

Percepción espacial de una sala de conciertos mediante su acústica arquitectónica: modelos matemáticos para su simulación

F. del Ama^a y J. A. Hernández^{a,b}

^a Prof., División de Arquitectura, E.P.Superior. U.S.P., Boadilla del Monte, Madrid.

^b Prof. Tit. Univ., Dpto. de Matemática Aplicada, E.T.S.I. Aeronáuticos, Madrid, 28040.

RESUMEN: La percepción espacial de un espacio arquitectónico se puede potenciar mediante las propiedades acústicas del mismo. Las reflexiones tempranas que se producen en las paredes laterales y en el techo o paneles reflexivos se usan para reforzar la sensación de un espacio cerrado. El control del retardo entre la primera reflexión y el campo directo permite crear una sensación espacial de amplitud. Además, la presencia de la reflexión difusa origina en el espectador una sensación envolvente.

La simulación mediante modelos matemáticos y los ensayos en maquetas a escala son necesarios para predecir el comportamiento acústico de una sala de conciertos antes de su construcción. En los últimos años se han utilizado modelos matemáticos, basados en la técnica de trazado de rayos, para predecir el comportamiento de una sala mediante el uso del ordenador. Sin embargo, el estado del arte de la simulación acústica no parece estar lo suficientemente avanzado como para confiar en los resultados que se obtienen del ordenador.

El objetivo de esta publicación es revisar los modelos matemáticos que se utilizan actualmente para la simulación acústica de salas e identificar sus limitaciones. Generalmente, un método de trazado de rayos no incorpora de manera natural la difracción. Para paliar esta limitación, se propone un modelo de simulación basado en la ecuación de ondas que permite simular de forma natural la difracción de las ondas en objetos o paneles reflexivos. Además, se proponen geometrías formadas por elementos puramente reflexivos como mecanismos de generación de difracción con objeto de crear un campo difuso. En este artículo también se revisa el método de las elipses, como método generador de plantas y secciones, para crear espacios con propiedades de percepción uniformes.

ABSTRACT: Spatial perception of an architectural project can be reinforced by means of acoustical design considerations. Early lateral reflections are responsible for acoustical envelopment. Delay between direct sound and first reflections can be controlled to modify the sensation of spaciousness. Besides, diffusive reflections can be created to increase envelopment sensation.

Simulation by means of mathematical models are necessary to predict acoustical performances before construction. In late years mathematical models based on ray tracing techniques have been used to predict acoustical performances.

The aim of this paper is to revise mathematical models used for acoustical simulations and to identify their limitations. Generally, models based on ray tracing techniques need to incorporate some algorithm to take diffraction into account. A numerical simulation model based on the wave equation is proposed to overcome this limitation. Besides, diffraction is proposed as a mechanism to create diffusion. Finally, a geometrical construction to generate acoustical spaces with homogeneous spatial perception is discussed.

1. INTRODUCCIÓN

La geometría interior y los materiales que conforman el acabado de un espacio interior son los parámetros con los que cuentan los arquitectos para otorgar “carácter” a una sala de conciertos. Hasta mediados del siglo XX, el único parámetro objetivo que se consideraba para calificar a una sala era el tiempo de reverberación. En 1967 Marshall definió el concepto de las reflexiones tempranas y su importancia en la impresión espacial. Los dos factores más importantes para provocar esta impresión espacial son : *(i)* el retardo que sufre la primera reflexión con respecto al campo directo y *(ii)* el ángulo que forman la dirección de propagación del campo directo y del campo reflejado. Las reflexiones tempranas en salas contribuyen a mejorar la claridad, la intimidad y el volumen. Además, cuando estas reflexiones son laterales y el campo reflejado es difuso se mejora el carácter envolvente de una sala. Es bien conocida la importancia de la difusión en la percepción acústica [7]. Además, las superficies difusoras evitan las concentraciones de sonido no deseadas en una sala. Sin embargo, todavía no se ha llegado a la formulación de parámetros objetivos que permitan medir la difusión del campo reflejado.

La mayoría de los programas informáticos de acústica de salas utilizan métodos basados en el trazado de rayos o trazado de haces [3] que se basan en la reflexión especular. Otros métodos incorporan la radiosidad de las diferentes superficies. El trazado de rayos ha mostrado ser más eficaz con auditorios en los que predominan líneas rectas, mientras que el método de la radiosidad ha dado respuestas más cercanas a la realidad en salas con abundancia de curvas, como iglesias o mezquitas. La mayoría de los modelos geométricos utilizados tienen limitaciones que tienen su origen en la reflexión especular. Algunos parámetros de gran importancia en la acústica de salas como la difusión, el comportamiento de superficies curvas, la difracción o la transición entre las reflexiones tempranas y la reverberación no han sido implementados. Además, las superficies que se introducen sólo pueden ser descritas en términos de planos con coeficientes de absorción y difusión. La modelización de elementos representativos en auditorios modernos, como los elementos de los que cuelgan instalaciones de iluminación, o paneles reflectantes suspendidos del techo no es simple con estos parámetros.

La falta de un modelo matemático fiable para configuraciones complejas ha llevado a la experimentación con maquetas. Esta técnica data de los años treinta [1] y consiste en reproducir sonidos con altavoces y grabar con multitud de micrófonos repartidos por todo el modelo. La señal se digitaliza y se analizan los parámetros acústicos objetivos tal y como se definen en la norma ISO 3386. La ventaja de la construcción de estas maquetas consiste en que recoge datos empíricos sobre los factores que en los programas informáticos resulta tan difícil de implementar, y que la confianza en los datos obtenidos es absoluta. Los problemas son de carácter práctico: el tiempo necesario en construir la maqueta y el coste adicional que provoca. El tamaño de las maquetas para obtener resultados fiables ha variado con el tiempo. Tan solo la atenuación del sonido provocada por la humedad del aire es el factor diferencial entre la maqueta y el modelo real, ya que este factor depende tanto del tamaño de la sala como de la frecuencia [6].

En el análisis de maquetas se tiende a eliminar el factor de la humedad y se ensaya bajo condiciones de humedad relativa no superior al 2% [2]. Los auditorios más ambiciosos que se construyen en todo el mundo han sido previamente ensayados con este método, que

ha superado en aceptación a los programas informáticos basados en el trazado de rayos. Esta realidad supone una vuelta a las técnicas de principios del siglo XX.

El método del trazado de rayos o haces no permite simular de forma natural la difracción y la difusión y, en consecuencia, introduce errores que pueden llegar a invalidar la simulación acústica. Existen numerosas propuestas para completar los métodos de trazado de rayos con modelos que alberguen la difracción y la difusión. En este trabajo se propone en §2 un método numérico alternativo basado en la ecuación de ondas que permite la simulación de forma natural de la reflexión, la difracción y la difusión. En §3 se analiza el error que introduce el método de trazado de haces o rayos en la reflexión de paneles de dimensión finita. Por último, en §4 se revisa el método de las elipses como mecanismo generador plantas y de secciones que permite diseñar espacios con sensaciones espaciales uniformes.

2. SIMULACIÓN BASADA EN LA ECUACIÓN DE ONDAS

Las ecuaciones de Navier–Stokes junto con sus condiciones iniciales y de contorno permiten simular el comportamiento el movimiento y las transferencias de calor en un fluido. Las ecuaciones de la acústica arquitectónica se pueden obtener a partir de las ecuaciones de Navier–Stokes a partir de las siguientes hipótesis:

1. No existen transferencias de calor.
2. No existe degradación de energía por viscosidad.
3. No existe atenuación acústica por humedad atmosférica.
4. No existe viento o el campo base de velocidades es cero.
5. No existe gradiente de temperaturas o estratificación térmica.

Con estas hipótesis, el gas aire se puede considerar isentrópico y las ecuaciones de Navier–Stokes para el aire seco se linealizan alrededor de una densidad constante ρ_0 , una presión constante P_0 y una velocidad constante $\mathbf{v}_0 = 0$ para dar:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla P, \quad (2)$$

donde c_0 es la velocidad de propagación del sonido en el aire, P es la perturbación de la presión y \mathbf{v} la perturbación de la velocidad. Si eliminamos la velocidad \mathbf{v} de las ecuaciones (1)–(2), se obtiene la ecuación de ondas:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c_0^2 \nabla^2 P. \quad (3)$$

Esta ecuación junto con las condiciones iniciales y de contorno permite conocer el campo de presiones de un determinado dominio de integración. Como condición inicial supondremos que no existe perturbación del campo de presiones. Las condiciones de contorno que vamos

a considerar en este artículo son dos: (i) contorno reflexivo puro y (ii) frontera libre. En el caso de contorno reflexivo la condición de contorno supone que la velocidad en la dirección normal de la pared sea cero, o lo que es lo mismo mediante la ecuación (2) que el gradiente de presiones en la dirección normal a la pared sea nulo.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

En el caso de frontera libre, la condición de contorno es más difícil de implementar. Desde el punto de vista físico, se requiere que las ondas que atraviesen la frontera libre salgan del dominio de integración y que la implementación de la condición de contorno no produzca reflexiones.

En este artículo hacemos aplicación a una geometría bidimensional. Discretizamos un dominio rectangular $\Omega : [0, L_x] \times [0, L_y]$ mediante una malla estructurada cartesiana y equiespaciada y definimos un conjunto de volúmenes de control Ω_{ij} :

$$\Omega_{ij} : [x_{i-1}, x_i] \times [y_{j-1}, y_j], \quad i = 0, \dots, N_x \quad j = 0, \dots, N_y. \quad (5)$$

Discretizamos espacialmente el problema (3) mediante el método de los volúmenes finitos. Integrando el problema (3) en un volumen de control genérico Ω_{ij} se obtiene:

$$\frac{d^2 \bar{P}_{ij}}{dt^2} = \frac{c_0^2}{\Omega_{ij}} \int_{\partial\Omega_{ij}} \nabla P \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (6)$$

donde \bar{P}_{ij} representa el valor medio que toma la perturbación de presión en Ω_{ij} y la integral del lado derecho de la ecuación (6) está extendida a los lados de Ω_{ij} . El problema consiste ahora en aproximar las integrales anteriores en función de los grados de libertad \bar{P}_{ij} del problema semidiscretizado. Para los lados interiores al contorno podemos expresar:

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{\partial P}{\partial y} \, dx \approx \left(\frac{P_{ij-1} - P_{ij}}{\Delta y} \right) \Delta x, \quad (7)$$

$$\int_{y_{j-1}}^{y_j} \frac{\partial P}{\partial x} \, dy \approx \left(\frac{P_{i-1j} - P_{ij}}{\Delta x} \right) \Delta y. \quad (8)$$

Para los lados del contorno puramente reflexivos, la condición de contorno se implementa de forma natural imponiendo que la integral del flujo (7) o (8) valga cero. Para un volumen de control que contenga un lado que sea frontera libre, procederemos de la siguiente forma. Si los espaciados Δx y Δy son lo suficientemente pequeños comparados con la longitud de onda mínima presente en mi problema, el campo de presiones se puede considerar localmente unidimensional (onda plana). Si la onda es plana y con (2), la dirección de propagación coincide con la dirección de ∇P . A lo largo de esa dirección de propagación ξ el problema se expresa:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 P}{\partial \xi^2}. \quad (9)$$

En la dirección η perpendicular a ξ la presión no varía

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = 0. \quad (10)$$

La solución localmente se comporta como una onda plana formada por dos soluciones que se desplazan en sentido creciente y decreciente de ξ a la velocidad c_0 ,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - c_0 \frac{\partial}{\partial \xi}\right) \left(\frac{\partial}{\partial t} + c_0 \frac{\partial}{\partial \xi}\right) P = 0. \quad (11)$$

Si el sentido creciente de ξ sale del dominio, entonces permitimos que las ondas salgan del dominio

$$\frac{\partial P}{\partial t} + c_0 \frac{\partial P}{\partial \xi} = 0. \quad (12)$$

Si el sentido creciente de ξ entra del exterior al dominio de integración, el signo de la velocidad de propagación c_0 debe ser el contrario.

Para poder expresar las integrales del flujo del gradiente de presiones (7)–(8) mediante la variación de P en las direcciones (ξ, η) , hacemos un cambio de coordenadas. Si θ es el ángulo que forma la dirección de propagación ξ con el eje x ,

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \cos\theta \frac{\partial P}{\partial \xi}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\sin\theta \frac{\partial P}{\partial \xi}. \quad (14)$$

Para los lados que constituyen frontera libre podemos despejar de (12)

$$\frac{\partial P}{\partial \xi} = \pm c_0 \frac{\partial P}{\partial t} \quad (15)$$

y calcular (7)–(8) sustituyendo (15) en (13)–(14).

Una vez realizada la semidiscretización espacial, el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias resultante se integra en el tiempo mediante un esquema Runge–Kutta de cuarto orden.

3. REFLEXIÓN Y DIFRACCIÓN

Cuando un foco sonoro radia energía acústica en el aire, aparece una onda esférica, cilíndrica o plana que se propaga en el aire hasta que encuentra una superficie límite en la que se refleja. La onda puede rodear la superficie reflexiva y al mecanismo que gobierna este comportamiento se le conoce como la difracción. Cuando una onda plana incide sobre una superficie límite y la energía acústica reflejada se distribuye en todo el espacio, diremos que estamos ante una reflexión difusa. Generalmente, la reflexión difusa es deseable como mecanismo de homogeneización. La difusión de una superficie se debe, principalmente, a la presencia de un conjunto de longitudes características que definen detalles geométricos del espacio interior.

En el pasado, la difusión era una ventaja accidental del estilo arquitectónico en el que la profusión de decoración en los interiores era la norma general. Eso hacía que salas con defectos en su concepción tuvieran una reputación excelente entre músicos y aficionados [4]. La arquitectura actual, con predominio de superficies lisas y sin adornos, ha perdido la riqueza del campo difuso, si bien es cierto, que si se utilizan elementos que la provocan

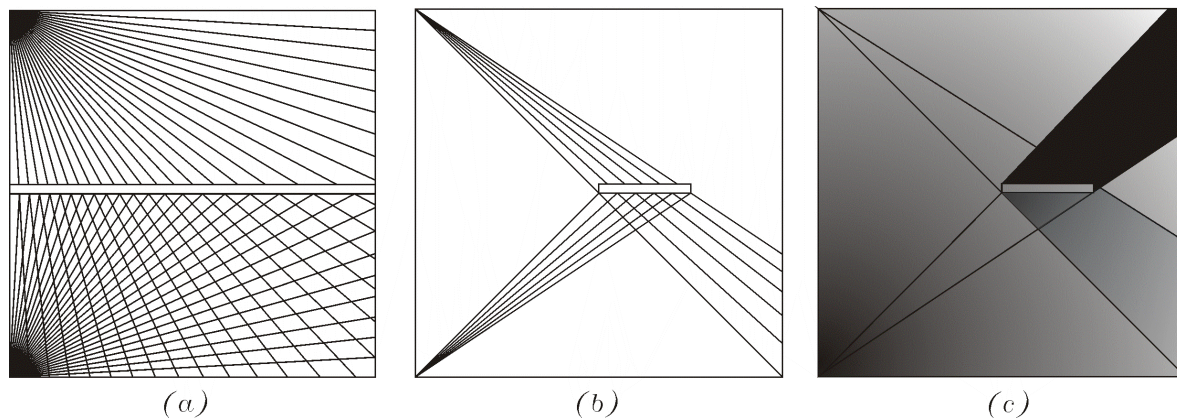


Figura 1: Método de trazado de rayos y método de trazado de haces. (a) Trazado de rayos para una superficie reflexiva infinita. (b) Trazado de rayos para una superficie reflexiva finita. (c) Trazado de haces con color degradado mostrando el nivel de intensidad.

se hace ahora de manera consciente, y no de manera accidental. La difusión y la difracción son fenómenos no tenidos en cuenta en la concepción de salas acústicas tradicionales.

Cuando un foco sonoro emite una onda esférica que incide sobre una superficie reflexiva infinita, la superficie refleja la onda creando un campo de interferencias entre la onda incidente y la reflejada. El método de las imágenes permite sustituir el plano reflexivo por un segundo foco emisor. Si se considera que la reflexión es especular, la construcción geométrica, entre la onda incidente y la reflejada, permite pensar que el campo reflejado está originado por un segundo foco emisor. Este foco estaría situado en una posición simétrica al primer foco con respecto al plano. Sin embargo, cuando los reflectores tienen una longitud finita, aparecen fenómenos de difracción que modifican el campo reflejado e invalidan el método de las imágenes. En realidad, los fenómenos de difracción son importantes cuando la longitud de onda del campo acústico es del mismo orden o mucho mayor que la longitud del panel reflectante. Así, el comportamiento las frecuencias agudas, con longitudes de onda mucho más pequeñas que la longitud de los paneles, está determinado por el método de las imágenes. Al contrario, las frecuencias graves sufren fenómenos de difracción importantes alrededor de paneles pequeños.

En la figura 1 se muestra el método de trazado de rayos basado en la reflexión especular. La onda incidente, que se representa por su dirección de propagación, incide formando un ángulo dado con la normal a la superficie. La onda reflejada viaja en una dirección que forma el mismo ángulo con la normal. La intersección de las direcciones de propagación de las ondas reflejadas permite pensar en otro foco imagen que sustituye al panel reflexivo (figuras 1a y 1b). De igual forma, el método de trazado de haces (figura 1c) permite visualizar los niveles de intensidad de un campo de presiones a través de un degradado del color. Así, los tonos más oscuros se asocian a niveles bajos de intensidad y tonos más claros a niveles de intensidad mayores. De esta forma, se justifica una analogía entre la luz y el sonido.

Sin embargo, cuando la longitud del panel es del orden de la longitud de onda de la onda de presión, aparecen fenómenos de difracción que invalidan la simple reflexión especular, el método de las imágenes o la analogía luminosa. En la figura 2 se representa

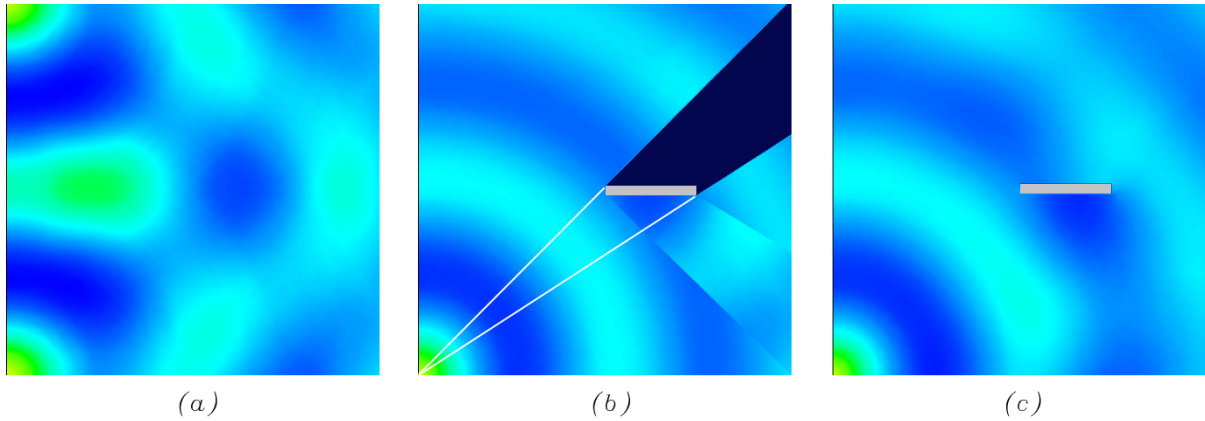


Figura 2: Efecto de la reflexión de un panel de 1 m. de longitud en un dominio con frontera libre de 4 m. \times 4 m. Onda simple de 170 Hz y 2 m. de longitud de onda. (a) Método de las imágenes. Interferencias constructivas y destructivas entre dos ondas simples. (b) Trazado de haces. Reflexión construida mediante recortes de una onda simple y diagrama de interferencias. (c) Simulación de la reflexión teniendo en cuenta la difracción.

un panel reflexivo de 1 metro de longitud en un dominio rectangular de 4 m. \times 4 m. con frontera libre. En la esquina inferior izquierda se sitúa un foco que emite un tono puro de 680 Hz. con una longitud de onda de 0.5 m. En la figura 2a se representan las interferencias constructivas y destructivas que se originan mediante dos focos emisores o método de las imágenes. El método de trazado de haces se representa en la figura 2b. La reflexión se construye mediante recortes de una onda simple y el diagrama de interferencias

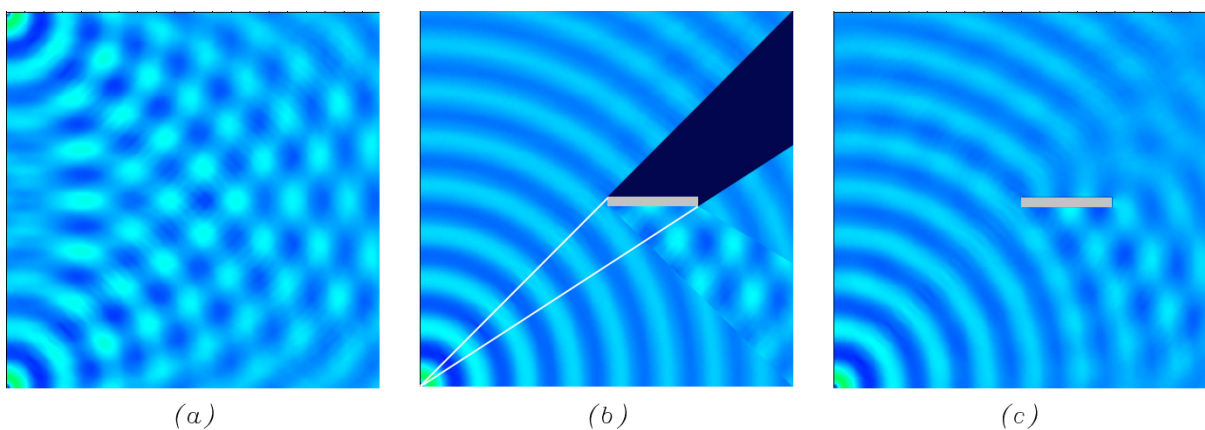


Figura 3: Efecto de la reflexión de un panel de 1 m. de longitud en un dominio con frontera libre de 4 m. \times 4 m. Onda simple de 680 Hz y 0.5 m. de longitud de onda. (a) Método de las imágenes. Interferencias constructivas y destructivas entre dos ondas simples. (b) Trazado de haces. Reflexión construida mediante recortes de una onda simple y el diagrama de interferencias. (c) Simulación de la reflexión teniendo en cuenta la difracción.

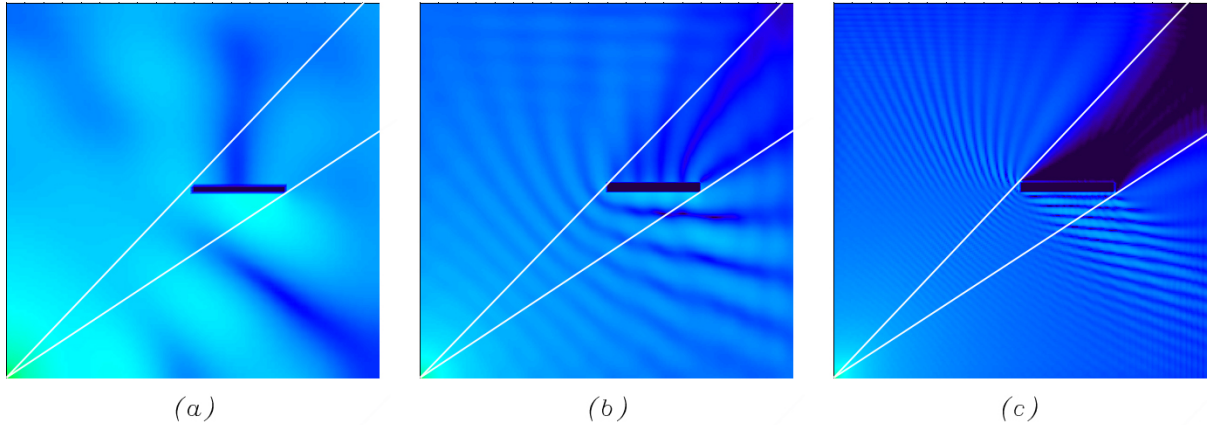


Figura 4: Niveles de intensidad alrededor de paneles reflexivos para diferentes frecuencias. (a) 340 Hz., (b) 680Hz., (c) 2720 Hz.

(figura 2a). En la figura 2c se representa una simulación numérica mediante la ecuación de ondas. Aunque existen ligeras diferencias entre las figuras 2b y 2c, parece que el método de trazado de rayos o trazado de haces es un buena aproximación para este problema.

Por el contrario, en la figura 3 se vuelve a representar la misma secuencia pero ahora para frecuencia de 170 Hz. Si comparamos las figuras 3b y 3c, vemos que el método del trazado de rayos o de haces no predice bien el comportamiento de la onda de presión alrededor del panel reflexivo.

El nivel de intensidad de un campo de presiones $P(x, y, t)$ se define mediante:

$$L = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_0} \right) \quad (16)$$

donde P_0 es una presión de referencia y P_{rms} es la presión media cuadrática y está dada por la expresión:

$$P_{rms}^2(x, y, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P^2(x, y, t) dt \quad (17)$$

En la figura 4 se representa el nivel de intensidad de la geometría descrita en la figura 3 para las frecuencias de 340 Hz. (figura 4a), 680 Hz (figura 4b) y 2730 Hz (figura 4c). Mientras que las longitudes de onda corta (figura 4c) son muy direccionales y muestran zonas de sombras detrás del panel, las longitudes de onda larga (figura 4a) rodean el panel como si no existiera.

4. GEOMETRÍA, ACÚSTICA Y PERCEPCIÓN ESPACIAL

La consecución de un retardo adecuado entre el campo directo y las reflexiones tempranas se ha convertido en la primera justificación para el desarrollo de un método de generación de plantas de salas de conciertos. Para validar una sala se debería obtener un mismo retardo en todos los puntos. Además, sería aconsejable crear una sensación

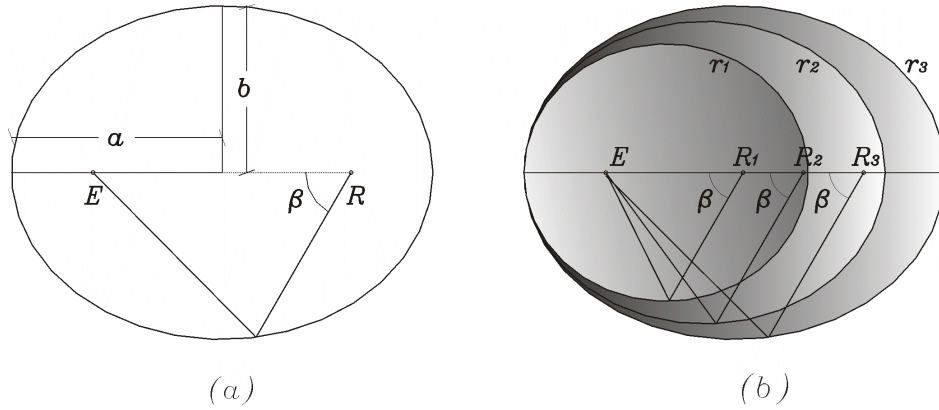


Figura 5: *Elipse como lugar geométrico de puntos que cumple la condición de que la suma de las distancias a dos focos es constante. (a) Retardo constante que forma el campo directo y el campo reflejado. (b) Construcción con diferentes elipses para conseguir el mismo ángulo entre el campo directo y el campo reflejado.*

homogénea envolvente para todos los espectadores, lo cuál depende del ángulo que forman el sonido directo y la primera reflexión. La respuesta a estos dos factores pasa por la resolución de un problema geométrico, siempre y cuando se considere la reflexión del sonido como un fenómeno puramente especular. Las reflexiones laterales son básicas para la sensación envolvente. Una reflexión es lateral cuando el ángulo que forma la reflexión y el plano que secciona la cabeza de un observador que mira al origen del sonido es suficientemente grande. Cuanto mayor es ese ángulo, mayor es la sensación espacial. Plantas con paredes divergentes proporcionan poca sensación de amplitud, mientras que paredes convergentes aumentan el ángulo responsable de la sensación de amplitud espacial.

Numerosos ejemplos de auditorios bien calificados por críticos y espectadores se basan en la adaptación de la geometría interior de una sala a elipses de diferentes tamaños. Las elipses proporcionan un conjunto de puntos que cumplen la condición de que la suma de las distancias a dos focos es constante. Si colocamos en un foco al emisor y en otro foco al receptor, cualquier rayo que se refleje en la superficie de la elipse recorre una distancia $2a$, siendo a el semieje mayor de la elipse (figura 5a). De esta forma, el retardo del campo reflejado frente al campo directo es constante. Si consideramos que 80 ms.s es el tiempo de retardo óptimo entre el sonido directo y la primera reflexión, podemos construir un elipse que verifique esta condición.

$$2a - ER = 0,08c_0 \quad (18)$$

ER es la distancia focal y c_0 es la velocidad del sonido. Dado el semieje a , como valor de escala de la sala acústica, se obtiene la distancia focal ER de (18) y el semieje menor b de la siguiente expresión:

$$b = \sqrt{a^2 - ER^2/4} \quad (19)$$

En la figura 5b se observa la construcción de elipses de diferentes tamaños que verifican las mismas condiciones que la primera. La elipse no es una forma idónea para la planta de una sala de conciertos, pues provocaría concentraciones de sonido cerca de los focos, por lo que la forma definitiva puede ser una poligonal tangente a las elipses para no producir

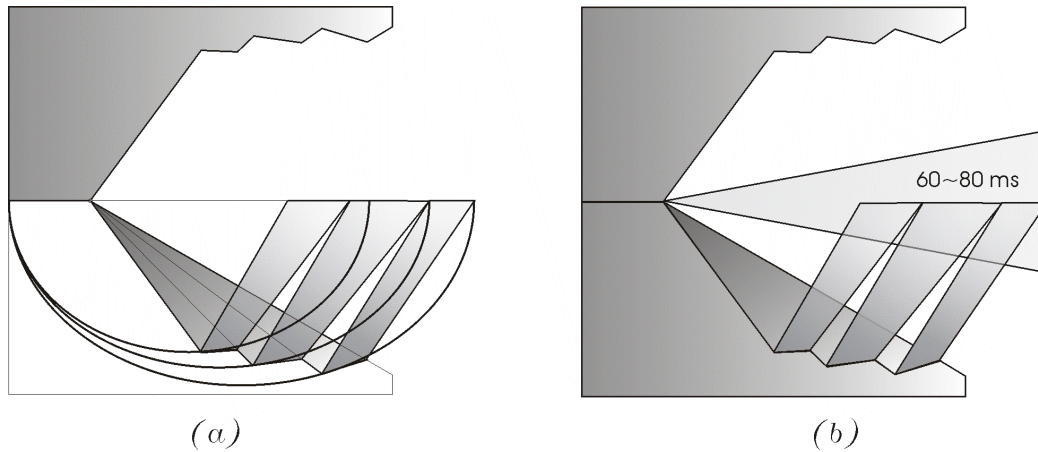


Figura 6: *Mecanismo generador de regiones con igual percepción acústica. Mismo retardo y mismo ángulo entre el campo directo y el campo reflejado.*

concentraciones. Los rayos reflejados de la figura 5b producen el mismo retardo. Además, se puede elegir un ángulo β constante para todas las elipses que produzca una sensación envolvente.

En la figura 6a se observa la construcción de una superficie interior mediante el trazado de haces que se reflejan en planos tangentes a las elipses de la figura 5b. Se construyen las superficies tangentes a las diferentes elipses y se limita el tamaño de los planos para construir un campo de reflexiones uniforme en el eje mayor de la elipse.

Debido a que el oído humano no distingue retardos menores de 20 ms, en la figura 6b se fija un sector para crear una zona de retardo entre 60 y 80 ms. Todos los asientos situados en ese sector tendrán las mismas condiciones acústicas gracias a la construcción generada en la figura 6a.

La división de la audiencia en sectores definidos delimitados por planos laterales inclinados con respecto a la vertical es un recurso adecuado. El tamaño de los planos reflexivos debe ser tal que no produzca fenómenos de difracción en frecuencias bajas. Girando los ejes de las elipses se consiguen zonas de acústica homogénea en todas las direcciones de la sala. La forma interior final será la composición de todas las envolventes, y los asientos se colocarán en diferentes sectores a distintos niveles para crear zonas de acústica homogénea.

Muchas son las ventajas de considerar las reflexiones tempranas: primero, se consigue un nivel de presión homogéneo en toda la sala, sobre todo cuando el tamaño empieza a ser demasiado grande; segundo, si se adapta la forma interior de la sala a elipses de distintos tamaños se puede proporcionar el mismo tiempo de retardo entre el sonido directo y la primera reflexión en todos los puntos de la sala; y tercero, si se controla el ángulo entre el sonido directo y las reflexiones tempranas se obtiene una misma sensación envolvente.

5. CONCLUSIONES

Las limitaciones que impone un método de trazado de rayos en cuanto a la difusión y difracción del sonido hace pensar en el uso de un modelo híbrido para poder predecir el

comportamiento acústico de una sala. Por un lado, el método de trazado de rayos, que basa su predicción en la reflexión especular, puede ser implementado como el método de las elipses o un método tridimensional puramente geométrico. Por otro lado, se deben utilizar modelos de simulación numérica, basados en la ecuación de ondas o en la formulación primitiva, para predecir los comportamientos no contemplados mediante el método de trazado de rayos.

El método del trazado de rayos se podría usar para el predimensionamiento de la sala. Sin embargo, hemos mostrado en este artículo que la difracción alrededor de las esquinas o los obstáculos, que se encuentra el sonido en su camino, no se predice por los métodos que se basan en la reflexión especular. Creemos que se debería hacer una posterior validación de la acústica de la sala mediante métodos numéricos de alto orden que aborden la formulación diferencial del problema. De esta forma, los fenómenos de difracción y difusión tan importantes en la acústica arquitectónica se tendrían en cuenta de forma natural. Además, un método numérico que ataque la formulación primitiva podría incorporar de una forma sencilla fenómenos tales como: una corriente de aire o la propia estratificación térmica, que aparece en grandes alturas, para analizar patologías existentes en salas acústicas.

REFERENCIAS

- [1] Barron, M. Acoustic scale model testing over 21 years. *Acoustics Bulletin* 1997; **22**:Nº 3,5,12.
- [2] Barron, M., Chinoy, C.B. 1:50 scale acoustic models for objective testing of auditoria. *Applied Acoustics* 1979; **12**:361–375.
- [3] Funkhouser, T., Carlbom, I., Elko, G., Pingali, G., Sondhi, M., and West, J. Beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments. *Computer Graphics (SIGGRAPH)* 1998; **24**:21–32.
- [4] Haan, C.H., Fricke, F.R. Statistical investigation of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics* 1992; **35**:105–127.
- [5] Rindel, J. H. Computer simulation techniques for acoustical design in rooms. *Acoustics Australia* 1995; **23**:81–86.
- [6] Rindel, J. H. Design of new ceiling reflectors for improved ensemble in a concert hall. *Applied Acoustics* 1991; **34**:7–17.
- [7] Schroeder, M. R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral diffusion. *JASA* 1979; **65**:958–963.