

Reverberación sonora: parámetros en modelación digital y física

Sound Reverberation: Parameters in Digital and Physical Modeling

Eduardo Cote

Departamento de Arquitectura
Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia
e.cote61@uniandes.edu.co

Andrés Augusto Pinzón

Departamento de Arquitectura
Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia
apinzon@uniandes.edu.co

ABSTRACT

This is a study of the reverberation phenomena into a space. Digital and physical methods are employed as a way to understand the parameters that determine the reverberation time in an indoor space. The comparison of the results between digital and physical modeling permit to establish actions of acoustic control. The surfaces of the space are modified using sounds diffusers.

KEYWORDS: Tiempo de reverberación (RT60), Parámetros sonoros, Ecotect, Prototipado rápido.

1. Introducción

La acústica arquitectónica trata el sonido en el ambiente construido. Las características sonoras de un espacio interior se determinan a partir de su geometría, sus superficies y el volumen que el recinto contiene. De forma complementaria, los sonidos generados por las actividades que desarrollan los usuarios del espacio alimentan el sistema acústico y complementa la arquitectura. De allí que para diseñar un espacio se debe valorar: ¿Qué es el sonido?, ¿Cómo se propaga? y ¿Cómo se percibe?

La arquitectura ofrece un envoltorio al sonido que se emite, se transmite y se propaga por el espacio generando distintas sensaciones auditivas en quien reside en este. Al emitirse una vibración sonora dentro de un recinto, las ondas sonoras viajan y entran en contacto con los límites del espacio, y es entonces cuando el sonido se refleja, se absorbe y/o se difunde generando unas características sonoras en particular. Lo audible en un espacio es entonces la combinación de las ondas sonoras directas con las ondas sonoras reflejadas. De esta interacción surge un fenómeno que consiste en la percepción de una tenue permanencia del

sonido una vez que la fuente que lo produce ha dejado de emitirlo. Esto se denomina *Reverberación* y es un parámetro cualitativo que determina la experiencia acústica en un espacio.

La reverberación es un fenómeno temporal cuantificable a través del *Tiempo de Reverberación*, (RT_{60}) que es el tiempo en segundos que transcurre desde que la fuente sonora cesa la emisión de sonido hasta que el nivel de presión sonora desciende 60dB con respecto a su valor inicial¹. Este parámetro varía al modificar el tamaño, la forma y la materialidad de un recinto, permitiendo generar diferentes atmosferas sonoras. Las investigaciones realizadas sobre el RT_{60} han determinado que existe una relación directa entre éste y el uso que tendrá el espacio, de esta manera las características físicas y materiales de un espacio serán diferentes si la necesidad es la de escuchar un discurso hablado o un concierto sinfónico. Se puede afirmar que se los RT_{60} altos (1,4 a 2,6 segundos), afectan el entendimiento de la palabra, la claridad y la definición musical, mientras los RT_{60} bajos, (0,2 a 1,4 segundos) afectan la sonoridad y el balance tonal². Entender el fenómeno del sonido es fundamental para lograr un confort acústico en el espacio, y puesto que percibir las

calidades del sonido en un espacio es algo que resulta complejo, en esta investigación plantea una metodología para ver el sonido por medio de la simulación digital y física de una cámara reverberante³.

2. Métodos de Investigación.

Como punto de partida se investigó en el funcionamiento de las cámaras reverberantes⁴ para recrear su funcionamiento a través de *Grasshopper para Rhino*. La frecuencia sonora, el volumen del espacio, y los planos no-ortogonales fueron los parámetros determinantes de la forma arquitectónica del recinto y la modificación de estos valores permitió generar distintos tipos de cámaras reverberantes.

Como segunda instancia, se simuló la emisión de un sonido y su trayectoria al interior de las distintas cámaras reverberantes obtenidas en el paso anterior utilizando el software *Ecotect*. Con esta modelación se observaron las reflexiones de las ondas sonoras y se calcularon los tiempos de reverberación en distintas frecuencias. Esto se pudo desarrollar a partir de la variación de los materiales de las superficies interiores y del volumen mismo.

En una tercera fase se construyó el prototipo físico. Las superficies interiores de este modelo se ajustaron a distintos escenarios sonoros, por tal razón se emplearon los difusores acústicos. Que son dispositivos que gracias a su forma y materialidad generan reflexiones difusas de las ondas que inciden sobre ellos aumentando el tiempo de reverberación.

En la última fase, se realizaron pruebas sonoras sobre el modelo construido. Estas mediciones emplearon herramientas electroacústicas como micrófonos, parlantes y un sistema de grabación para realizar los registros correspondientes. La frecuencia sonora se escaló con la misma escala del prototipo con el fin de realizar las mediciones y analizar el comportamiento real del recinto para diferentes situaciones. Los datos obtenidos en esta etapa se compararon con los datos de las simulaciones acústicas entregadas por el programa *Ecotect* en el mismo espacio.

2.1 La cámara reverberante

Las cámaras reverberantes son los espacios diseñados para medir y caracterizar las cualidades acústicas de los diferentes elementos y materiales constructivos y su influencia en el RT_{60} de los espacios. Según la norma *ISO 354: 2003 Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room*, una cámara reverberante se determina a partir de los siguientes condicionantes:

- Volumen mínimo de la cámara: Para poder medir desde la frecuencia mínima audible por el ser humano (20 Hz) se requiere un volumen de 2000 m³.

- Aislamiento acústico: Se debe garantizar un alto grado de aislamiento acústico para que ruidos exteriores no afecten las mediciones interiores.
- Reflexión del sonido: Al interior de la cámara el sonido directo emitido por la fuente debe ser reflejado por las superficies que delimitan el espacio la mayor cantidad de veces posibles, buscando que el tiempo de permanencia del sonido en el ambiente para cada frecuencia, sean: 125Hz – 5seg / 250Hz – 5seg / 500Hz – 5seg/ 1000Hz – 4,5seg / 2000Hz – 3,5seg / 4000Hz – 2seg. Se debe cumplir con la siguiente ecuación: $V = \frac{I_{max} \cdot L}{4}$, donde: I_{max} es el mayor segmento que se puede trazar dentro de la cámara en planta, por ejemplo en una cámara rectangular es la diagonal y V es el volumen de la misma.

2.2 Los parámetros de la cámara reverberante en Grasshopper

A través de *Grasshopper para Rhino* se realizó un algoritmo de programación que permitiera involucrar parámetros en dimensiones y geometrías de la cámara reverberante. Las geometrías obtenidas fueron seleccionadas si cumplían con los requerimientos enumerados anteriormente (2.1 La cámara reverberante).

Por lo tanto se generó una superficie de referencia cuyos vértices pudieran variar fácilmente de posición a través de controles numéricos. La nueva localización de los puntos, permitió modificar la forma y el tamaño del volumen de la cámara reverberante, y consecuentemente la longitud de cada una de las caras interiores del prisma (tanto en su altura como en su ancho). El incremento o reducción en el área de las superficies internas del volumen modificó el desempeño de la cámara.

El algoritmo de programación de *Grasshopper para Rhino* permitió en tiempo real verificar la eficacia del resultado formal de las cámaras, Seleccionando . cuatro volúmenes de cámara reverberantes que cumplían con los criterios establecidos por la normativa aplicada.

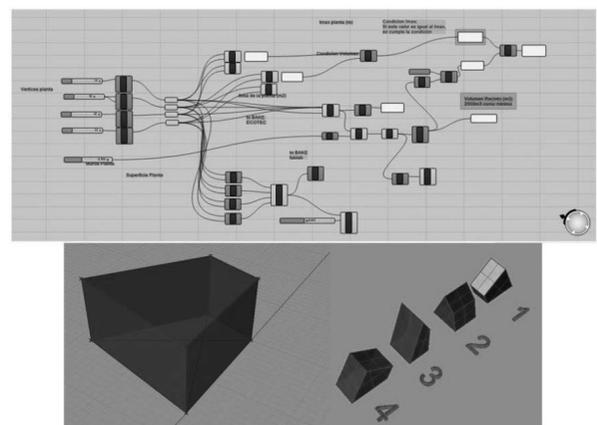


Imagen 1. Script en Grasshopper para la modelación paramétrica de la cámara reverberante.

Modelo de cámara reverberante (Grasshopper)	Vista Isométrica	Vista de Planta (Imax)	Tiempo de Reverberación RT60 (Seg)				
			250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
1			9,06	7,79	2,79	1,22	0,88
2			7,12	4,9	1,56	0,66	0,63
3			4,32	3,87	2,02	0,52	0,49
4			6,87	5,23	1,68	0,71	0,67

Tabla 1. Tiempos de reverberación en Ecotect para las 4 cámaras generadas en Grasshopper.

2.3 El análisis acústico en Ecotect

Los modelos de las cámaras se analizaron en Ecotect que visualiza el comportamiento de las ondas sonoras y que cuenta con distintos materiales para ser asignados a las superficies de un recinto, esta herramienta estima distintos tipos de reverberación a partir del coeficiente de absorción de los materiales, el área que ocupan y el volumen de la cámara.

Al analizar el modelo a escala se seleccionó un material cuyo comportamiento en frecuencias altas y bajas fuera similar en escalas 1:1 y 1:25. En Ecotect, se configuró el ladrillo con revestimiento en pañete al interior (*wall/ Brick Plaster*) debido a que su espesor en Escala 1:1 (aprox. 15cm) es el mismo de los materiales empleados en el modelo físico en escala 1:25 (MDF y Acrílico tienen 3 mm de espesor)

Finalmente, se eligió la cámara reverberante 1 para construir el prototipo a escala. Al realizarse las pruebas del tiempo de reverberación en este modelo fue evidente que a partir de una frecuencia de 1000 Hz no se tenían los tiempos de reverberación mínimos exigidos por la norma. Por esta razón, se emplearon los difusores sonoros cuyo objetivo está encaminado a incrementar el RT_{60} a partir de esta frecuencia.

Con el objetivo de reflejar y dispersar el sonido de manera uniforme en múltiples direcciones se dispusieron difusores unidimensionales QRD⁵ sobre dos superficies de la cámara reverberante. Como resultado, no sólo se tuvo una mayor distribución sonora sino que además se modificó el comportamiento del sonido en el tiempo: las nuevas reflexiones de los difusores generaron intervalos de tiempo diferentes a los tenidos con las superficies planas. Esto modificó el RT_{60} del recinto.

Se diseñaron dos tipos de difusores, uno que cumple con

las ecuaciones de diseño establecidas para los difusores del tipo QRD, (difusor comercial) y otro que busca experimentar utilizando la misma ecuación generadora para grandes superficies (difusor experimental), generalmente los difusores QRD comerciales (*en Escala 1:1*) no superan un ancho de celda de 10cm, mientras que los difusores experimentales aquí propuestos tienen anchos de celda de 23cm.

Ambos difusores se dibujaron en *Rhinoceros*, se incorporaron al modelo original y se analizaron en *Ecotect*. Los resultados mostraron un ligero incremento en el RT60 debido a que el software no discrimina las reflexiones provenientes de los difusores, sólo valora los coeficientes de absorción del material. Sin embargo, el visualizador de ondas permitió analizar la trayectoria de las ondas y el aporte significativo de los difusores en la distribución del sonido dentro del espacio.

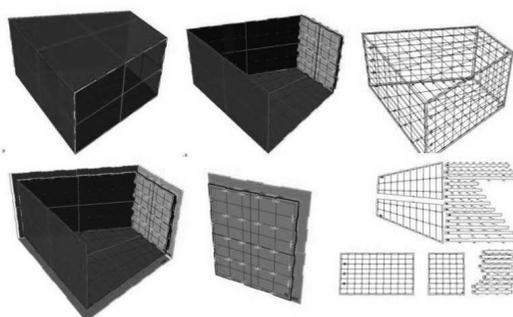


Imagen 2. Modelo 3D elaborado en Rhino para la fabricación física del modelo.

2.4 La construcción del modelo acústico de una cámara reverberante.

El modelo físico de la cámara reverberante (Escala 1:25) se diseñó a partir de un sistema de elementos laminares dispuestos en dos direcciones. Sobre este entramado se

dispusieron los paneles para conformar los difusores sonoros.

Para facilitar la construcción de las piezas laminares, el ensamblaje del conjunto, y la modificación de las áreas con difusores se empleó un cortador láser para fabricar los distintos componentes. La geometría elegida se modeló en *Rhinoceros* teniendo en cuenta las dimensiones máximas de la cortadora láser (*Universal Laser Systems, VLS6.60*) y el espesor de los materiales de ensamble (MDF y Acrílico de 3mm). El diseño de las superficies del modelo consistió en un sistema de doble hoja en cuyo espacio intermedio se dispuso un material absorbente (fibra de vidrio de alta densidad) para incrementar el valor del aislamiento acústico. La hoja exterior se conectó con la hoja interior por medio de láminas que además marcaron puntos de referencia para ubicar un micrófono y una fuente sonora durante la simulación física.

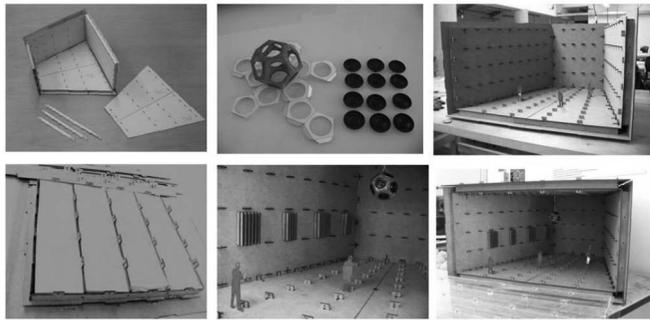


Imagen 3. Modelo físico construido a través de corte laser.

2.5. La simulación física

Dentro del modelo de la cámara reverberante se localizó un fuente sonora omnidireccional compuesta por doce altavoces de 1" ubicados cada uno en las caras

de un dodecaedro, se registró la señal por medio de un micrófono de solapa omnidireccional conectado a un sistema de grabación y se analizaron las señales en el software *Room EQ Wizard*, que es una aplicación de Java para realizar mediciones acústicas obteniendo así los tiempos de reverberación en el modelo a escala.

Se midió el RT_{60} del modelo a escala para tres situaciones: la cámara vacía (superficies límite sin tratamiento), la cámara con difusores en superficies laterales comerciales y la cámara con los difusores experimentales en superficies laterales, en los dos últimos casos se incluyó una muestra equivalente a 12m² de superficies difusoras y, se utilizó una posición fija de la fuente sonora. Sin embargo, el micrófono se dispuso en tres lugares dentro del espacio y se realizó un promedio de los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 3:

3. Resultados y Discusión

En un rango de baja frecuencia (20-1000Hz) las mediciones físicas y digitales tuvieron valores similares. Lo contrario sucedió en el rango de alta frecuencia (1000 - 8000Hz) donde los valores difirieron sustancialmente. Esto se debió a que la modelación física involucro toda la información pertinente al evento sonoro mientras que la herramienta digital limito la cantidad de información. Por ejemplo las mediciones del espacio en Ecotect desprecian la geometría de los elementos y solo atienden al coeficiente de absorción de los materiales.

Por tal razón se prevé que un estudio de dimensiones físicas y digitales involucre un nuevo software de análisis acústico con mayor capacidad, adicionalmente, este estudio debe dedicar mayor atención al análisis de los registros obtenidos.

Caso de estudio	Imagen	Tiempo de reverberación medido (seg)						
		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Sala Vacía		7.85	9.02	9.06	7.79	3.89	2.87	2.03
Sala con difusores comerciales (12m ²)		8.02	8.53	8.95	7.93	6.01	5.47	5.19
Sala con difusores experimentales (12m ²)		7.54	6.79	7.82	7.47	6.79	6.12	5.49

Onda sonora incidente → Difusión sonora generada
→ Superficie difusora

Tabla 3. Tiempos de reverberación para las tres situaciones estudiadas.

Finalmente, la flexibilidad del prototipo estudiado permitió simular distintas configuraciones del espacio y gracias a esto se pudo constatar la eficacia de los difusores sonoros para mejorar la reverberación del recinto.

Bibliografía

COWAN, J. 2000. "Architectural Acoustics. Design Guide". The Mc Graw-Hill Companies, Inc. Estados Unidos.

CARRION, Antoni. 2001. "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Editorial Alfaomega, Universidad politécnica de Cataluña. España.

EVEREST, F. Alton. 2002. "Master Handbook of Acoustics", Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos.

Sass, L. 2006. The Instant House: A model of Design Production with Digital Fabrication, International Journal of Architectural Computing. Estados Unidos.

Notas

1. CARRION, Antoni. 2001. "Diseño acústico de espacios arquitectónicos". Editorial Alfaomega, Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona, España

2. EVEREST, Alton. 2001. "Master Handbook of Acoustics", Fourth Edition, Editorial Mc Graw-Hill, pag 151, San Francisco, Estados Unidos.

3. La cámara reverberante es un recinto especializado para la realización de mediciones acústicas. Está diseñado para que en su interior el sonido directo emitido por la fuente sonora sea reflejado por las superficies que lo componen la mayor cantidad de veces posibles, buscando que estas reflexiones cubran múltiples direcciones del espacio. Esto se hace con la finalidad de crear un ambiente altamente reverberante y difuso.

4. ISO 354:2003 Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room. ISO 17497-1:2004 Acoustics: Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.

5. Difusores unidimensionales QRD: Compuestos por una serie de ranuras paralelas de forma rectangular de igual ancho pero de diferente profundidad. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada la cual es periódica, generando la dispersión del sonido para un determinado margen de frecuencias. La se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora: . Dónde: p es un numero primo (3, 7, 11,...), N es un numero entero que va desde 0 hasta $p-1$. mod es la operación matemática "modulo", indicativa de que cada valor de s_n se obtiene como el residuo del cociente entre n^2 y p .