



Análisis acústico de geodomas semiesféricos

Nicolás Schmidt¹, alumno de sexto año

Juan Pablo Cáceres², investigador guía

¹DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN, ESCUELA DE INGENIERÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

²CENTER OF COMPUTER RESEARCH IN MUSIC AND ACOUSTICS, Y MUSICIANLINK INC., STANFORD UNIVERSITY

INTRODUCCIÓN

Durante el último tiempo, tanto en Chile como en otros países, se ha extendido notablemente el uso de geodomas semiesféricos como alternativa a la construcción de nuevos espacios. El uso creciente de estas estructuras se explica por su bajo costo y facilidad en su implementación.

Sin embargo, estos domos presentan una acústica que no favorece su uso como salas de estudio. Este problema se manifiesta en la presencia de una gran **reverberación**. Es por esto que surge la necesidad de idear alguna solución acústica para aplicarla a cualquier domo, independiente de su tamaño.

En esta investigación se estudió y modeló acústicamente uno de los geodomas semiesféricos ubicados en la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con el fin de encontrar la ubicación óptima para la instalación de alguna medida basada en la absorción

y disipación del sonido. Se logró encontrar aquellas paredes que generan las mayores sumas de intensidades de respuesta al impulso, para un escenario en el que se tienen fuentes sonoras provenientes desde múltiples ubicaciones al interior del geodomo. Sobre la base de ello, se propuso una solución práctica. El desempeño de esta fue analizado en base a la comparación del **Power Spectral Density**, para aquellos pares fuente-auditor que generaban fuentes virtuales más energéticas, con y sin la solución.

METODOLOGÍA

Modelo acústico

La modelación se fundamentó en la implementación de un algoritmo que otorgara los elementos necesarios para encontrar la respuesta al impulso para un **par fuente-auditor** dentro de cualquier espacio cóncavo [1]. La estructura se modela como un conjunto de planos en el espacio, cada uno representado por tres puntos arbitrarios. Además, deben ingresarse las coordenadas de la fuente sonora y del auditor al interior de ella. El algoritmo simula las reflexiones en las paredes de la estructura con fuentes sonoras virtuales. Se crea un punto que representa una fuente sonora virtual para cada pared de la estructura. Este punto está ubicado en línea recta al doble de la distancia mínima entre la pared correspondiente y la fuente sonora original. Cada fuente virtual es finalmente evaluada respecto de los tests de validez, visibilidad y proximidad descritos en [1], con lo que se establece su validez, eliminándose aquellas que quedan fuera del rango físico posible de reflexiones.

Con la metodología descrita, se encuentran todas las fuentes sonoras virtuales válidas creadas a partir de la reflexión de un impulso sonoro sobre todas las paredes de la estructura en forma recursiva. Así, se crea una serie de fuentes virtuales, las cuales pueden ser ordenadas como un árbol, en el cual el nodo padre es el inicio de la onda original, y todos los nodos intermedios y hojas son fuentes virtuales creadas por la reflexión de otra fuente virtual válida en las paredes. Este método se detiene al alcanzar cierto nivel de recursión, dependiendo de la precisión que se requiera en el cálculo.

Una vez identificada la posición de todas estas fuentes virtuales válidas, se calcula el **delay** del sonido en llegar desde una determinada fuente al auditor, junto con la intensidad con la que este rebota, considerando el coeficiente de reflexión (que determina cuánta energía es reflexionada por el material) de la pared que generó la determinada fuente y cuántas veces el sonido ha rebotado. A partir de estos datos se determina una respuesta al impulso para el par fuente-auditor, la que es construida sobre la base de la superposición de todos los impulsos creados por las fuentes virtuales, cuyos parámetros son amplitud y *delay*.

Al algoritmo se le ingresaron las coordenadas de cada vértice de un geodomo ubicado en la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, simplificado de tal manera de generar una estructura radialmente simétrica respecto del centro y completamente cóncava. Para mantener la simetría del análisis, el acceso a la estructura fue reemplazado por una sección del domo de iguales proporciones, pero manteniendo su concavidad. La estructura es de 12 m de diámetro y 6 m de alto, con coeficientes de reflexión acústica de las paredes y suelo iguales a 0,8 y 0,75 respectivamente. De esta manera, se implementó la modelación computacional que emula la respuesta al impulso para cualquier par fuente-auditor al interior del domo.

Validación experimental del modelo

El primer paso fue realizar un levantamiento significativo de respuestas al impulso representativas al interior del geodomo. Para esto se utilizó un procedimiento experimental basado en la grabación desde un punto determinado el sonido de la explosión de un globo [2], el cual se ubica en otra posición específica. El globo representa la fuente sonora y el micrófono, el auditor. El muestreo de respuestas al impulso dentro del domo se realizó utilizando el supuesto de simetría radial de la estructura con respecto del centro. De esta forma, se grabó el sonido de la explosión de globos distribuidos uniformemente dentro del domo, desde cuatro ubicaciones específicas (Figura 1). Debido a la simetría radial del domo, esta información es suficiente para caracterizar la respuesta al impulso para cualquier par fuente-auditor dentro del domo, con la precisión espacial de la Figura 1.

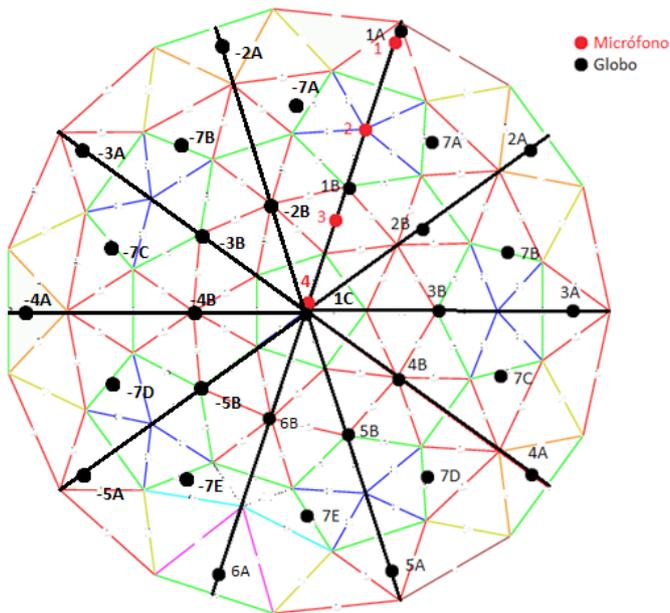


Figura 1. Mapa de muestra.

Para realizar una correcta comparación, al modelo se le ingresaron los datos de la estructura del domo y una lista con las posiciones de los micrófonos y de los globos muestreados anteriormente. De este modo, cada respuesta al impulso entregada por el modelo para cada par fuente-auditor, tiene un símil grabado con el cual compararse.

Las respuestas al impulso obtenidas para cada par fuente-auditor del modelo fueron cuantificadas a una frecuencia de muestreo de 705,6 kHz (16 veces mayor a la utilizada en la grabación de 44,1 kHz), interpolando linealmente para obtener los puntos cuantificados. Estas se resampearon a 44,1 kHz, de modo de poder compararlas con los registros efectuados. En las Figuras 2 y 3 se muestra un par de ejemplos donde se compara la respuesta modelada y la grabada, para dos pares fuente-auditor.

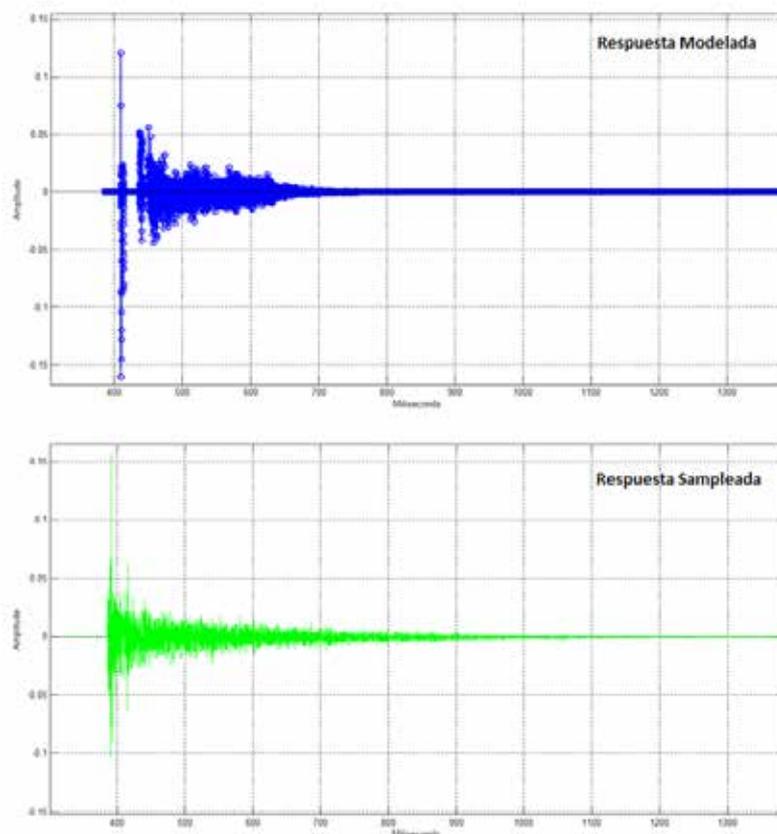


Figura 2. Comparación entre respuestas para el auditor 1 y fuente 4a para 12 niveles de recursividad.

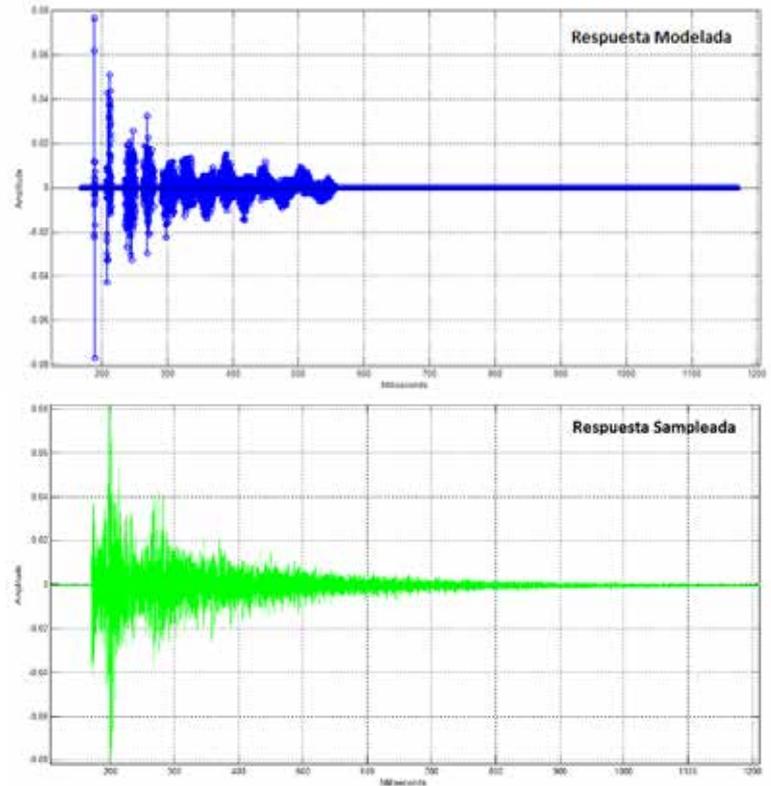


Figura 3. Comparación entre respuestas para el auditor 3 y fuente 5a para 12 niveles de recursividad.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Búsqueda de las paredes más conflictivas

Como este problema se centra en el auditor ya que es él quien, en definitiva, percibe la reverberación, es vital encontrar para cada posición dentro del domo cuáles son las paredes que generan las fuentes virtuales que reproducen el sonido con mayor intensidad. La importancia de esta búsqueda radica en que al encontrar las zonas más conflictivas para cada auditor, se pueden ordenar según intensidad y luego aplicar la solución a las paredes que lideran la lista para disminuir notablemente la reverberación. Para encontrar aquellas zonas de interés, se parte de la base de que pueden existir ondas sonoras provenientes de cualquier punto del domo, por lo tanto, se fija la posición del auditor y se buscan las paredes más conflictivas para todas las fuentes sonoras dentro de la estructura.

Debido a la ya mencionada simetría radial respecto del centro, la búsqueda de las paredes más conflictivas se realizó radialmente, con el fin de revolucionar esta solución en torno al centro de la estructura y encontrar las paredes críticas para cualquier auditor. Para la comparación se tomaron las mismas posiciones en las que hubo micrófonos cuando se realizaron los muestreos al interior del domo, es decir, a 0; 1,67; 3,34 y 5 metros del centro del domo.

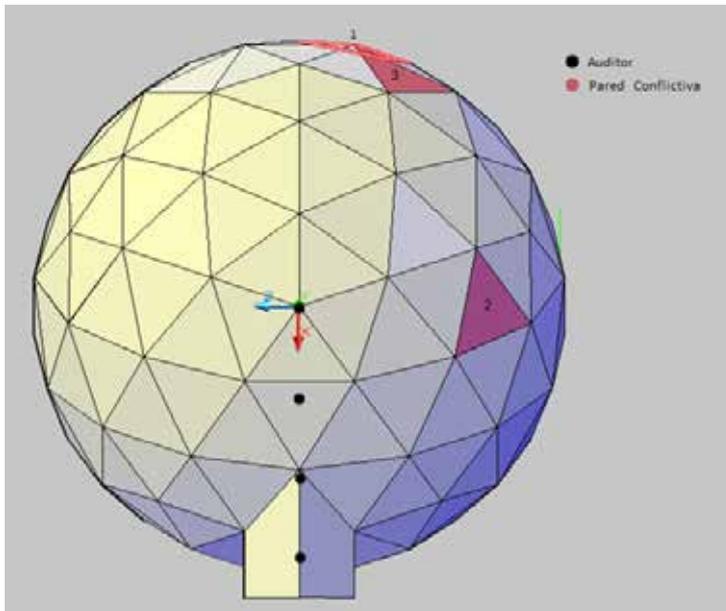
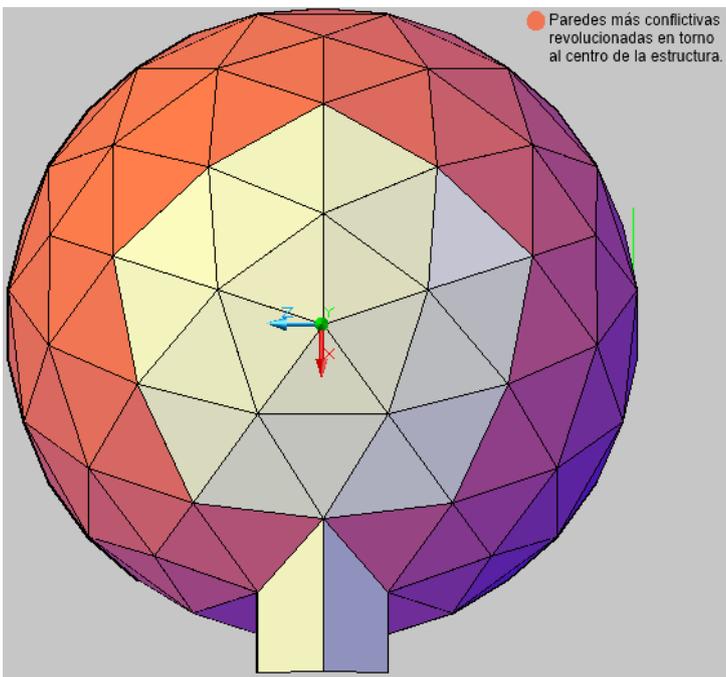
El método de búsqueda consistió en guardar en un arreglo para cada auditor la suma de intensidades en valor absoluto de cada una de las fuentes generadas, por cada pared del domo. Esto quiere decir que en cada posición del arreglo existe la suma de las intensidades de las fuentes virtuales que fueron generadas por la pared del domo asociada a la posición del arreglo.

Este procedimiento se realiza para cada uno de los auditores, por lo que se obtienen cuatro arreglos de paredes ordenadas de forma decreciente de acuerdo a las paredes más energéticas. La búsqueda arrojó que las tres paredes más conflictivas del domo coinciden para los cuatro auditores, y son aquellas que se encuentran en la parte más baja de la estructura. Esto puede verse en la Tabla 1. Las superficies encontradas son aquellas destacadas en la Figura 4.

Ya que este análisis se hizo para la ubicación de cuatro auditores, según muestra la Figura 1, la posición de las tres paredes más conflictivas corresponden a estos auditores. Luego, por simetría radial respecto del centro, se determinó que las superficies en las cuales había que instalar una solución acústica son las mostradas en la Figura 5.

Tabla 1. Suma de las intensidades en valor absoluto de las 13 paredes más conflictivas para cada auditor.

	Auditor 1	Auditor 2	Auditor 3	Auditor 4
Pared 1	12,27	11,45	10,1	9,45
Pared 2	11,99	11,31	9,97	9,42
Pared 3	11,09	11,21	9,96	9,4

**Figura 4.** Las tres paredes más conflictivas.**Figura 5.** Posición de las tres paredes más conflictivas para todos los auditores dentro del domo.

Solución propuesta

La solución propuesta consiste en instalar complejos piramidales de base triangular de espuma de poliuretano y madera en las paredes más conflictivas identificadas. Estos complejos se instalarán en los casquetes planos formados por la intersección de los soportes de la estructura. La madera tiene como principal objetivo absorber el campo de frecuencias más graves (menores a 5kHz), como aislante de membrana. La espuma de poliuretano, por su parte, tiene la función de absorber las frecuencias más

agudas (mayores a 5kHz). Sólo en términos de materiales, cada una de estas pirámides tiene un coeficiente de reflexión acústica aproximado de 0,1.

La forma de pirámides de base triangular se propuso principalmente para aprovechar los casquetes planos creados por la estructura del domo. Junto con la absorción, se busca crear relieve interno en las paredes de la cúpula, de manera que la onda sonora que no es absorbida, en lugar de seguir su curso por el techo curvo del domo, sea desviada hacia otros complejos de espuma, tal como se muestra en la Figura 6. Dado que cada pirámide tiene un coeficiente de reflexión aproximado de 0,1, y su ubicación favorece que el sonido se reflexione de complejo en complejo, se puede hacer la aproximación de que la superficie cubierta por estas soluciones tiene un coeficiente de reflexión total cercana a 0.

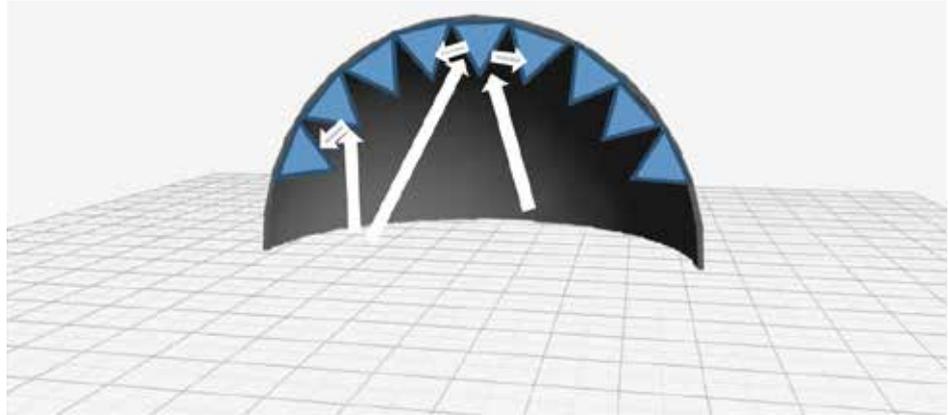


Figura 6. Efecto del relieve creado por los complejos de espuma, en la dirección de reflexión.

Las paredes más críticas se encuentran en la parte del domo más utilizada por los usuarios por lo que la instalación de estos complejos en dicha zona dificultaría el tránsito por el domo. Por ello se plantea que se reemplacen los complejos de esa zona por planchas de espuma de poliuretano de 50 mm de grosor (Sonex, coeficiente de absorción cercano a 0,1) y se restringe la instalación de complejos a la zona de la Figura 7.

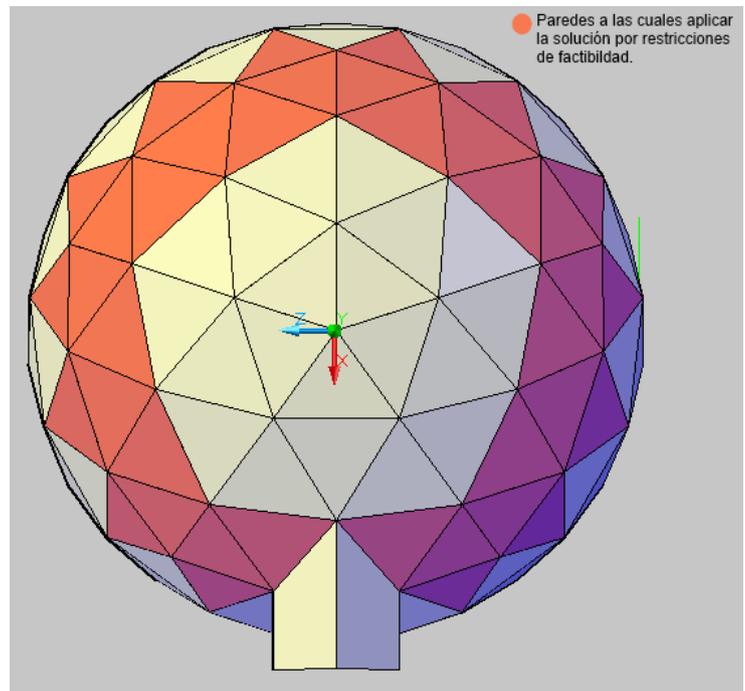


Figura 7. Paredes conflictivas consideradas para la solución.

Junto con la implementación de los complejos y planchas de espuma de poliuretano, se postula instalar alfombras mullidas en el piso de la estructura. El coeficiente de reflexión de este tipo de alfombras, para los rangos de frecuencia de la voz es cercano a 0,5, pero en conjunto con el coeficiente de reflexión del piso de madera, el coeficiente total queda cercano a 0,2.

Se realizaron modelaciones comparando la estructura con y sin la solución propuesta, de forma de contrastar y medir el efecto de la misma. Los datos ingresados permitieron crear nuevas respuestas al impulso para cada par fuente-auditor. En particular se centró la atención en el caso del auditor 3 y la fuente sonora 6b, dado que es el par que más fuentes virtuales generó en el análisis sin agregar elementos absorbentes.

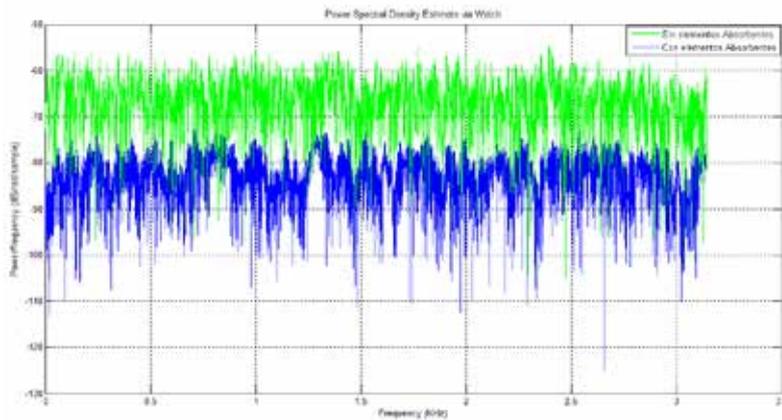


Figura 8. Power Spectral Density para el auditor 3 y fuente 3b para los tres primeros niveles de recursividad, con y sin la solución propuesta.

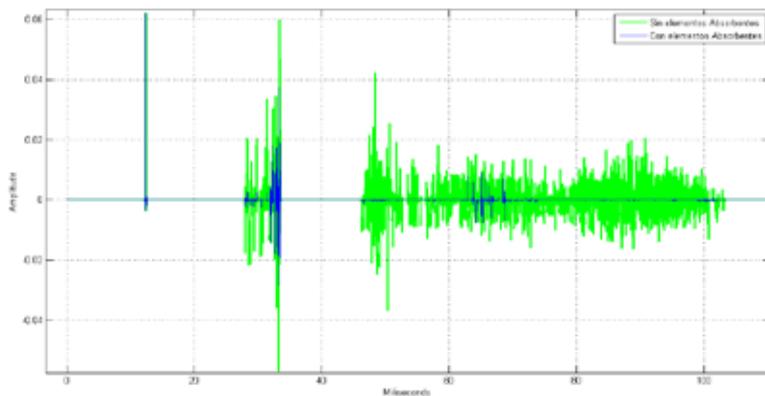


Figura 9. Respuesta al impulso para el auditor 3 y fuente 3b para los tres primeros niveles de recursividad con y sin la solución propuesta.

La respuesta acústica mejora considerablemente en lo que concierne a la reverberación del domo cuando se le añaden elementos absorbentes. En la Figura 8, se puede ver que los niveles de energía se reducen considerablemente llegando a reducirse en promedio 22 decibeles. También se puede apreciar claramente en la Figura 9 que la intensidad de la respuesta al impulso decrece considerablemente. Junto con esto, es posible ver cómo las respuestas que tienen llegadas tardías disminuyen en intensidad, llegando prácticamente a desaparecer luego del tercer nivel de recursividad.

CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación, se pudo encontrar la respuesta al impulso para todo par fuente-auditor dentro de los geodomas semiesféricos. Junto con eso, se pudo identificar aquellos sectores más vulnerables acústicamente. Estas zonas resultaron ser las paredes del domo que se encuentran en los tres primeros niveles de la estructura.

Se propuso una solución concreta, consistente en la instalación de complejos de poliuretano piramidales, planchas del mismo material y alfombras mullidas. La propuesta se analizó, y se comparó con las respuestas al impulso obtenidas por el modelo previamente diseñado. A partir de eso, se pudo concluir

que la alternativa propuesta solucionaría el problema acústico en los domos, reduciendo los niveles de energía por frecuencias en promedio 22 dB/(rad*muestra) y disminuyendo notablemente el ruido asociado a las respuestas al impulso.

Junto con lo anterior, y dado que el análisis se hizo principalmente desde un punto de vista geométrico, es posible concluir que la metodología, el modelo y la solución propuesta son extensibles a geodomas de distintas dimensiones al estudiado. Otros domos de distintas dimensiones, pero que mantengan la geometría, pueden adaptar la solución y extenderla de manera directa, con resultados similares.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Para el cálculo de la respuesta al impulso para un par fuente-auditor dentro de la estructura se utilizó el cálculo de *delays* e intensidad para cada fuente virtual generada de la siguiente forma:

$$\text{Delay}_i = \frac{\text{Distancia (Fuente}_i \text{ - Auditor)}}{\text{Velocidad del sonido}}$$

$$\text{Intensidad}_i = \frac{\text{Distancia (Fuente Original - Auditor)}}{\text{Distancia (Fuente}_i \text{ - Auditor)}} * \prod_{s=1}^S \text{Coficiente}_s$$

S = todas las paredes en que la fuente fue reflexionada

GLOSARIO

Reverberación: Fenómeno producido por la reflexión, que consiste en una ligera permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo.

Power Spectral Density: Función matemática que informa cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de una señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada.

Delay: Tiempo que tarda en ser percibido por un auditor una señal producida desde que fue reproducida por su fuente sonora.

Par fuente-auditor: Dupla que determina las posiciones en términos de coordenadas de una fuente sonora y un auditor. Para cada par fuente-auditor existe una respuesta al impulso distinta asociada.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al profesor Daniel Hurtado por facilitar los planos de los domos.

REFERENCIAS

[1] Borish, J. Extension of the image model to arbitrary polyhedral. Journal of the Acoustical Society of America. 75 (6): 1827-1836, 1984.

[2] Abel, J. S., Bryan, N. J., Huang, P. P., Kolar, M. A., Pentcheva, B. V. Estimating room impulse responses from recorded balloon pops. 129 Convention of the Audio Engineering Society, 2010.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Nicolás Schmidt

2 Investigador guía Juan Pablo Cáceres

