

Inicio	6
Barra de Herramientas	7
Barra de Visualización	9
Área de Trabajo	15
Diagrama Polar	19

PARTE SEGUNDA el análisis

Función Scan	23
Ejemplos	24

PARTE TERCERA el diseño

Proyecto: "Campana Acústica"	
Introducción	38
Descripción del lugar	39
Criterios y requisitos	42
Primeros croquis	43
Diseño en planta	55
Diseño en sección	60
Comprobación en tres dimensiones	63
Presentación del diseño acústico	66

INTRODUCCIÓN

PRINCIPIOS GENERALES

Radit2d es un programa de diseño acústico interactivo, rápido y esencialmente gráfico, fácil de utilizar y de interpretar.

Con el fin de conseguir estas características, hemos limitado los cálculos a lo estrictamente necesario para permitir un diseño consciente de la forma del recinto proyectado y una elección sumaria de los materiales, en función de los criterios acústicos definidos por el usuario.

El programa trabaja con una *fuente* sonora puntual de emisión esférica, un *recinto* proyectado en el plano de estudio bajo la forma de un polígono cualquiera y un *mapa* de curvas de niveles delimitado por un cuadrilátero plano.



El campo acústico es tridimensional, pero se trabaja solamente en dos dimensiones, lo que facilita el diseño, simplifica su presentación y acelera los cálculos. Según la intención del usuario, el diseño representa, arbitrariamente, una planta, una sección o un corte. Luego, gracias a una función especial, es posible ajustar los resultados de dos proyecciones de la misma sala para obtener los valores tridimensionales correspondientes en algunos puntos elegidos del recinto, siempre que la forma de éste lo permita (paredes laterales verticales, ausencia de dobles inclinaciones).

Después de cada cambio operado por el usuario, el programa vuelve a calcular el sonido directo y la primera reflexión sobre cada uno de los segmentos del polígono que representa el recinto proyectado. El cálculo se efectúa en los nudos de la retícula del mapa, que corresponde a una matriz cuadrada cuyo tamaño define la precisión de las curvas de nivel.

El sonido directo.

Depende solamente de la fuente de emisión, de los límites del recinto que lo enmarcan y, eventualmente, de los obstáculos que impiden su propagación ("eliminación de las partes escondidas").



Figura 2. El sonido directo

El sonido reflejado.

Para entender el método de las "fuentes imágenes", es útil recurrir a una analogía con la luz. Imaginemos un recinto enteramente constituido por espejos planos. En el lugar de la fuente, encendemos una vela. Desde cualquier lugar de la sala, vemos ahora un gran número de velas, que son todas imágenes de la única vela real, reflejada en los espejos. Cada una de estas imágenes parece ocupar una situación precisa, que corresponde exactamente al punto simétrico del que ocupa la vela real con respecto al plano del espejo donde se refleja.

Obtendremos por lo tanto la misma situación visual si quitamos los espejos y colocamos una serie de velas iguales a la primera en las posiciones anteriormente ocupadas por sus imágenes. Sólo habrá que tener en cuenta la calidad de los espejos, restando a las nuevas velas la intensidad correspondiendo al factor de absorción de los espejos respectivos. Lo notable es que la nueva situación visual se irá modificando del mismo modo que la anterior al desplazarnos dentro del recinto.

Desde luego, en presencia de varios espejos, se producirán reflexiones múltiples (imágenes de imágenes), pero nuestro programa sólo contempla la primera reflexión, lo que suele ser suficiente para el diseño: las otras reflexiones son, sin duda, esenciales para evaluar la reverberación, pero no suelen examinarse en el diseño de la forma, porque ralentizarían mucho los cálculos y, sobre todo, dificultarían inútilmente su interpretación.



Figura 3. El sonido reflejado

Para calcular el campo reflejado, Radit2d examina sucesivamente cada segmento del recinto, busca la fuente imagen y elimina las "partes escondidas" (un segmento puede quedar parcialmente o totalmente enmascarado por otros, según la forma del recinto y la posición de la fuente). Luego, traza los dos rayos límites de emisión de la fuente imagen que delimitan en el mapa la zona afectada por la reflexión considerada.

En esta zona, calcula en cada nudo la contribución de la imagen al nivel sonoro, teniendo en cuenta la absorción de la pared correspondiente.



Figura 4. Esquema básico



Mapas y diagramas

Figura 5. Diagrama polar

Además del mapa de curvas de niveles, que permite conocer las variaciones del nivel sonoro en el área ocupada por el público, el programa puede presentar un diagrama polar, mucho más detallado, pero referido a un solo punto: el que ocupa un espectador particular.

Con la práctica, el usuario aprenderá a pasar hábilmente del mapa a los diagramas y viceversa: el mapa permite adivinar en qué lugares pueden obtenerse diagramas interesantes, y los diagramas, a su vez, permiten entender mejor las características del mapa.

Los diagramas presentan información adicional (procedencia, nivel sonoro, atraso y dirección de cada reflexión), con la cual se puede afinar mucho el análisis acústico: describir las focalizaciones, comprobar la presencia de ecos, examinar las reflexiones laterales,...

Aprendizaje de Radit2d

La presente guía consta de tres partes (las funciones, el análisis y el diseño), que recubren los tres usos posibles del programa.

El primero es *didáctico*, ya que, gracias a su funcionamiento interactivo, al aprender a manejar los mandos del programa, se comprueba continuamente la incidencia de cada manipulación sobre la situación acústica.

El usuario debería por lo tanto leer y practicar muy atentamente esta primera parte, hasta dominar completamente los mandos, la calidad de las imágenes y las nociones acústicas subyacentes.

En particular, el dominio de la barra de colores y un uso inteligente de la precisión del mapa resultan imprescindibles para poder interpretar los resultados, trabajar rápidamente y obtener imágenes verdaderamente significativas. También es importante aprender a sentir cuándo conviene pasar a los diagramas polares y cómo limitarse, en cada estudio, a unas pocas imágenes donde la información principal quede condensada, so pena de multiplicar innecesariamente los dibujos de poco interés.

El segundo uso del programa es el *análisis*, gracias a la función "scan", que permite estudiar cualquier planta o sección extraídas de publicaciones sobre arquitectura o acústica. Sin embargo, no resultará nada fácil, para el principiante, encontrar casos nuevos que puedan dar lugar a un análisis verdaderamente interesante, ya que se deben tomar siempre en cuenta las limitaciones intrínsecas del programa y de la teoría que lo sustenta, la dificultad notable de los estudios acústicos en general y, sobre todo, la descripción generalmente deficiente de las salas en las publicaciones. Los ejemplos de la segunda parte de esta guía y los ejercicios propuestos permitirán al usuario adquirir rápidamente la experiencia necesaria.

El tercer uso del programa, el *diseño*, es el principal. En la tercera parte de esta guía, se explica completamente un proyecto, el de una "*campana acústica*". A partir de ello, el usuario podrá fácilmente diseñar, en sus propios proyectos, un techo acústico, la forma de un escenario o la orientación de una serie de reflectores. Para estas tareas, Radit2d constituye una herramienta profesional muy eficiente. Por su calidad gráfica, se puede también aprovechar para ilustrar notas o apuntes de acústica. Sus autores no piden nada a cambio, sino que se les comunique los mejores resultados y las eventuales observaciones, con el fin de mejorar continuamente el contenido y la presentación de este programa.

PARTE PRIMERA LAS FUNCIONES

INICIO

Al abrir el programa, definiremos el área en la que deseamos trabajar. La forma que adoptará dicha área será la de un cuadrado, por tanto se introduce un sólo valor, en metros.



Figura 6. Definición del área de trabajo



Dentro del área de trabajo aparecen varios elementos, cada uno de estos nos ayudará a estudiar el comportamiento acústico de un determinado espacio. Identificamos:

- Cuadrado exterior: está conformado por cuatro segmentos y cuatro vértices. Los segmentos representan los límites del recinto estudiado. Dichos límites pueden ser cuerpos sólidos (mamparas, paredes, divisiones) o bien aperturas (puertas, ventanas). Para modificar este cuadrado, basta con mover individualmente los vértices en cualquier dirección. Más adelante, aprenderemos a añadir vértices, para transformar este cuadrado en el polígono que mejor se adapte a la planta o sección estudiada.
- *Cuadrado interno (rojo):* representa al público. Los colores que lo rellenan (de momento, un rojo unido) forman un *mapa*, que nos informa de la situación acústica.
- *Círculo rojo:* representa a la *fuente* de sonido (conferenciante, actor, músico,...).
- *Estrella amarilla:* representa al receptor: un punto para el cual, al activar la función "polar", se obtiene una descripción más detallada de la situación acústica.

- *Líneas punteadas:* son rayos límites que determinan la zona de actuación en el mapa de cada fuente imagen (de momento, sólo una de estas fuentes es visible).
- *Ejes de coordenadas:* son dos líneas que representan los ejes x y. Al inicio, sólo aparece en pantalla el eje horizontal, ya que el eje vertical se confunde con el borde izquierdo del cuadrado exterior.

Recordemos que, en Radit2d, la *fuente* sonora queda enteramente definida por su posición en el plano de estudio y por su nivel de emisión (en decibelios). La forma del *recinto* se modifica fácilmente y con total libertad, multiplicando y desplazando los vértices del polígono que lo representa. El *mapa* está definido por la posición de los cuatro vértices del cuadrilátero que lo enmarca y por su precisión.

BARRA DE HERRAMIENTAS

GRID: permite definir el intervalo que separa los nudos de la trama de fondo, sobre los cuales podremos forzar (siempre que el botón "snap" esté activado) el desplazamiento de la fuente, del receptor y de los vértices que definen el recinto y el mapa, para facilitarnos el control de las posiciones y dimensiones. Al presionar este botón, nos pide un valor en metros, que definirá el grosor de la trama. Esta se puede visualizar con el botón "objects".

SNAP: permite forzar a que todos los desplazamientos operados se efectúen sobre los nudos de la trama. Al desactivar este comando, los movimientos podrán realizarse libremente, lo cual dificulta la exactitud en las posiciones y dimensiones. En un diseño, se recomienda trabajar siempre sobre la trama. Cuando el desarrollo del trabajo requiera más precisión, se reducirá, con el botón "grid", el intervalo de la trama anterior permanezcan en su sitio. De no ser así, los puntos del diseño ya no se ubicarían sobre la nueva trama, lo cual dificultaría mucho el trabajo posterior. Por lo tanto, conviene plantearse este problema antes de empezar el diseño. Así, para un trabajo muy preciso, conviene empezar con un valor de 0.4 metros, que se podrá reducir luego a 0.2 y 0.1 metros (el valor mínimo permitido). En cambio, si conservamos el valor inicial de 0.5 metros, no podremos reducirlo más allá de 0.25 metros, ya que el valor de intervalo no puede definirse con más de dos decimales.

CONSTRAIN: permite forzar el desplazamiento de cualquier vértice del recinto sobre la línea recta uniendo sus dos vecinos. Esta función es útil cuando se quiere cortar en dos una misma pared para significar un cambio de material o la presencia de una apertura.

OBJECT: se activa con el botón derecho del ratón. Esta función activa/desactiva la trama (*grid*), las fuentes imágenes (*images*), los rayos límites (*radius*), los ejes x-y (*axes*), el receptor (*receptor*) y los límites del mapa (*audience limits*). El cambio afecta solamente a la apariencia de la imagen y sirve, especialmente, para preparar una impresión, cuando se quiera despejar la imagen de las informaciones innecesarias.

MEASURE: permite conocer las coordenadas de un punto específico, definidas por las posiciones actuales de los ejes.

HISTORY: permite retroceder, es decir, borrar algunas acciones. La última acción encabeza la lista. Al bajar en ella, se puede retroceder hasta el estado inicial.

ZOOM: permite ampliar la imagen, para visualizar todas las fuentes imágenes. Al pulsar de nuevo el botón, se vuelve a visualizar el área de trabajo.

VIEW: permite ampliar el área de trabajo, cuando el desarrollo del diseño lo requiera. Al activar este botón, aparece dentro del área de trabajo una barra y una cruz. La barra permite aumentar o disminuir la cuadrícula de fondo; Al pulsar "M", se reduce a la dimensión mínima que abarque el recinto actual. La cruz está formada por cuatro flechas que permiten desplazar el recinto dentro del área de trabajo previamente ampliado; al pulsar "C", el recinto vuelve al centro.

UTILS: con el botón derecho del ratón, se puede acceder al menú con las opciones siguientes. **Dos utilidades de calculadora**. La función "dB sum" permite sumar un número indefinido de valores en decibelios: se introducen los valores a sumar, separándoles con la barra de espacio, y, al pulsar "OK", aparece la suma. La función "dB decrease" permite evaluar la atenuación de una emisión esférica en función de la distancia. Se introducen el nivel de emisión y la distancia, y el valor del nivel sonoro inducido aparece sobre la curva de decrecimiento. **Una función de dibujo**. Con "geometric shapes", podemos introducir en el área de trabajo figuras geométricas elementales: el círculo, la elipse o la parábola. También encontramos una **herramienta de animación**, que no se describe en este manual, por necesitar software añadido.

POLAR: Crea un gráfico polar que describe la forma en la que el receptor recibe el sonido.

SCAN: permite trabajar sobre una planta previamente escaneada. Esta imagen se escaneará como un archivo JPEG y se guardará en un fichero. Al activar la función, se podrá abrir la imagen, transcribirla e introducirla en el área de trabajo (ver la segunda parte de estas notas.)

PRINT: crea una imagen a partir del gráfico en pantalla y la guarda en un archivo para luego ser impresa desde otro programa. Se aconseja limpiar previamente la imagen de las informaciones innecesarias, usando el botón "objects". El formato de salida habitual es el "jpeg". El formato "hpg" puede ser muy útil para los que manejen programas de dibujo capaces de leerlo. Es un formato vectorial: no conserva los colores, pero las líneas siguen definidas como tales y se pueden desplazar, borrar o modificar, para mejorar la presentación final.

LOAD: abre los archivos específicos del programa, caracterizados por la extensión ".ac".

SAVE: salva el diseño desarrollado, en el formato ".ac".

BARRA DE VISUALIZACIÓN



Figura 8. Herramientas de visualización

A la derecha del área de trabajo, encontramos, desde arriba hacia abajo, un menú superior, una barra de colores y tres indicadores. Entre todos, definen la información presentada por el mapa del área de trabajo.

MENÚ SUPERIOR E INDICADORES

Los dos primeros indicadores (*reflections* y *decibels*) son exclusivos uno de otro y permiten representar en el mapa o bien el número de reflexiones que atina las diversas partes del público (estado inicial) o bien los niveles sonoros, en decibelios. El primer caso es de uso poco frecuente, y conviene, generalmente, pasar directamente a los decibelios, como haremos en las siguientes ilustraciones.

En la **fig. 9**, el mapa muestra el campo sonoro resultando del total de las cuatro primeras reflexiones debidas a las cuatro paredes. En efecto, el menú superior indica "*all*", que significa que las contribuciones de todas las paredes están sumadas en el mapa. En este caso, y en este caso solamente (menú en posición "*all*" y segundo indicador activado), se puede activar el tercer indicador (*direct*) para sumar en el mapa la contribución del sonido directo (**ver fig. 10**). Aquí, observamos que el mapa se modifica ligeramente. En general, veremos que el cambio suele ser mucho más brusco. Si modificamos el menú superior, el



estudiar las contribuciones individuales.

Figura 9. Campo sonoro resultando de las cuatro primeras reflexiones debidas a las cuatro paredes del recinto







Figura 10. Campo sonoro resultando de las cuatro primeras reflexiones más el sonido directo





Figuras 11, 12, 13 y 14. Campo sonoro resultando de las reflexiones sobre cada una de las paredes del recinto

hecho que el tercer indicador esté o no activado carece de importancia, ya que pasamos a

Con el botón izquierdo del ratón, podemos activar en el menú superior la indicación "*direct*": el mapa muestra entonces el sonido directo, con su característica atenuación en círculos concéntricos: estos no dependen del recinto (**ver fig. 15**).

Podemos luego activar sucesivamente cada pared, para visualizar la reflexión que genera (ver figs. 11, 12, 13 y 14). Si activamos además el botón "zoom", podremos ver en cada caso la fuente imagen implicada. Una manera más práctica de visualizar cada pared es activarla directamente con el botón izquierdo del ratón en el área de trabajo; vemos entonces cómo el menú se adapta instantáneamente: eso resultará muy práctico cuando trabajaremos con muchas paredes.



Figura 15. Campo sonoro resultando del sonido directo solamente.

LA BARRA DE COLORES

Es seguramente la más importante de todas las funciones, y su manejo necesita algo de práctica, ya que define la escala del mapa y por lo tanto el sentido de sus colores. Los colores están relacionados con valores numéricos, que indican el número de reflexiones o el



Figura 16. Menú de la Barra de Colores

nivel sonoro en decibelios, según el indicador inferior activado. Con el botón derecho del ratón pulsado sobre la barra, aparece un

menú con cuatro opciones: "color", "gray", "CL auto", "CL manual".

Las opciones "*color*" y "*gray*" permiten elegir una escala de color o de grises. La segunda resulta a veces más fácil de analizar en el mapa, en casos complejos, y permite obtener buenas impresiones en negro y blanco, más económicas.

Las opciones "*CL auto*" y "*CL manual*" permiten definir, ya sea de forma automática o manual, la escala de valores numéricos.

Cuando la opción "*CL auto*" está activa, los límites inferior y superior de la escala son asignados por el mismo programa: corresponden a los niveles extremos calculados en el mapa. Eso significa que todos los colores aparecen en el mapa y, por lo tanto, que éste los aprovecha a todos para darnos la imagen más detallada posible del campo acústico. Pero eso significa también que la escala se modifica continuamente, cada vez que introducimos un cambio en la situación. Por lo tanto, los colores corresponden cada vez a valores distintos, y no tienen ningún sentido propio. Así, no se pueden comparar dos imágenes distintas, y no se puede sacar ninguna conclusión de los colores que aparecen en cada caso estudiado...

Si activamos ahora la opción "CL manual", nos aparece un cuadro con los dos valores límites. Sin tocarlos, pulsemos directamente la tecla "OK" (ver fig. 17). El mapa no se ha modificado, ya que los valores límites de la escala siguen iguales. Sin embargo, estamos ahora en el modo manual, hasta que volvamos a pulsar la opción "CL auto". En este modo, los valores límites ya no se modifican, cuál sea lo que hagamos, incluso si abrimos un nuevo caso, con el botón "load", o si volvemos al caso inicial con el botón "history". Ahora, los colores adquieren un significado, pues corresponden siempre a los mismos valores, y todas las imágenes que produzcamos se pueden comparar entre sí.



Ejemplo 1:

- Volver a iniciar el programa.
- ponerse en modo automático, y seguidamente en modo manual (ver fig. 17). Con eso,

Figura 17. Definición de la escala de valores numéricos y su correspondiente representación mediante el color

hemos afirmado el estado inicial como situación de referencia, ya que los límites de la escala están ahora bloqueados sobre los valores que da el modo automático en esta situación precisa (71.1 dB y 81.4 dB), que corresponde a la suma de las cuatro primeras reflexiones del estado inicial. Sólo en este caso han de aparecer, por fuerza, todos los colores en el mapa.





Figura 18. Suma de las cuatro primeras reflexiones del caso inicial (71.1 dB y 81.4 dB)

Figura 19. Evaluación del sonido directo con la escala de valores 71.1 dB - 81.4 dB

- Activar entonces el tercer indicador ("*direct*"). Ahora, sí, vemos un cambio importante (figs. 18 y 19): la zona roja aumenta notablemente, y el último grado azul de la escala desaparece del mapa. Anteriormente, al realizar la misma operación, pero en el modo automático, el mapa apenas se había modificado (ver figs. 9 y 10), porque la escala se adaptaba para que aparezcan siempre todos los colores. Sólo ahora podemos sentir la importancia de la contribución directa, que es siempre más fuerte que cualquier reflexión.
- En el área de trabajo, activemos sucesivamente las cuatro paredes. Vemos que sólo la pared próxima a la fuente produce un mapa con varios colores (**fig. 20**). Las tres otras contribuciones son insignificantes (**figs. 21, 22 y 23**). Eso significa que en la suma de las cuatro reflexiones, que es la referencia de nuestra escala actual, sólo importa de verdad la reflexión sobre la pared cercana, lo cual se debe a que cuando sumamos en decibelios cuatro valores, siendo uno de ellos mucho más alto que los tres otros, el resultado es muy próximo a este primer valor...



Figura 20. Contribución de las reflexiones correspondiendo a la pared 4

Ejemplo 2:







Figuras 21, 22 y 23. Contribución individual de las reflexiones correspondiendo a las paredes 1, 2 y 3

- pulsemos el botón izquierdo del ratón sobre la fuente y arrastrémosla hasta el centro del cuadrado.
- Luego, en el menú superior derecho, activemos la opción "*direct*". En el mapa aparecen los círculos concéntricos del sonido directo.
- En la barra de color, activemos el modo automático y, seguidamente, el modo manual. Así, hemos hecho del sonido directo el referente de nuestra escala de colores.

- Al pulsar sucesivamente las cuatro paredes, averiguamos que el mapa se pone azul oscuro: la contribución de cada una es casi insignificante, comparada con la del sonido directo.
- Al desactivar el tercer indicador de abajo (*direct*) y pulsar la opción "*all*" del menú superior, vemos que incluso la suma de las cuatro sigue, al parecer, insignificante.
- Pero activemos ahora el tercer indicador. Pasando una y otra vez, en el menú superior, de la opción "*direct*" (fig. 24) a la opción "*all*" (fig. 25), podemos comparar el sonido directo, con el sonido total (directo + reflexiones). Vemos que el mapa se divide en dos zonas: la zona central (en rojo-amarillo), alrededor de la fuente, apenas cambia entre las dos imágenes, mientras que la zona exterior (en azules), donde el sonido directo está ya muy atenuado, sí se modifica notablemente: acabamos de identificar la zona del "campo directo" y la del "campo reflejado".



Figura 24. Nivel sonoro total (directo + reflexiones)



Figura 25. Nivel sonoro directo

Esta es una distinción fundamental de la acústica de sala. En cualquier espacio construido, cuando nos ubicamos muy cerca de la fuente sonora, sólo oímos el sonido directo. Las características acústicas del recinto no importan: estamos en el *campo directo*. Pero si nos alejamos de la fuente, acercándonos a las superficies del recinto, el sonido directo se atenúa y empezamos a oír las reflexiones, es decir: empezamos a oír la arquitectura... Eso es el *campo reflejado*.

Cómo se ve, un buen uso de la barra de color requiere mucho ejercicio, pero resulta imprescindible para empezar a entender el programa y, a través de él, la misma acústica.

Queda una opción por comentar: la que consiste en modificar los valores límites de la escala en modo manual. Puede ser útil para concentrar todo el detalle del mapa en una zona en especial. Así, en el ejemplo anterior, podemos rebajar el valor superior para observar mejor el mapa en su parte exterior. Pero el uso más notable de esta opción es el siguiente: si varios usuarios están desarrollando sus diseños a partir de un mismo planteo, podemos pedirles a todos que fijen su escala en los mismos valores (por ejemplo: 70 dB a 90 dB). Así, podrán comparar todas sus imágenes entre ellos.

Aún así, es importante resaltar que los colores de la escala no han adquirido un valor absoluto. El programa no se puede utilizar para calcular valores reales, sino para comparar propuestas y optimizarlas. Permite perfeccionar una idea, pero no nos dirá nunca si esta idea es buena. Es más incompleto que cualquier programa evolucionado de acústica, pero ninguno de ello, en el estado actual, logra ser mínimamente fiable, y son todos lentos y difíciles. Radit2d ha sido aligerado al máximo para ser rápido e interactivo, y todo lo que hace es fácil de entender. Allí reside su originalidad y su calidad, y así se ha de aprovechar, para adquirir las bases y diseñar lo que sabemos, por experiencia, que mejorará la acústica de un lugar.

ÁREA DE TRABAJO

Podemos introducir varios cambios en la misma área de trabajo, al pulsar el botón izquierdo o derecho del ratón sobre los distintos elementos que contiene.

EL RECINTO

Se puede modificar con toda libertad, actuando sobre las paredes que lo componen o sobre los vértices que unen las paredes.

Las paredes: pulsando el botón derecho del ratón sobre una pared, aparece su menú. En las tres últimas líneas, se recogen informaciones sobre la pared: su longitud, el ángulo que forma con la horizontal y su factor de absorción. En las seis primeras líneas, aparecen las funciones siguientes:



Figura 26. Menú de opciones de las paredes del recinto

- **Split wall:** corta la pared en dos segmentos iguales. Es éste el modo común de añadir vértices al polígono del recinto. La operación se puede repetir tantas veces como sean necesarias.

- **Delete vertex**: es la operación inversa de la anterior. Los vértices límites de la pared se iluminan uno de azul, el otro de rojo. El vértice seleccionado desaparece.

- **Simetry:** duplica el recinto, con su simétrico respecto a la pared seleccionada, que desaparece.



Figura 27. Split wall

Figura 28. delete vertex

Figura 29. Simetry

- Change absorption: permite modificar la absorción, desde 0 % (pared perfectamente reflectora, se puede hacer directamente con "set absorption to 0%") hasta 100 % (pared totalmente absorbente, se puede hacer directamente con "set absorption to 100%"). Con una absorción de 100 %, la pared cambia de apariencia (línea punteada): es el modo de representar una apertura (puerta, ventana abierta,...). Si el valor de absorción viene seguido del símbolo "/", se afecta a todas las paredes.

Los vértices: al desplazar los vértices, con el botón izquierdo del ratón, aparecen informaciones arriba del área de trabajo: las coordenadas del vértice, la longitud de las dos paredes que une y el ángulo que estas forman con la horizontal.

Figura 30. Desplazamiento de puntos



EL MAPA

Figura 31. Menú del mapa



Los cuatro vértices que lo definen sólo se pueden desplazar. No se puede añadir vértices, ya que el mapa corresponde a una matriz y debe permanecer cuadrilátero, pero es posible superponer dos vértices, para conferir al mapa una apariencia triangular.

Pulsando el botón derecho encima del mapa, se accede a su menú, que consta de cinco líneas. La última da el área del mapa (exacta si el mapa se identifica con el cuadrilátero que lo enmarca, aproximada si está recortado por el recinto). En las cuatro primeras líneas, aparecen las funciones siguientes:

- **Precision:** determina la calidad del mapa. Conviene aumentarla rápidamente, para mejorar la visualización. No obstante, el tiempo de cálculo crece de modo exponencial, y hay que encontrar un buen compromiso (en un ordenador rápido: 200, por ejemplo). Se aconseja aumentar la precisión gradualmente, a medida que el proyecto lo necesite, y volverla a bajar siempre que se hayan de efectuar varias operaciones seguidas. Las precisiones más usuales se pueden definir inmediatamente con *"predefined precision"*.

- **Include room:** convierte el cuadrilátero del mapa en un rectángulo que incluye precisamente el recinto. Notemos que el valor de área indicado abajo del menú concierne siempre el cuadrilátero y no el mapa, que puede quedar reducido por los límites del recinto.

- **Reduce size:** convierte el cuadrilátero del mapa en un rectángulo más pequeño. Esta operación permite resolver un problema particular: cuando un vértice del mapa se sobrepone a un vértice del recinto, sólo éste se puede desplazar con el ratón. Reduciendo el tamaño del mapa, se recupera el control de sus vértices sin necesidad de tocar el recinto.





Figura 32. Include room

Figura 33. Reduce size. Estos tres gráficos forman parte del proceso para llegar a la dimensión deseada

LA FUENTE

La fuente se desplaza con el botón izquierdo del ratón. Con el derecho, se puede definir su posición numéricamente y cambiar el nivel de emisión.

EL RECEPTOR

El receptor se desplaza con el botón izquierdo del ratón. Con el derecho, se puede definir su posición numéricamente e introducir un valor de "shift" (**ver fig. 35**).

El "shift" es un parámetro particular, que necesita una explicación más detallada. De entrada, digamos que afecta solamente a los diagramas polares (no a lo mapas del área de trabajo) y que permite pasar a la tercera dimensión.

En el caso de una planta, la tercera dimensión, la altura, no está considerada en el mapa. Por lo tanto, este sólo será correcto si la fuente y el receptor están a la misma altura. Si no es el caso, necesitamos introducir la diferencia de altura entre fuente y receptor (lo que llamaremos el "shift") para corregir los cálculos. En efecto, ya que todas las superficies del recinto son por fuerza perpendiculares a la planta (se proyectan en ella como segmentos de recta), la diferencia de recorrido se obtiene entonces por simple aplicación del teorema de Pitágoras, donde ni siquiera importa el signo de esta diferencia (es igual que el receptor esté por encima o por debajo de la fuente, sólo importa la diferencia de alturas). Por esta razón, el valor del "shift" siempre se afecta al receptor.

El cambio resultante - generalmente poco importante - no afecta al mapa, pero sí al diagrama polar, donde permite una operación muy interesante: la suma de los niveles sonoros correspondiendo a puntos definidos de la planta de un recinto con los niveles correspondiendo a los mismos puntos en la sección. Desde luego, habrá que aplicar también el "shift" a la sección (esta vez, corresponderá a la diferencia de profundidad). Así, se obtiene el valor tridimensional del nivel sonoro reflejado.

Este cálculo sólo puede hacerse si las paredes laterales del recinto son verticales y si ninguna de sus superficies presenta una doble inclinación. Tal restricción admite ciertas acomodaciones. Así, si la pared del fondo es oblicua, se considerará como parte del techo y

no de los laterales. Del mismo modo, si los laterales son oblicuos y el fondo es vertical, se estudiará un corte paralelo al fondo en vez de la sección... Sin embargo, una sala debe estar diseñada esencialmente en planta y sección para que su análisis con Radit2d sea fácil y provechoso.

En la tercera parte, con la "campana acústica", se dará un ejemplo detallado del uso del "shift".



Figura 34. Definición de la posición de la fuente y del nivel sonoro. La fig. izquierda muestra el cuadro de selección de esta función. Una vez seleccionada, aparece en pantalla la fig. derecha, la cual expone el cuadro donde ingresar los valores que definirán la nueva posición de la fuente

Figura 35. Definición de la posición del receptor y del "shift". La fig. izquierda muestra el cuadro de selección de esta función. Una vez seleccionada, aparece en pantalla la fig. derecha, la cual expone el cuadro donde ingresar los valores que definirán la nueva posición del receptor

DIAGRAMA POLAR

El diagrama polar presenta, para el punto receptor señalado en el área de trabajo por la estrella, el resultado de los cálculos del programa de manera mucho más detallada que en el mapa. Moviendo la estrella, se pueden extraer tantos diagramas polares como se quiera y compararlos entre sí.





Figura 37. Menú Diagrama Polar

Con el botón derecho del ratón, se accede a un menú dividido en tres partes. En la primera aparece el nivel sonoro de la reflexión (L_p) , su ángulo de llegada con respecto al sonido directo (angle), su atraso con el mismo (delay) y, en la segunda, el número de la pared sobre la cual se presiona el ratón y su absorción.

Los primeros tres datos son muy valiosos, ya que nos informan completamente de cada reflexión.

Nivel sonoro: Como ejercicio, se recomienda sumar (con la calculadora de la función "utils") los niveles sonoros de todas las reflexiones del gráfico polar. El resultado debe corresponder a la indicación L_p^r , y luego a L_p si añadimos la contribución directa.

Ángulo: Cuando

el

caso estudiado corresponde a una planta, el ángulo es horizontal e indica si la reflexión es muy lateral (ángulo $> 45^{\circ}$) o no. Este es un parámetro muy importante en la acústica de salas contemporánea.

Atraso: Corresponde a la diferencia de recorrido reflexión/directo, dividida por la velocidad de propagación (340 m/s). Este parámetro nos puede prevenir de la presencia de un eco molesto. Para la inteligibilidad del discurso, se considera que no debería nunca superar los 50 milisegundos. Para la música, puede aceptarse un atraso de hasta 80 milisegundos. Estos valores son indicativos y no deberían tomarse al pie de la letra.

En la tercera parte, el menú incluye las funciones *print* L_p , *print angle* y *print delay*, que permiten hacer aparecer y luego desplazar sobre el mismo diagrama las indicaciones correspondientes, con el fin de mejorar la información y el aspecto de la imagen antes de imprimirla.

El mismo diagrama ofrece un menú con un mando único, *Change dB limits*, que permite modificar los valores extremos del gráfico. Es útil para comparar varios diagramas polares. En efecto, como en el modo automático de la barra de color, el programa adapta continuamente la escala del diagrama polar (aquí, de modo que su círculo mayor corresponda siempre al sonido directo). La función *Change dB limits* permite luego forzar la escala, para que corresponda siempre a un mismo gráfico de referencia.

El sonido directo aparece en línea punteada cuando está obstaculizado y no puede llegar realmente al receptor. Aún así, sirve de referencia para la escala del diagrama y para el cálculo del ángulo y del atraso de cada reflexión.



Figura 39. Función *Change dB limits.* Definición de los valores deseados

632

4 refl. S (3.5,0) R (16.5,0) $\Delta_{\mathbf{k}}$ =0 [66.7 58]

PARTE SEGUNDA EL ANÁLISIS

FUNCIÓN SCAN

Con Radit2d, el análisis acústico se realiza gracias a la única función que no hemos descrito con detalle hasta ahora, la que corresponde al botón "scan" de la barra de herramientas.

Esta función permite introducir en el programa un plano escaneado o realizado con otro programa (como Autocad).

Hemos renunciado a desarrollar nuestro programa para que traduzca automáticamente un fichero ".dxf" (por ejemplo) a su propio lenguaje, por la razón siguiente: la modelización acústica requiere un tipo de precisión muy distinto del que rige el dibujo clásico de arquitectura. Muchos detalles de un plano acotado han de desaparecer y otros deben introducirse con gran exactitud, tomándose decisiones particulares. La función "scan", bien utilizada, permite realizar la modelización a la par de la adquisición, cuáles sean las características de la imagen introducida, pensando siempre en el análisis acústico que se hará de ella. Por lo tanto, esta operación manual se hace tan necesaria como bienvenida, ya que la función "scan" es a la vez rápida y perfectamente adaptada a su propósito.

Una vez haya sido ubicado el plano por adquirir, aparece en el área de trabajo de la función. El usuario define entonces el polígono del recinto, marcando uno a uno sus vértices sobre el plano, como si trabajara con papel de calco.

Para los perfiles curvos, se buscan los trozos de círculo o de parábola que mejor se adapten a la curva, y el programa los transforma automáticamente en una serie de segmentos, cuyo número especifica el usuario. Tanto aquí como en el trazado general, el usuario debe buscar un equilibrio entre el número de vértices que va definiendo y la precisión del trazado. Hay que tomar en cuenta las observaciones siguientes:

- Todos las partes del recinto que no incidan en la acústica deben obviarse (los recovecos desde donde el sonido no puede volver hacia el público en una sola reflexión; el techo verdadero cuando sólo nos interesa el estudio del falso techo, aunque este consista en una serie discontinua de reflectores;...).
- Para un estudio en las frecuencias medias, no debe aparecer ningún segmento de tamaño inferior a uno o dos metros. En efecto, la reflexión especular se produce sobre superficies grandes con respecto a la longitud de onda del sonido incidente. Un sonido de 1000 Hz tiene una longitud de 0.34 metros. Se admite que la reflexión se hará de modo esencialmente especular si la dimensión mínima de la superficie es, por lo menos, dos o tres veces superior a esta longitud. Si no, el sonido se difracta, cosa que nuestro programa no puede tomar en cuenta. Por lo tanto, la dimensión mínima no debería bajar de un metro para 1000 Hz y de 2 metros para 500 Hz. Si estudiamos frecuencias más bajas, habrá que simplificar aún más el modelo. En

cambio, para frecuencias más altas, habrá que detallarlo más. En Radit2d, la elección de la frecuencia de estudio sólo se manifiesta a través de los coeficientes de absorción. En los estudios teóricos, optaremos siempre por una frecuencia media de 1000 Hz, y elegiremos coeficientes extremos (0% o 100%), para resaltar simplemente comportamientos generales.

- La observación anterior no vale para los segmentos de unión, que no representan una superficie real, sino que permiten cerrar el recinto, uniendo dos elementos separados (por ejemplo, dos reflectores). Estos segmentos han de considerarse perfectamente absorbentes. Tampoco vale para los segmentos que simulan una curva (ver punto siguiente).
- Las curvas han de simularse con el mayor número de segmentos posibles, para que las focalizaciones y las difusiones se visualicen bien en el mapa acústico. Sin embargo, el tiempo de cálculo aumentará en proporción, y se debe buscar un buen compromiso, según la velocidad del ordenador utilizado.

La función "scan" permite definir el polígono del recinto, ubicar la fuente y especificar una escala, con la cual el programa calculará las dimensiones de todos los segmentos. También se facilitan ciertas correcciones (pandeo, verticalidad y horizontalidad, ajustamiento de las curvas y de los vértices) y la introducción de curvas cóncavas o convexas.

Una vez el resultado introducido en el área de trabajo del programa, si bien podemos desplazar la fuente y el receptor o modificar los coeficientes de absorción, se hace difícil corregir el contorno del recinto, ya que sus vértices no se adaptan a ninguna trama. Por lo tanto, conviene reservar el uso de la función "scan" para las situaciones complejas. Para estudiar una forma geométrica simple, en cambio, se aconseja partir directamente del "estado inicial" en la zona de trabajo, como se ha visto en la primera parte y se volverá a hacer en la tercera: *la función "scan" es una herramienta de análisis, no de diseño*.

EJEMPLOS

Ejemplo 1: "Concavidad y convexidades"

- En la barra de herramientas, activar la función "scan".

Aparece una ventana del explorador, automáticamente ubicada en la carpeta *"samples"*, donde guardaremos todos los ficheros relativos a Radit2d (salvaguardias, dibujos escaneados, resultados,...).

Al instalarse el programa, se descargaron allí una serie de ejemplos y ejercicios que utilizaremos en estas notas.

here have	ed Magertle at 100 annie) - 6: e 죠-	
	National Science		
0			
6			
Ga			
1. K			
name.	- 1980 ED421	3 (***	
_	N. Debelante	el Groty	

Figura 40. Búsqueda de imagen en la carpeta "samples"

- Elegir el fichero Ejemplo1.jpg.

Este primer ejemplo consiste en un recinto de planta pentagonal que ha sido, a propósito, mal centrado en su imagen, y aparece muy reducido.

- Aceptar la sugestión de reducir el tamaño de la imagen.

Esta elección nos permite practicar un zoom en la imagen, para conservar solamente su parte útil. Pulsemos el botón izquierdo del ratón dos veces, primero arriba a la izquierda de la figura pentagonal y luego abajo a la derecha. La figura se agranda dentro del nuevo marco así definido. Si no nos agrada el resultado, podemos repetir la operación, hasta que la figura aparezca entera, ocupando la mayor superficie posible.



Figura 41. Opción zoom en la imagen



Figura 42. Imagen ampliada

- Una vez aceptado el zoom, entramos en el área de calco de la función scan.

Aquí, empezaremos a calcar la figura, marcando sucesivamente cada vértice del pentágono. Conviene girar en el sentido contrario de las agujas del reloj, pero no es estrictamente necesario. Si nos equivocamos, basta pulsar el botón derecho del ratón, y el último punto marcado desaparece (se puede así volver hasta el inicio).

Tras marcar el último punto, pulsar la letra "e" del teclado, y el polígono trazado se cierra sobre el punto inicial (si no responde el teclado, verificar que el Bloque de Mayúsculas esté desactivado).



Figura 43. Las líneas rojas son el resultado de haber calcado la figura

Podemos entonces ubicar la fuente con el botón izquierdo del ratón, y aprobar con el derecho cuando estemos satisfechos de su emplazamiento.

Podemos luego elegir una línea del dibujo como horizontal o vertical de referencia, para rectificar un eventual pandeo de la imagen importada. Si no interesa esta opción, basta pulsar el botón central del ratón.

Queda entonces por elegir un segmento cuya longitud conocemos, para indicar la escala del dibujo.





Figuras 44 y 45. Líneas verticales y horizontales que sirven de referencia para rectificar la ortogonalidad del dibujo





Figuras 46 y 47. Definición de la escala del dibujo

- *Tras definir la escala, salimos del área de calco* Nos encontramos entonces en una zona intermedia, donde podemos examinar la calidad de nuestro trazado. A menudo, las horizontales y verticales del plano no salen perfectas en el calco. Pulsando sobre los segmentos imperfectos con el botón derecho del ratón, aparece la propuesta "make vertical / horizontal" siempre que estén casi verticales u horizontales. Al confirmar con el botón izquierdo del ratón, el segmento se rectifica. Luego, podemos elegir entre el botón "save", que registra nuestro dibujo como un fichero ".ac", o el botón "update", que lo introduce directamente en el área de trabajo de Radit2d.



Figura 48. Zona donde se puede examinar la calidad del dibujo. Las líneas no ortogonales marcarán una opción para ser corregidas

- Activar "update"

Una vez introducido el ejemplo en el área de trabajo de Radit2d, podemos empezar su estudio. Primero, activamos el segundo indicador de la barra de visualización ("*decibels*"), para trabajar con el mapa de niveles sonoros. Luego, aumentamos la precisión del mapa hasta 200, para mejorar la calidad de las curvas de niveles. Ahora, podemos desplazar la fuente y comprobar los cambios en el campo sonoro y en cada una de sus contribuciones, activando sucesivamente cada pared del recinto. Al polígono del recinto actual, lo describiremos como totalmente *cóncavo*, es decir: no presenta ningún ángulo entrante; si seguimos su perímetro, siempre giramos en la misma dirección. Notemos que, en acústica, observamos siempre el recinto desde su interior, y lo describimos por lo tanto al revés de lo habitual en geometría. Así, llamamos cóncavo a los polígonos convexos (como nuestro pentágono), porque, vistos desde dentro, presentan solamente concavidades...



Figura 49. La figura está introducida en el área de Trabajo del programa y estas tres imágenes muestran el comportamiento de la fuente en diferentes posiciones con relación a diferentes paredes, las cuales están señaladas con color verde

- Desplazar el vértice superior del pentágono hasta el centro del recinto

El recinto presenta ahora una parte *convexa*, un ángulo entrante: si seguimos su perímetro en el sentido contrario a las agujas del reloj, giramos siempre a la izquierda, excepto una vez, allí donde aparece la convexidad.

Si volvemos a desplazar la fuente, notamos que los cálculos se hacen ahora más lentamente. Eso se debe a la eliminación de las "partes escondidas", que no existen en los recintos totalmente cóncavos, pero sí en los que presentan convexidades. El programa debe entonces comprobar cada pared del recinto, para controlar que no quede enmascarada por otras paredes.



Figura 50. Modificación del vértice del pentágono



- Ubicar la fuente de modo que aparezca una pared totalmente enmascarada.

Si activamos esta pared, se marca en rojo y vemos que su contribución al campo sonoro es nula.

Ejercicio 1: ubicar la fuente de modo que aparezca una pared parcialmente enmascarada (se marcará en cian).

Consejo: disminuir previamente la precisión del mapa, para acelerar los cálculos, y volverla a subir cuando se haya encontrado la solución. Utilizar la función "objects" para limpiar la imagen antes de imprimirla.

Figura 51. Pared enmascarada

Ejemplo 2: "Coeficientes de absorción"

- *Introducir en el programa Ejemplo2.jpg* Seguir los mismos pasos que en el ejemplo anterior.

- Modificar los factores de absorción

Una vez introducido el ejemplo en el área de trabajo de Radit2d, podemos ajustar los parámetros (escala en dB, precisión suficiente del mapa) y desplazar la fuente y el receptor para observar las características acústicas del lugar en el mapa y en los diagramas polares.

Luego, elijamos cualquier pared e introduzcamos como factor de absorción el valor "100/". Al hacer seguir este valor del símbolo "/", el cambio afecta a todas las paredes, que se convierten en líneas punteadas para significar una absorción total, del 100 %. Para volver a la situación anterior, cambiemos un coeficiente cualquiera al valor "0/", o retrocedamos en la lista de la función "*history*".

Podemos luego modificar uno por uno lo coeficientes de cada pared y observar los cambios en el mapa y en los diagramas polares.

En general, con Radit2d, sólo utilizaremos valores extremos (absorción nula o completa). Es posible tener en cuenta los materiales, e introducir sus coeficientes correspondiendo a la banda de frecuencias de 1000 Hz (por ejemplo), pero no hay que olvidar que los resultados de nuestro programa son parciales (sólo se considera la primera reflexión en un plano) y, por lo tanto, que carece de sentido buscar una precisión excesiva en el cálculo. Radit2d no está hecho para simular situaciones reales, con todos sus matices, sino para estudiar ideas básicas, y perfeccionarlas dentro de su generalidad.



Figura 52. Caso de referencia: comportamiento de la pared 7. En este gráfico, los factores de absorción de las paredes 1, 4 y 8 han sido llevados al 100%



Figura 53. Campo reflejado con un factor de absorción 0 en todas las paredes y la fuente en una esquina.

Nota: El número asociado a cada pared depende del orden seguido al calcar el dibujo.

Crear una ventana abierta en la pared oblicua, centrada y larga de dos metros. Una ventana abierta corresponde a un segmento totalmente absorbente (el sonido que sale por la ventana está perdido para la primera reflexión, como si hubiera quedado totalmente absorbido).

Para realizarla, activaremos primero la función "constrain", que forzará el desplazamiento de los nuevos vértices sobre la pared oblicua.

- crear tres nuevos vértices en la pared oblicua: utilizar "split wall" en esta pared, y luego en los dos segmentos resultantes. El vértice intermedio queda automáticamente en el centro de la pared oblicua.
- desplazar los dos nuevos vértices extremos de modo que cada uno quede a un metro del nuevo vértice central: controlar las distancias en las indicaciones superiores del área de trabajo ("*wall length*"). Con la función "*constrain*" activada, el desplazamiento de los vértices ya no queda sujeto a la trama del "*snap*", y se pueden desplazar libremente.
- suprimir el vértice central ("*delete vertex*"): la ventana queda definida, en medio de la pared oblicua.
- llevar la absorción de la ventana al 100%: ahora, aparece como un segmento punteado.
- Desactivar la función "*constrain*": si nos olvidamos de eso, pueden ocurrir luego fenómenos sorprendentes...





Figuras 54, 55 y 56. Construcción de una ventana centrada de dos metros de longitud, en la pared oblicua

Ejercicio 2:

- a) Buscar una posición de la fuente y del receptor desde donde el sonido directo quede enmascarado, producir el diagrama polar correspondiente y comentarlo (¿porqué el nivel sonoro directo no marca 0 dB?).
- b) Colocar la fuente y el receptor en las posiciones indicadas en el dibujo aquí al lado (aproximadamente). Averiguar si existe una reflexión con un atraso superior a los 50 milisegundos. Si se da el caso, modificar la absorción de



la pared correspondiente de modo que la contribución de la reflexión molesta quede unos 30 dB por debajo de la contribución directa. Comentar los resultados.

Consejo: pasar continuamente del mapa a los diagramas polares (se pueden crear simultáneamente varios de ellos) y viceversa. Cuidar la presentación de los resultados (para ofrecer al lector una descripción clara y completa de cada caso).

Ejemplo 3: "En los focos de la elipse"

Para trazar una elipse en la arena, basta disponer de dos estacas, un palo y una cuerda. Clavamos las dos estacas en cualquier parte del suelo: serán los dos *focos* de la elipse. Luego, atamos juntas las dos extremidades de la cuerda, de modo que forme un bucle, que pasaremos alrededor de las dos estacas. La cuerda debe ser lo suficiente larga para quedar aún floja en esta posición. La estiramos entonces con el palo, y empezamos a girar alrededor de las estacas, manteniendo siempre la cuerda bien tensa. El palo va trazando una elipse en la arena.

Podemos comprobar que los dos segmentos de cuerda que unen en todo momento el palo con sendas estacas forman el mismo ángulo con la normal a la elipse: es decir, conforman el esquema de una reflexión especular (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión). Eso significa que una onda emitida en uno de los focos se concentraría, tras rebotar sobre la superficie de la elipse, en el otro foco.

Los techos con forma elíptica constituyen el caso más espectacular de focalización acústica. Si dos personas se colocan en los focos, pueden conversar murmullando: se comprenderán perfectamente, mientras que una tercera persona, ubicada entre las dos primeras, no oirá nada. Se dice que tal sistema fue utilizado, en la edad media, para confesar a los leprosos...

Analizaremos seguidamente una planta elíptica.

- Introducir en el programa Ejemplo3.jpg

Para calcar la curva elíptica, utilizaremos segmentos de parábola. Marcar primero la extremidad derecha de la curva, y luego, un punto de la curva no demasiado alejado de esta extremidad: se dibuja un segmento que une los dos puntos marcados. Pulsar luego la letra "p" del teclado. Podemos entonces marcar donde queramos un tercer punto, y se dibujará en verde un segmento de parábola. Habrá que volver a intentarlo varias veces, hasta que este segmento se ajuste perfectamente a la porción de elipse que queremos calcar. Cuando estemos conformes, teclearemos "a" y se nos preguntará con cuantos segmentos de recta queremos simular la parábola que acabamos de definir (recordemos que Radit2d trabaja solamente con segmentos de recta: las parábolas que estamos manipulando sólo nos ayudan a *discretizar* de manera uniforme la elipse estudiada).



Repetiremos esta operación tantas veces como necesarias para calcar completamente la semi-elipse, y luego teclearemos "e" para cerrar el recinto con su eje. El calco de la curva requiere un poco de cuidado. El número de segmentos debe elegirse el más alto posible, en función de la velocidad de trabajo de nuestro ordenador. Conviene repetir el ejercicio varias veces: primero, con una aproximación basta de la elipse, y luego, aumentando la precisión, buscando el mejor compromiso entre la velocidad de cálculo y la calidad del dibujo final.



Figuras 57. Calco de la semi-elipse. En la imagen, se distinguen dos colores: rojo y verde. El primero marca los segmentos de línea aceptados por su calidad y el verde corresponde a la activación de la función "p" que nos ayuda a mejorar el calco, definiendo un nuevo segmento de parábola.



Figuras 58. Momento en el que asignamos el número de segmentos de recta con los que queremos simular la semi-elipse



Figuras 59. Semi-elipse finalizada

- Formar la elipse completa en el área de trabajo de Radit2d.

Para eso, basta pulsar con el botón derecho del ratón sobre el eje de la semi-elipse, y luego activar la función "*simmetry*" del menú que aparece.

De aquí en adelante, esta función nos será muy útil para introducir las plantas de salas simétricas: nos hará ganar mucho tiempo y, a su vez, nos asegurará que el modelo del recinto estudiado esté perfectamente simétrico.



Figuras 60. Simetría de la semi-elipse



Figuras 61. Elipse completado

- Colocar la fuente en un foco de la elipse.

Para eso, conviene primero averiguar que el gran eje de la elipse se superpone exactamente al eje horizontal del área de trabajo (si no es el caso, desplazar este eje). Luego, iremos moviendo la fuente sobre este eje, hasta que el mapa indique una focalización (en este caso, conviene trabajar con el indicador "reflections" activado).

La focalización se verá como una mancha, apareciendo en el otro extremo del eje, en posición simétrica a la fuente, que se irá siempre concentrando alrededor de un valor siempre más alto, a medida que la fuente se acercará de su propio foco.

Aumentaremos paulatinamente la precisión del mapa para mejorar su visualización y emplearemos el menú de la fuente para ajustar su posición numéricamente, hasta que se precise la focalización. Cuando lo hayamos conseguido, la fuente y el punto de focalización corresponderán a los dos focos de la elipse.





Figuras 62 y 63. En busca de la focalización

Ejercicio 3:

Colocar sucesivamente el receptor en diversos puntos de la elipse, incluyendo el segundo foco. Comentar los diagramas polares correspondientes. Armar una presentación con el mapa, los diagramas más interesantes y los comentarios.

Consejo: Utilizar el menú del receptor para ajustar numéricamente su posición, tras haber colocado el eje vertical del área de trabajo sobre el pequeño eje de la elipse para poder comprobar las simetrías. Guiarse con la disposición de las fuentes imágenes. Trabajar en reflexiones y no en decibelios. Comentar las diferentes etapas del proceso seguido para obtener el mapa final. Fijarse en el número de reflexiones que alcanzan el receptor.

Ejemplo 4: "Los techos ondulados"

Los techos ondulados, en forma de olas o de ondas sonoras, se han convertido en un cliché de la acústica moderna y los encontramos en numerosas aulas, salas de conferencias o bibliotecas (Alvar Aalto). Seguramente, el lector se sorprenderá si le revelamos que estos techos no han sido calculados acústicamente. En efecto, una evaluación manual de tales geometrías es penosa y siempre incompleta. Con Radit2d, es posible realizar un análisis mucho más preciso de tales situaciones.

Los techos ondulados están formados por partes cóncavas y partes convexas en alternancia. Las primeras pueden provocar focalizaciones, mientras que las segundas generan difusión: la reflexión que causan cubre un espacio mayor de lo que haría a partir de una superficie plana con las mismas extremidades, pero, forzosamente, la densidad del sonido reflejado disminuye.

- Introducir en el programa Ejemplo4.jpg

Seguir los mismos pasos que en el ejemplo anterior. Si es necesario, se puede utilizar, además de la aproximación con parábolas, la aproximación con segmentos de círculo (teclear "c" en vez de "p").

- Examinar la situación

Comprobamos que el techo tiene parte cóncavas y otras convexas. Estas últimas explican porqué el programa calcula mucho más lentamente que en el ejemplo anterior. Podemos desplazar la fuente y el receptor, observando cómo se modifican la posición de las imágenes, las curvas del mapa y las reflexiones en el diagrama polar.





Figuras 64. Calco de la imagen

- Desplazar ligeramente un vértice del recinto.

Ocurre entonces un cambio radical en el mapa (aparición de estrías de color cerca de las superficies convexas) que necesita una explicación particular.

Cuando se discretiza una curva convexa, la reflexión sobre los segmentos que la componen adopta la forma de haces separados. Es un efecto de la discretización, pues la reflexión sobre la curva continua es también continua. Aunque se aumente muchísimo el número de segmentos de discretización, este efecto permanece: los haces son más finos, pero siguen separados. El resultado es desastroso para el análisis, ya que complica sobremanera la apariencia visual del mapa, sin que eso corresponda a la situación real.





Figuras 66. Aplicación estricta de la teoría de las imágenes

Figuras 67. Corrección de convexidad

Figuras 65. Imagen finalizada

Para evitarlo, Radit2d incluye una corrección de convexidad, que desplaza ligeramente las fuentes imágenes para restablecer la continuidad de la reflexión y obtener un mapa nítido.

Sin embargo, esta corrección desaparece si se modifica la geometría del recinto (aunque ligeramente y en una zona apartada de la convexidad), y también si se desplaza uno de los ejes del área de trabajo. En caso de realizar equivocadamente uno de estos cambios, siempre se puede volver atrás con la función "history", y la corrección de convexidad se restablece.

Notemos que la separación de los haces, tal y cómo se observa en la aplicación estricta del método de las imágenes a una superficie convexa discretizada, nos indica, de un modo peculiar el grado de difusión generado por la superficie continua correspondiente: en ella, los haces se juntan y forman uno solo, pero su densidad sonora corresponde entonces al promedio entre la de los haces discretos y la de las zonas intermedias vacías. Por lo tanto, esta densidad es siempre inferior a la que produciría una superficie plana.

Ejercicio 4:

Analizar la sala, con especial atención a las posibles focalizaciones causadas por las superficies cóncavas, y a las difusiones generadas por las superficies convexas. Estudiar sólo el techo (todas las otras superficies se consideran totalmente absorbentes).

Consejo: Tratándose de una sección, conviene adaptar la cuadrícula del mapa a las gradas. Para eso, desplazar sus vértices de modo que se convierta en un fino rectángulo paralelo a las gradas y centrado a unos 90 centímetros de altura con respecto a ellas, para que represente las líneas de las cabezas del público.

Ejemplo 5: "Los reflectores"

En la mayoría de las salas de concierto, una serie de reflectores planos o convexos cuelga del techo para reflejar el sonido hacia las zonas más necesitadas del público. Forman así un "falso techo" discontinuo, que enmascara parcialmente el techo verdadero.

En el estudio acústico de esos reflectores, conviene simplificar al máximo el modelo del recinto, y completar el "falso techo" que definen con segmentos de unión absorbentes, en vez de relacionarlos con el techo verdadero. Además, el sonido que se refleja en el techo verdadero deberá probablemente volver a reflejarse varias veces antes de alcanzar el público, debido a las máscaras ocasionadas por los reflectores, y estas reflexiones múltiples, que alimentan la reverberación, no se toman en cuenta dentro de Radit2d.

- Introducir en el programa Ejemplo4.jpg



Figuras 68. Modelo bien diseñado

Figuras 69. Modelo mal diseñado

Aquí, hay que cuidar mucho el modelo del recinto, que se definirá en función de lo que se quiere investigar en el análisis acústico. De cualquier modo, un modelo parecido al de la figura 69 es inútilmente preciso, y cabe preferirle el de la figura 68.

- Analizar la contribución de los reflectores al campo sonoro.

Ya que sólo nos interesan los reflectores, conferiremos a todas las otras superficies del recinto un coeficiente de absorción del 100 %. Adaptaremos luego la cuadrícula del mapa a las gradas, como en el ejemplo anterior.

Activando sucesivamente cada reflector, podemos ver el área que cubre en el mapa. Si se recubren, veremos el resultado activando "all" en el menú superior de la barra de visualización. Finalmente, añadiremos el sonido directo, y compararemos el mapa resultante con el que genera la sola consideración del sonido directo, el cual sirve aquí de referente (no olvidarse poner la escala en modo manual).

Luego, emplazaremos el receptor en las zonas más características del mapa, en particular allá donde se combina el efecto de dos o más reflectores, para comparar las reflexiones.

Ejercicio 5:

Analizar el ejemplo 5, partiendo del archivo EJEMPLO 5.jpeg de la carpeta *"Samples"*. Describir los fallos de los reflectores y proponer una solución con su respectivo análisis acústico.

PROYECTO: "LA CAMPANA ACÚSTICA"

INTRODUCCIÓN

La idea que vamos a estudiar aquí es muy general, y se podría adaptar a muchos ambientes, incluso en exteriores. Se trata de un dispositivo desmontable para organizar clases o conferencias en una situación acústica desfavorable. No se pretende crear un recinto completo, sino, de modo más simple y ligero, armar y orientar unos cuantos paneles que dirijan lo mejor posible la voz del conferenciante hacia su público, de modo que éste oiga mejor a aquel.

Por lo tanto, las condiciones acústicas básicas (nivel de ruido, reverberación, aislamiento,...) dependen de factores exteriores al proyecto, ya que nuestro artefacto no aislará la clase del espacio donde se monte y, luego, no creará sus propias condiciones sonoras. Sólo podremos afirmar que estas mejorarán con respecto a la situación anterior. El estudio será puramente relativo, basado en una comparación de las distintas opciones entre sí y tomando como referencia la situación del sonido directo solo, haciendo abstracción de cualquier fenómeno acústico exterior, considerando solamente la primera reflexión especular sobre los distintos paneles del proyecto.

Como se verá, con tales criterios, es forzoso que el dispositivo tome la apariencia, en torno al conferenciante, de una "campana", una "concha" o un "retablo techado": de allí el título del proyecto.

El programa Radit2d se adapta particularmente bien a semejante proyecto, y nos permitirá llevarlo desde un planteamiento real hasta una propuesta constructiva completa.

Un proyecto basado en consideraciones acústicas consta siempre de dos partes: el diseño acústico y el diseño arquitectónico. El objetivo de este manual es explicar al usuario cómo desenvolverse con el primero, de modo que pueda armonizar con el segundo. Más se adquiere destreza en el diseño acústico, y más se recupera libertad para el diseño arquitectónico. En el ejemplo de diseño aquí presentado, sólo se desarrolla el planteo acústico, que va dejando márgenes de libertad importantes, donde la imaginación del arquitecto puede trabajar. Al lector le toca, por lo tanto, completar las ideas aquí esbozadas, para ir personalizando su proyecto.

DESCRIPCIÓN DE LUGAR



En el origen del proyecto, hay un problema de ocupación en el edificio de la E.T.S.A.V. de San Cugat. Esta escuela dispone de varias aulas teóricas, arriba de las cuales se ubican tres grandes salas de talleres. A veces, cuando todas las aulas están ocupadas, se hace necesario dispensar alguna clase en los talleres. Puede ocurrir también que un profesor quiera dar una charla o hacer una corrección pública en los mismos talleres, sin tener que trasladar a todos sus alumnos hacia la planta de las aulas teóricas.

Para el proyecto se eligió una de las salas de talleres: la "**P3**". Tiene unos 14 metros de ancho por 19 metros de longitud, con una altura útil de aproximadamente 3.5 metros (ver planta y sección).

El piso es claro y liso, y constituye naturalmente un reflector acústico casi perfecto.

Las paredes macizas son de ladrillos pintados en blanco, con algunas pizarras.

Las ventanas del lado derecho (con respecto a las entradas principales) son altas, sobre repisas de madera. Forman una superficie continua.

Las ventanas del lado izquierdo son pequeñas, hundidas en la repisa. Forman una disposición interrumpida, que da una fuerte sensación de ritmo monótono (intervalos constantes entre ventanas iguales), que contrasta con la continuidad de las ventanas opuestas.

Los accesos son tres: dos principales, de parte y otra de la pared que separa la sala de las escaleras, más uno en el fondo de la sala.

La estructura de columnas y vigas del edificio alterna con el ritmo de las ventanas y lo refuerza. Esta estructura soporta el sistema de iluminación artificial, que consiste en líneas de fluorescentes colgando de las jácenas.

Sobre ella se levanta un gran lucernario transversal, que aumenta la luz natural, por reflexiones múltiples sobre sus superficies blancas difusas, las cuales se suman a la luz directa de las ventanas.

Las separaciones internas se consiguen esencialmente con los casilleros de los alumnos, biombos y pizarras móviles. Las mesas y los taburetes, que forman el resto del mobiliario, se distribuyen libremente, según las actividades desarrolladas. Por lo tanto, la sala de talleres es, esencialmente, un espacio flexible.





La situación acústica de este gran espacio y de las salas de talleres restantes es muy deficiente, pues el nivel de ruido generalmente alto y la importante reverberación dificultan el hacerse oír por las cuantas decenas de estudiantes que forman la clase.

Para entender mejor el problema, resumamos los resultados de una serie de mediciones acústicas efectuadas en noviembre de 2002 por Victor Garrido, para los autores de estas líneas.

En la sala elegida, el promedio de los tiempos de reverberación medidos en tres puntos de la sala por bandas de tercio de octavas es, en presencia de unas ochenta personas, de 1.3 segundo en la banda de 1000 Hz. En una situación muy calma, el nivel de ruido es de unos 45 dB, y sube fácilmente hasta los 80 dB cuando se arma algún bullicio entre los estudiantes.

Por comparación, en un aula teórica vacía, el tiempo de reverberación supera 1.8 segundo a 1000 Hz, mientras que el nivel de ruido está por debajo de los 30 dB.

Estas medidas coinciden con la observación de que las aulas teóricas son más tranquilas que las salas de talleres, pero que resulta espantoso para dos o tres personas reunirse en una de estas aulas vacías para entablar una conversación. Sin embargo, si juntamos en la misma aula unas treinta personas, comprobamos con las mediciones que el tiempo de reverberación baja muchísimo, como es natural en una sala pequeña, y se estabiliza alrededor del segundo, valor ideal para dar una clase.

En cambio, el problema de las salas de talleres es que, a pesar de que partimos de una reverberación menor en el recinto vacío, habría que reunir en ellas centenares de personas para rebajar el tiempo de reverberación hasta un valor óptimo, debido al cambio de escala. Por la misma razón, sería muy costoso resolver el problema con materiales absorbentes, ya que haría falta cubrir con ellos superficies muy extensas para que su influencia sea perceptible.

El nivel de ruido tampoco se puede controlar, ya que el acceso de los talleres debe siempre quedar libre para todos los estudiantes de la escuela que deseen trabajar allí.

CRITERIOS Y REQUISITOS

Todo el proyecto descansa sobre una idea acústica elemental, pero que traerá, en la delicada situación propuesta, dos consecuencias muy benéficas, las cuales nos aseguran que el montaje producirá la mejora acústica que buscamos.

Se trata de dirigir, mediante unos paneles reflectores planos bien ubicados y bien orientados, la mayor cantidad posible de la voz del conferenciante hacia el área mínima donde podamos sentar unos sesenta alumnos, lo más apretados posible.

Por una parte, el nivel sonoro aumentará para ellos, gracias al sonido así reflejado, y oirán la voz del conferenciante amplificada. Desde luego, conviene **dirigir las reflexiones** en especial hacia las zonas más deficientes del público (las más alejadas), con el fin de obtener un campo sonoro (sonido directo + reflexiones) lo más uniforme posible.

Por otra parte, si **los 60 estudiantes están sentados apretados** en una zona reducida, formarán un conjunto muy absorbente, y nos aseguraremos así que el sonido dirigido hacia ellos quedará luego absorbido, y no alimentará posteriormente la reverberación de la sala, ya de por sí excesiva. Eso nos permitirá evitar totalmente el típico problema que surge cuando se amplifica la voz del conferenciante en un recinto reverberante: por mucho que se aumente el nivel sonoro, la reverberación sigue alterando el discurso; el resultado, entonces, es que se oye muy bien, pero no se entiende nada. Además, los otros ocupantes de la sala quedan tan aturdidos como el mismo público del conferenciante, cosa que no nos podemos permitir en el presente caso.

En efecto, el segundo requisito, tras el acústico, es que nuestro **montaje no debe perjudicar las otras actividades** que se desarrollen en la sala. Eso implica dejar pasos cómodos alrededor del dispositivo, y poderlo desmontar fácilmente para liberar, cuando necesario, la totalidad del espacio ocupado.

El tercer requisito concierne el desarrollo de la clase. Podemos **forzar el profesor a ocupar una posición fija y precisa**, lo cual es necesario para que las reflexiones estén bien dirigidas, pero debemos trabajar con un margen de tolerancia, en particular, desde luego, en lo referente a la altura física del conferenciante. Por muy apretados que se encuentren los **alumnos, deben sentirse mínimamente cómodos**, y el profesor debe quedarse a una **distancia agradable** de ellos y de los paneles (no conviene pegarlo a la primera fila ni arrinconarle en un ángulo agudo, por muy positivo que resulte eso para la acústica). Conviene también poder realizar **proyecciones sobre la pared trasera** del "escenario" y facilitar los accesos, tanto para el profesor como para los alumnos.

Finalmente, se impone un requisito estético: a pesar de que el dispositivo proyectado sea esencialmente funcional, hay que encontrar el modo de que su **aspecto visual sea elegante, agradable y seguro**, para evitar a los usuarios el sentirse parte de un simple – y quizás inquietante - experimento acústico. Aunque el recinto construido sea incompleto, su interior debe ostentar un diseño tal que los usuarios lo consideren realmente como una clase, donde les sea gustoso pasar largos momentos seguidos.

PRIMEROS CROQUIS

¿Cómo empezar un diseño acústico?

En primer lugar, debido a las características del sonido y de su propagación, resulta imprescindible, siempre que un diseño tenga que respetar un criterio acústico, enfocar hacia ello las primeras etapas del proyecto. En efecto, el sonido no se maneja con la misma soltura que la luz, y el campo sonoro queda esencialmente determinado desde los primeros trazos del diseño. Es muy improbable que una geometría acústicamente deficiente pueda corregirse posteriormente.

Generalmente, conviene empezar por estudiar en planta la relación entre el *escenario* (el lugar ocupado por el conferenciante, la *fuente*) y la *audiencia* o *público* (el lugar ocupado por los oyentes, los *receptores*). Una definición rápida de la sección longitudinal permite completar esta primera decisión: ¿cómo se percibirá la fuente desde el público?, ¿y viceversa?

En esta etapa, los requisitos visuales suelen corresponder a las necesidades acústicas: se oye mejor a lo que se ve bien. No siempre es así en etapas posteriores (particularmente en el caso de salas de ópera, donde se originan a veces conflictos entre los intereses del ojo y los del oído).

Aquí, el segundo requisito nos prohíbe el uso de las gradas, y probablemente del suelo sobreelevado en el escenario, ya que estos dispositivos complicarían mucho el desmontaje. Por lo tanto, el estudio en sección se reducirá básicamente al diseño del techo.

Reflexionaremos un poco sobre las posibilidades geométricas elementales del diseño. Para discutirlas, recordaremos que las primeras reflexiones las más fuertes, las que buscamos, son las que tienen el recorrido más corto. Se producen por lo tanto:

a) muy cerca de la fuente (diseño del escenario): estas reflexiones pueden dirigirse fácilmente hacia la totalidad del público. Generalmente, un escenario está constituido por un techo, un suelo, dos laterales y una pared de fondo. Analizaremos por lo tanto las posibles reflexiones que ahí se producen:



- <u>sobre la pared trasera:</u> (justo detrás de la fuente): un fondo de escenario quita profundidad al escenario, pero es excelente para la acústica: se utilizó en el teatro antiguo, antes de que el desarrollo de la escenografía ilusionista obligara a alejar esta pared hacia atrás, quitándole su valor acústico



- <u>sobre el techo:</u> el techo puede arrancar, sobre el escenario, con la inclinación necesaria para orientar debidamente la reflexión del sonido



- <u>sobre el suelo</u>: sólo se puede aprovechar si hay gradas en el público (recordar la orquestra del teatro griego).



- <u>sobre las paredes laterales</u>: tienen que formar un "embudo" abierto hacia el público y en ningún caso ser paralelas entre sí (a no ser que sean absorbentes o difusoras, cargadas con detalles arquitectónicos capaces de romper la reflexión especular).



b) muy cerca del receptor: son muy útiles para este receptor en particular. Conviene por lo tanto disponer paneles cerca de los espectadores más alejados, es decir *en el fondo de la sala*. Estando el suelo ocupado por el público, sólo quedan tres elementos por considerar en el diseño de éste:

- <u>la pared del fondo:</u> si la sala es larga, conviene inclinarla, para impedir que el sonido vuelva hacia el escenario, donde podría crear un eco (atraso superior a los 50 ms.)

- <u>el techo:</u> en su final, éste puede inclinarse fuertemente, para orientar la reflexión hacia las últimas filas, e incluso confundirse con la pared del fondo, si ésta ha de inclinarse también.

- <u>los laterales:</u> si se aprovechan al máximo, el fondo del recinto se asemeja al escenario: adopta también una forma de embudo, pero invertido.







c) en un punto intermedio entre el escenario y el fondo de la sala. Estas reflexiones suelen ser más atrasadas y, por lo tanto, menos fuertes. Sin embargo, se puede recurrir a ellas para reducir algún defecto de uniformidad en el campo sonoro, sobre todo si la parte del público afectada se encuentra cerca de estas paredes.



- sobre el techo: especialmente útil para reforzar el sonido en los asientos centrales de la audiencia.



- sobre las paredes laterales: especialmente útil para reforzar el sonido en los asientos laterales próximos a estos paneles. También pueden servir para reforzar el sonido lateral. Las reflexiones suelen atenuarse al rozar el público, y llegan con más dificultad los а espectadores centrales (a no ser el escenario que esté sobreelevado, o que las paredes estén inclinadas hacia adentro).

A partir de estas indicaciones, podemos discutir las formas generales de planta y buscar la más adecuada para los requisitos de nuestro proyecto.

Planta circular

Para el público, una disposición circular ofrece la mayor proximidad a la fuente. Sin embargo, el sonido reflejado es muy pobre: sólo se puede aprovechar el techo y la pared cilíndrica del contorno, pero esta última crea una focalización en el centro y resulta casi obligatorio hacerla absorbente. Esta disposición se podría imaginar para un concierto informal ante un público limitado. Notemos en este caso que, para los sonidos de alta frecuencia, el cuerpo del instrumentista – o del conferenciante – hace pantalla y se ha de compensar la pérdida de sonido directo, para los que lo tienen de espaldas, con un reflector suspendido. Desde luego, no es posible hacer proyecciones.



Planta semi-circular

Con una planta semi-circular, obtenemos dos ventajas: todo el público está frente a la fuente y podemos elevar una pared reflejante detrás de la fuente (fondo de escenario). Sin embargo, el público de los extremos laterales no puede ver bien y el conferenciante no tiene nunca una visión global de su público. La disposición del teatro antiguo ofrece una solución acústica y visual: se deja un espacio radial libre (la "orquestra") entre el escenario y el público, donde se produce una segunda reflexión útil, que compensa ampliamente (desde un punto de vista acústico) la pérdida de espacio para el público. No obstante, esta disposición no permite escenografías con carácter ilusionista (escenario estrecho y alargado), y las proyecciones no se aprecian desde las zonas laterales. Además, la obligación de disponer gradas y un escenario sobreelevado complica excesivamente el montaje.



Planta en abanico

Es la disposición ideal del escenario: el fondo y las dos paredes laterales pueden ubicarse muy cerca del conferenciante, con la única limitación de que la pared del fondo sea suficientemente ancha para permitir las proyecciones. Observamos que la parte útil de las paredes laterales está en el escenario, y que no sirve, por lo tanto, prolongarlas hasta el fondo de la sala. Este diseño presenta dos ventajas notables: permite un aforo considerable y escenografías ilusionistas (todo el público mira un solo punto).



Planta rectangular

En una planta rectangular, observamos que las reflexiones útiles se producen en las paredes laterales que envuelven al público y no sobre el escenario. Estas reflexiones son más laterales que en el caso anterior, y crece la percepción de un sonido envolvente, que es especialmente bienvenida para la música. Sin embargo, hay que evitar el paralelismo de las paredes laterales en el escenario, donde los múltiples rebotes provocarían un eco fluctuante (el equivalente sonoro de las imágenes múltiples que se ven entre dos espejos paralelos, con la diferencia que la velocidad lenta del sonido provoca réplicas sucesivas y no simultáneas, y que en ciertas frecuencias se establecen ondas estacionarias). Por eso, muchas buenas salas de concierto tienen una planta de forma mixta, con un escenario abierto en abanico hacia una sala rectangular. Sin embargo, observamos que los tramos finales de las paredes laterales siguen inútiles para la primera reflexión.



Planta en abanico invertido

Esta es una solución deplorable en cuanto al aforo (se pierde mucho espacio visualmente bueno en el fondo de la sala), pero óptimo para las reflexiones laterales. Por eso, esta forma se utiliza mucho en salas de conciertos modernas, pero enmarcada en un sistema de terrazas, para recuperar espacio. Como la primera reflexión lateral se hace muy atrás, esta forma resulta óptima para cerrar el recinto, reforzando el sonido en las últimas filas.



Planta octogonal

En este proyecto, suma todas las ventajas de las plantas anteriores, y nos permite orientar las primeras reflexiones con la máxima eficacia:

- escenario en abanico: nos da tres reflexiones útiles (una trasera y dos laterales) que pueden llegar a cubrir toda la audiencia; permite las proyecciones; es fácil de montar (por ejemplo, se puede abrir y cerrar como un retablo).
- cuerpo rectangular: da espacio suficiente para el aforo requerido; las filas de sillas se pueden disponer mucho más fácilmente que en cualquier otra disposición (en el caso de un abanico, haría falta un plan de instalación); las paredes laterales pueden dar reflexiones útiles, pero es muy probable que podamos prescindir de ellas con un buen diseño del techo).
- Fondo en abanico invertido: es una réplica del escenario, que nos ayudará a reforzar el sonido en las últimas filas, las más necesitadas; delimita claramente el recinto, que parecerá conformar un todo, aunque tenga grandes aperturas laterales.



SUMA DE LAS PRIMERAS REFLEXIONES

REFLEXIONES DEL ESCENARIO



REFLEXIÓNES Y SONIDO DIRECTO. Si queremos mejorar la acústica de un recinto, debemos intentar lograr la mayor uniformidad posible. Sin embargo, el gráfico de la izquierda sólo muestra la primera reflexión. En el gráfico de la derecha, donde se ha añadido el sonido directo, la uniformidad anterior desaparece. Por lo tanto, para obtener una solución óptima, habría que enviar más sonido reflejado hacia las últimas filas del público, sacrificando las primeras, que ya se benefician del campo directo.

Disposición del público

Ya que la audiencia tendrá una forma rectangular, sólo nos queda por decidir si su mayor dimensión será paralela o perpendicular al escenario. Ambas soluciones presentan ventajas e inconvenientes:





- <u>con más columnas que filas</u>, el público queda más cerca de la fuente; sin embargo, los espectadores laterales ven menos bien las proyecciones y, sobre todo, el profesor no puede abarcar toda la clase en una sola mirada, con lo cual puede desconcentrarse o perder el control visual de una parte del público, que se sentirá luego apartado.

- <u>con más filas que columnas</u>, el público se aleja hacia atrás; sin embargo, la reducción correspondiente del sonido directo puede compensarse con un buen diseño del techo; en caso de un aforo importante, se haría sentir aquí la necesidad de unas gradas.



En este estudio, elegiremos la primera opción, dejando al lector estudiar la segunda y comparar sus resultados con los que expondremos a continuación.

DISEÑO EN PLANTA

Superficie del público.



Para determinar la superficie del público, partimos del área ocupada por cada uno de los asientos a utilizar en el proyecto. Una vez determinado este valor, hay que sumarle el espacio entre sillas y entre filas, más un pequeño margen de tolerancia que nos permita llegar a números exactos, fáciles de manejar con el programa.

Posición óptima de la fuente.

Para obtener una distribución equilibrada del sonido reflejado, trazamos una directriz en el punto medio del público y ubicamos sobre ésta la fuente de sonido. Definimos luego las distancias entre la fuente y el público y entre la fuente y la pared del escenario. Para la primera, recordemos que entre más cerca esté la fuente del público, mejor se oirá. Sin embargo, por comodidad del conferenciante y de los espectadores ubicados en las primeras filas, no podemos dejar una distancia demasiado corta, y ciertamente no inferior a un metro, para permitir al conferenciante lograr una visión global del público.

La pared del escenario es uno de los mejores recursos para dirigir fácilmente el sonido reflejado hacia la totalidad del público. No obstante, como ya hemos dicho, quita profundidad al escenario y limita la ilusión perspectiva. Sin embargo, para la "Campana Acústica", la escenografía no es un punto a considerar, pues únicamente se necesita una pared plana y regular donde hacer proyecciones; por lo tanto, trataremos de ubicar la pared del escenario lo más cerca posible del conferenciante, dejándole solamente espacio libre para desplazarse. Además, tomaremos en cuenta el ángulo de visión de los espectadores ubicados en los costados y la posibilidad de hacer dobles proyecciones. Las medidas que utilizaremos son:





El primer paso a seguir consiste en encontrar la forma que adoptará la campana, tomando como criterio: generar un gráfico del sonido reflejado con manchas uniformes, con los colores referidos a los valores más altos posibles, en la escala previamente definida por nosotros, y conseguir que las filas del público más beneficiadas sean las últimas. Mientras jugamos con el programa, iremos encontrando opciones que posteriormente compararemos para determinar cuál es la óptima para nuestro proyecto. Veamos las opciones 1,2 y 3:

- Opción 1: las manchas son poco uniformes y, de acuerdo a la escala, en este recinto el sonido reflejado oscila entre los 74 y 78 dB. Recordemos

que las filas que más interesan son las últimas y en este gráfico vemos como la posición de las paredes genera la acústica más pobre en la parte trasera del público. Pensando en la parte estética, en esta opción las dimensiones de las paredes son muy largas y el espacio en general se vuelve grande y pesado.

- Opción 2: en este caso, logramos una mejoría notable. Sin embargo, las últimas filas del público continúan siendo las menos beneficiadas. Observamos los valores más bajos en la parte trasera, especialmente en las esquinas.
- Opción 3: las manchas son mucho más uniformes. Logramos llegar hasta los 79 dB en las primeras filas y sólo perdemos 3 decibelios en la parte trasera. Únicamente identificamos una ligera pérdida de sonido en los laterales, debido a que no todas las paredes reflejan el sonido hacia allí. Podremos compensar este ligero defecto con reflectores colgantes.

Por lo tanto, entre estas tres opciones, escogemos la tercera, por presentar más puntos positivos que las restantes.

Análisis de la Opción 3

Lo ideal para nuestro diseño es que cada pared cubra totalmente el área ocupada por el público. Si el caso no se presta a ello, nos conformaremos con que el sonido reflejado beneficie a la última fila, puesto que las primeras son favorecidas por el sonido directo.

- El escenario

Los gráficos nos muestran que las paredes llevan el sonido reflejado hasta las últimas filas, y cubren además un buen porcentaje de los costados, por lo tanto en conjunto se logra expandir el sonido por todo el recinto.



- Las últimas filas

Esta parte del recinto suele ser la más difícil de mejorar acústicamente. Sin embargo, en los gráficos, vemos como las paredes por sí solas cubren casi toda el área del público. Las partes que quedan sin sonido reflejado son precisamente las más próximas al escenario.



La tercera opción cumple básicamente con los requerimientos del proyecto. Sin embargo, ésta no es más que un punto de partida para llegar a la respuesta acústica más acertada.

Aquí, nos limitamos a exponer una idea general de trabajo, que permita desarrollar el proyecto. El lector que practique el programa encontrará seguramente soluciones mejores, y podrá además tener en cuenta aspectos geométricos aquí obviados (por ejemplo: tener en cuenta la ubicación óptima de un cañón de proyecciones).

DISEÑO EN SECCIÓN

Altura de la fuente y de los receptores

Para posicionar la fuente, consideramos una persona de estatura media, con 1.65 metro de altura. Partiendo de ello, definimos que su boca está, más o menos, a unos 15 centímetros por debajo, tal como lo muestra el gráfico. En el caso del receptor, utilizamos a la misma persona sentada. Sus oídos se ubican entonces a 1.25 metro del suelo, aproximadamente.



Diseño del techo

El techo juega un papel muy importante, pues puede reforzar el trabajo acústico de las paredes, especialmente en aquellos sectores donde éstas se muestran deficientes. Los criterios a seguir serán: obtener longitudes y ángulos que lleven el sonido reflejado hasta los sectores menos logrados en planta. Por lo tanto, llevamos aquí toda la atención hacia las áreas que cada porción de techo cubre. Después de estudiar varias opciones, llegamos a la respuesta siguiente:





Las dos paredes verticales y el techo del escenario cubren todo el público. El reflector colgante cubre la zona central, deficiente en planta, y el techo del fondo cubre las últimas filas, siempre más necesitadas.

COMPROBACIÓN EN TRES DIMENSIONES

Para saber como funciona nuestro "diseño acústico", debemos ahora armonizar los cálculos presentados en planta y en sección, para poder sumar sus contribuciones y obtener así valores tridimensionales que nos ayudarán a controlar la calidad y la uniformidad del campo sonoro reflejado resultante. Para ello, elegimos seis puntos repartidos en el público y, para cada uno:

- introducimos, en planta, como valor "shift" del receptor, la diferencia de altura entre fuente y receptor (0.25 metro).
- introducimos, en sección, como valor "shift" del receptor, la diferencia de coordenada horizontal entre fuente y receptor (0 metro sobre el eje, 4 metros en los laterales).

Obtenemos entonces los resultados siguientes:



POSICIÓN 1





POSICIÓN 5









POSICIÓN	COORDENADAS DEL	L^{d}_{p}	\mathbf{L}_{p}^{r}	L^{tot}_{p}	
	RECEPTOR	_	_	_	
P1	P(0, 3, 0.25) S(3, 1.25, 0)	85.4 dB	82.7 dB	87.3 dB	
P2	P(0, 5, 0.25) S(5, 1.25, 0)	78.1	81.6	83.2	
P3	P(0, 7.5, 0.25) S(7.5, 1.25, 0)	73.4	79	80.1	
P4	P(4, 7.5, 0.25) S(7.5, 1.25, 4)	71.8	78.6	79.4	
P5	P(4, 5, 0.25) S(5, 1.25, 4)	74.5	79.8	80.9	
P6	P(4, 3, 0.25) S(3, 1.25, 4)	76.4	80.5	81.9	
$\mathbf{P} = \text{planta} \ \mathbf{S} = \text{sección} \ \mathbf{L}_{p}^{d} = \text{sonido directo} \ \mathbf{L}_{p}^{r} = \text{sonido reflejado} \ \mathbf{L}_{p}^{\text{tot}} = \text{sonido total}$					

Si los ejes de la planta y los de la sección se corresponden, y si no nos equivocamos en el valor del "shift", el nivel sonoro directo debe tener el mismo valor en la planta y en la sección: lo reportamos en la primera columna del tablero.

Luego, sumamos (con la función "útil – dB sum" del programa) los valores de nivel sonoro reflejado correspondiendo a la planta y a la sección: obtenemos así el nivel sonoro reflejado total, que reportamos en la segunda columna del tablero.

En la tercera columna, sumamos los valores de las dos primeras, obteniendo el nivel sonoro total (directo + reflexiones en planta + reflexiones en sección), que corresponde realmente, aquí, al nivel esperado, ya que nuestro artefacto no presenta paredes inclinadas o reflectores con doble inclinación, y las reflexiones múltiples deberían ser escasas (casi toda la energía reflejada se dirige hacia el público, que la absorbe).

Los resultados de los gráficos polares nos muestran que, solamente en la primera posición (P1), el nivel sonoro directo supera el nivel reflejado (campo directo). En las otras posiciones, el sonido reflejado supera el directo (campo reflejado), es decir que la arquitectura interviene.

En el campo reflejado, los niveles son bastante uniformes (entre 79 y 83 dB) y, en el punto más alejado de la fuente (P4), se ha obtenido una ganancia superior a 7 dB. Ciertamente, estos resultados podrían aún mejorarse, optimizando el diseño, pero son ya representativos de las características acústicas que se pueden alcanzar con la opción elegida (un público con más columnas que filas): sería interesante compararlos con la otra disposición del público (más filas que columnas), donde la situación de partida es más deficiente (espectadores más alejados), pero donde las posibilidades acústicas del artefacto son superiores (laterales del escenario más cercanos a la fuente, mayor espacio disponible para los reflectores colgantes).

Al lector le toca, ahora, transformar este diseño esencialmente acústico en un diseño arquitectónico completo...

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO ACÚSTICO













PLANTA DE LA CAMPANA ACÚSTICA

SIN ESCALA

ESCENARIO





FONDO





EXTERIORES AÉREOS



EXTERIORES LATERALES



