

## MODELIZACIÓN DE SUPERFICIES CURVAS EN LA SIMULACIÓN DE CAMPOS SONOROS FOCALIZADOS

PACS: 43.55.Ka

San Martín, R.; Arregui, A.; Remiro, M.; Machín, J.; Arana, M.  
Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física.  
Campus de Arrosadía. 31006. Pamplona. Spain  
Tel.: 948 168451  
Fax: 948 169565  
E-mail: ricardo.sanmartin@unavarra.es

### ABSTRACT

The curved surfaces in an enclosure add uncertainty to the simulation of the acoustic parameters because of the need to be divided into flat surfaces. This paper analyzes the ability of simulation software based on geometrical acoustics to predict sound focusing due to the presence of concave surfaces in enclosures. The phenomenon and its uncertainty in simple geometries is studied. Furthermore, measured values are compared with simulated values in La Ermita de San Pedro de Etxano (S. XII) located at Olóriz (Navarra) and declared of Cultural Interest, which meets the requirements for geometry.

### RESUMEN

Las superficies curvas en un recinto añaden incertidumbre a la simulación de los parámetros acústicos al ser necesario dividir las superficies planas. Esta comunicación analiza la capacidad de un programa de simulación basado en acústica geométrica de predecir la focalización del campo sonoro debida a la presencia de superficies cóncavas en recintos. Se estudia el fenómeno y su incertidumbre en geometrías simples. Además, se comparan valores medidos y simulados en La Ermita de San Pedro de Etxano (S. XII), sita en Olóriz (Navarra) y declarada Bien de Interés Cultural, que cumple los requisitos en cuanto a geometría.

### 1. INTRODUCCIÓN

En acústica arquitectónica, el efecto de focalización provocado por la presencia de superficies cóncavas es un problema conocido [1]. Y aunque las superficies curvas pueden encontrarse en todos los periodos históricos de la arquitectura, con los nuevos materiales y técnicas de diseño de la arquitectura moderna su presencia en recintos ha aumentado. Por tanto, muchas salas son potencialmente “focalizadoras” debido a la presencia de superficies curvas en su interior. Cuando

el sonido es reflejado en estas superficies, el campo sonoro converge y el nivel sonoro en la zona focalizada se incrementa.

Esta focalización puede ser un efecto deseable, como refuerzo del mensaje sonoro en una zona más apagada, pero también puede generar problemas como ecos flutter, disminución de la inteligibilidad, coloración excesiva, deslocalización de fuente... Generalmente suele reducirse el efecto focalizador con absorbentes o difusores. Si la absorción o la difusión no son suficientes, los diseñadores pueden considerar o bien redirigir las reflexiones o más drásticamente, revisar la geometría del recinto.

Cuando hablamos de campos sonoros simulados, nos encontramos con la dificultad de reflejar computacionalmente, al menos en los programas de simulación basados en acústica geométrica, fenómenos ondulatorios como la difusión, la difracción o el analizado en este trabajo, la focalización del campo sonoro generada por la presencia de superficies cóncavas en un recinto. Las superficies curvas en una sala son también causa de incertidumbre a la hora de simular sus parámetros acústicos. Esto es debido a que en los programas de simulación es necesario dividir estas superficies en varias superficies planas. Y esta división que puede ser realizada con mayor o menor precisión, no siendo garantía de resultados más precisos una mayor resolución geométrica. Lo mismo sucede con las superficies planas cercanas a la fuente, donde una mayor resolución puede generar resultados indeseados. Se hace necesario por tanto conocer los algoritmos implicados en la recreación del fenómeno para realizar una simulación con la menor incertidumbre posible.

M. Vercammen [2] realiza el estudio más exhaustivo sobre este tema hasta la fecha, calculando soluciones de la ecuación de ondas para algunas geometrías simples, como esferas o cilindros. Llega a la conclusión que en el punto focal, la presión depende de la longitud de onda, al igual que la anchura de la región focalizada. Así pues, para pequeñas longitudes de onda, la amplificación es alta pero el área de influencia es pequeño, mientras que para frecuencias más bajas, la amplificación es menor siendo el área de enfoque mayor (ver Figura 1).

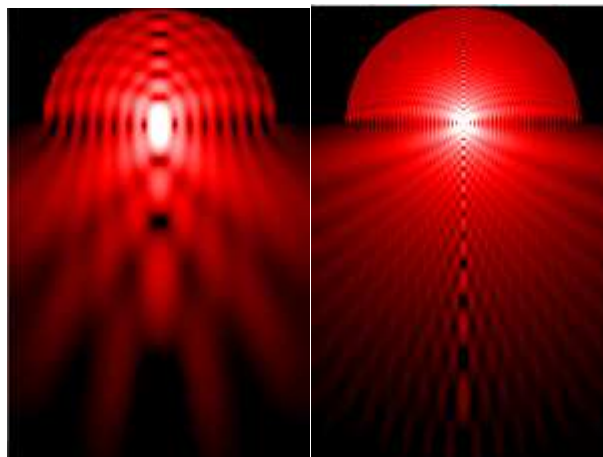


Figura 1. Presión del campo sonoro reflejado para una semiesfera a 250 Hz (izda) y 1 kHz (dcha). El radio de la esfera es 5,4 m, el área mostrada es 14x21 m, la fuente se sitúa en el punto central. Rango de color: blanco +10 dB, negro -20 dB [3].

El mismo autor estudia también la problemática de las superficies curvas desde el punto de vista de la acústica geométrica. Con esta teoría el comportamiento del sonido es descrito mediante leyes geométricas, como en la óptica geométrica. Este concepto sólo es válido para altas frecuencias, donde las dimensiones de las superficies reflectantes son considerablemente

mayores que la longitud de onda. Los rayos entonces se reflejan de manera especular, de acuerdo a la ley de Snell, en el punto de intersección con la superficie reflectante. Para superficies cóncavas, se utiliza para calcular la reflexión el plano tangente en el punto de intersección.

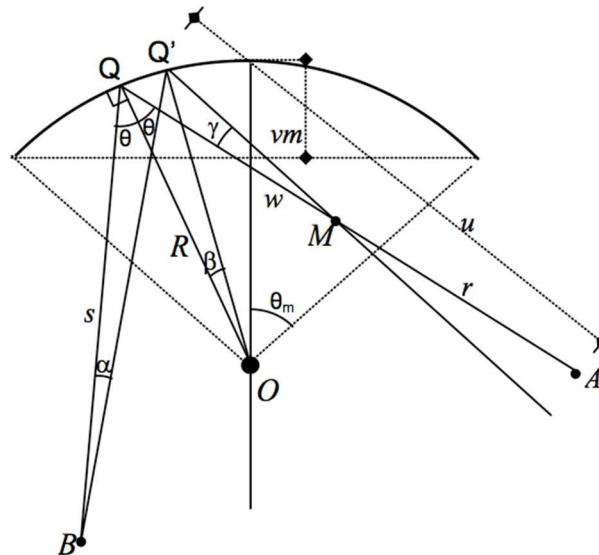


Figura 2. Reflexión en superficies cóncavas [4]

En la figura 2 se tiene una superficie cóncava reflectante de radio  $R$ . La fuente se sitúa en el punto  $B$ , el punto  $M$  es el punto focal resultante, y el punto  $A$  es la posición del receptor. Para esta situación se puede derivar la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{w} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R \cos \theta}$$

La amplificación de la curvatura, es decir, el incremento de nivel de la superficie comparado con un reflector plano sería:

$$\Delta L_c = -10 \lg \left( \left| \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + \frac{1}{s} \right)} \frac{2}{R_x \cos \theta_x} - 1 \right| \right) - 10 \lg \left( \left| \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + \frac{1}{s} \right)} \frac{2}{R_y \cos \theta_y} - 1 \right| \right)$$

Esta fórmula se puede interpretar como el incremento de nivel de presión sonora de una superficie curva doble. En una esfera, el radio de curvatura  $R$  es igual en ambas direcciones, porque la expresión quedaría reducida a:

$$\Delta L_c = -20 \lg \left( \left| \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + \frac{1}{s} \right)} \frac{2}{R \cos \theta} - 1 \right| \right)$$

El cilindro sólo tiene curvatura en una dirección. Si uno de los radios de la fórmula general tiende a infinito, se concluye que el incremento de presión sonora para el cilindro es:

$$\Delta L_c = -10 \lg \left( \left| \frac{1}{\left( \frac{1}{u} + \frac{1}{s} \right)} \frac{2}{R_x \cos \theta_x} - 1 \right| \right)$$

La focalización causada por superficies curvadas en dos direcciones (esferas, elipsoides) es mucho más fuerte que la causada por superficies que se curvan en una sola dirección (cilindros). En ambas geometrías se manifiesta una de las limitaciones de la acústica geométrica, que predice niveles infinitos de presión sonora en el punto focal. Vercammen concluye que la acústica geométrica, y los programas basados en ésta podrían ser insuficientes, sobre todo para conseguir simular adecuadamente la sala en el área focal donde se haría necesario utilizar métodos basados en la acústica ondulatoria.

Hoy día, los algoritmos internos utilizados en los programas de simulación, pese a basarse en los principios de la acústica geométrica, tratan de reflejar los fenómenos ondulatorios. Es habitual tener en cuenta coeficientes de difusión, tamaño de las superficies reflectoras, difracción en aristas o en pequeños obstáculos...

El programa utilizado en este estudio [5] aporta varias recomendaciones a la hora de modelizar superficies. Como regla general, recomienda que las superficies sean mayores que la longitud de onda de frecuencias medias. Asimismo, todas las superficies de la sala en cuestión deben ser planas. Por lo tanto, se deberán representar las superficies curvas como superficies planas. Con este método, no todos los rayos reflejados en una superficie cóncava se reflejarán en el punto focal. La reflexión de cada rayo tendrá que ver con el ángulo de incidencia sobre la superficie segmentada que le corresponda según su trayectoria. Por tanto, cuando existe una superficie curva segmentada, y la fuente esté en el centro, la energía se extenderá alrededor del punto focal. Con este método, la presión en el punto focal no se incrementará al aumentar la segmentación de la superficie, ya que el número de rayos que detecte el receptor depende del número de rayos emitidos por la fuente y del ángulo de apertura de la superficie cóncava.

A la hora de sustituir las superficies curvas por otras planas, Odeon no aconseja utilizar muchas superficies y sugiere que subdivisiones cada 10º-30º serían suficientes para reproducir el fenómeno de la focalización. Además, se debe especificar la clase de las superficies cóncavas como "fractional", lo que hará que al subdividir las en varias superficies el programa sume el área de todas a la hora de calcular la difusión y difracción asociada al tamaño de la superficie.

## 2. FOCALIZACIÓN EN GEOMETRÍAS SIMPLES

Con el objetivo de analizar la capacidad de este programa de simulación de reproducir el comportamiento sonoro de una superficie curva y la focalización que ésta produce, a continuación se exponen los resultados obtenidos en geometrías simples. Se modelizó con Odeon dos tipos de geometría: una semiesfera y un semicilindro. Para ello se utilizó el editor del propio programa, que permite crear este tipo de superficies, indicando el número de caras que se han de utilizar dependiendo de la precisión que se requiera. Las experiencias realizadas se diseñaron con 6, 18, 60 y 120 caras - subdivisiones cada 30º, 10º, 3º y 1,5º respectivamente - realizando una simulación multireceptor para cada una de ellas.

Las geometrías simples mencionadas fueron incluidas dentro de una sala rectangular con coeficiente de absorción 1 en todas sus caras, pretendiendo reflejar únicamente la contribución de las geometrías bajo estudio, que por el contrario se diseñaron 100% reflectantes.

Tanto la semiesfera como el semicilindro tienen un radio de 5,4 metros, y en ambos casos se situó una fuente omnidireccional en el centro de la forma geométrica correspondiente y 27 receptores con 1 metro de separación cada uno, colocados en el mismo eje que la fuente.

Los resultados de la simulación pueden observarse en la Figura 3, que compara los niveles de presión sonora en la banda de 500 Hz para las distintas precisiones en la construcción de la semiesfera y del semicilindro con el nivel predicho por la acústica geométrica. Conforme el receptor se aleja de la fuente, lejos de la zona de focalización, el nivel de presión sonora es similar al predicho por la teoría geométrica, sin importar el número de divisiones de la superficie curva. Sin embargo, en distancias cercanas a la fuente el número de segmentos en el que se divide la superficie curva toma mayor importancia, llegando a marcar diferencias de más de 20 dB en el mismo punto.

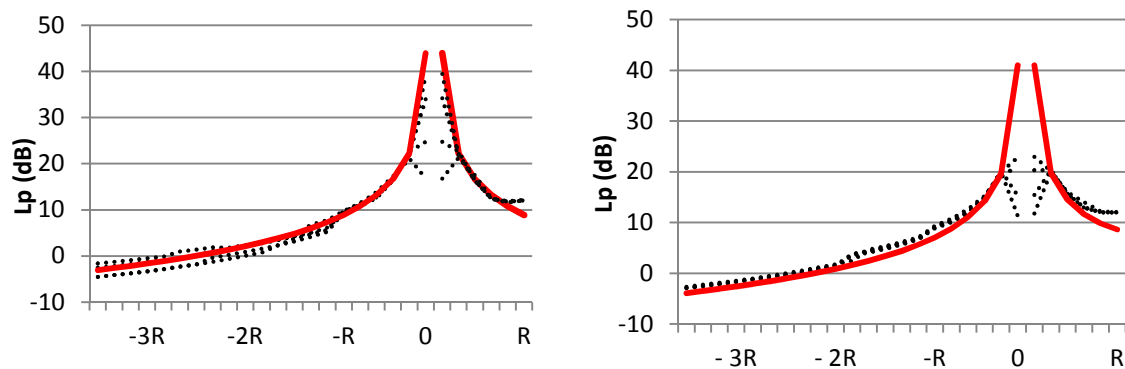


Figura 3. Niveles de presión sonora simulados (líneas negras punteadas) y predichos por la acústica geométrica (rojo) para las dos geometrías simples, semiesfera (izda) y semicilindro (dcha). El eje X representa la distancia entre los receptores y la fuente en pasos del radio  $-R$ -de la geometría.

### 3. CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA FOCALIZACIÓN EN SALA TEST

El recinto utilizado en esta experiencia como sala test es La ermita de San Pedro de Etxano (Figura 4), situada en el municipio navarro de Olóriz. El templo es una iglesia rural típica, de estilo románico, que se construyó entre 1150 y 1160. Ésta se compone de una nave de tres tramos con bóveda de medio cañón apuntado sobre arcos fajones. Su ábside es de forma semicircular, cubierto de bóveda de horno. Recibe luz por tres vanos en el ábside abocinados y dispone de otra ventana de medio punto en el lado de la Epístola [6]. Las paredes, techos y suelos están hecho de sillería, y la pared del fondo está recubierta de yeso. Tiene dos puertas de madera a cada lado de la nave y pequeñas ventanas de alabastro en el fondo. Su geometría es, en principio, apropiada para este estudio, ya que cuenta con un semicilindro en el fondo y en el techo.





Figura 4. Exterior de la Ermita San Pedro de Etxano (izda) y vista interior del fondo con forma semicilíndrica.

Con un volumen de 750 m<sup>3</sup>, la sala se emplea tanto para ceremonias religiosas y romerías, como para conciertos corales, folklóricos y de música sacra. El problema más importante con el que nos encontramos en esta sala fue que tiene un tiempo de reverberación demasiado elevado. Se realizaron mediciones “in situ” en la sala del tiempo de reverberación, niveles de presión sonora y otros parámetros acústicos. Estos datos se utilizaron también para validar las simulaciones realizadas.

Las mediciones se realizaron con la sala desocupada. Únicamente se encontraban en su interior las cuatro personas del equipo de medición. La temperatura durante el momento de la medición era de 12° y la humedad relativa era del 70%. El equipo de medición constaba de fuente acústica dodecaédrica DO12, ordenador portátil con winMLS software, tarjeta de sonido VXPocket, amplificador InterM-M1000 y micrófonos GRAS omnidireccionales. La señal acústica de excitación fue un sweep logarítmico de 40 segundos y se obtuvieron unos tiempos de reverberación T30mid en torno a 5.5 segundos en todos los puntos analizados. El esquema con la posición de la fuente y los receptores se muestra en la Figura 5:

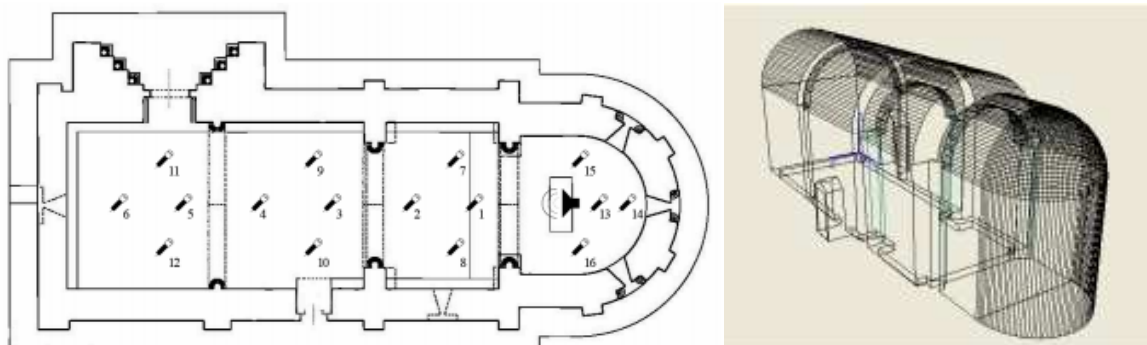


Figura 5. Disposición de micrófonos y fuentes (izda) y modelización de la sala test.

Los coeficientes de absorción se ajustaron de forma que las diferencias entre los tiempos de reverberación promedio medidos y simulados fueran inferiores a 1 jnd. Pese a reproducir satisfactoriamente la acústica de la sala, no se pudieron encontrar indicios de la focalización esperada debido a los tiempos de reverberación tan altos presentes.

Para intentar encontrar qué parte de los niveles sonoros simulados correspondía con la reflexión proveniente de las superficies curvas, y cuál al resto de superficies, se hizo necesario analizar las primeras reflexiones de forma independiente modificando artificialmente los coeficientes de absorción de las superficies reflectantes. Se comparó por tanto una simulación del sonido directo de la fuente en la sala – equivalente a todas las superficies 100% absorbentes – con otra simulación en la que las únicas superficies reflectantes fueron las superficies curvas. Se utilizó un programa creado al efecto para comparar mallas [7].

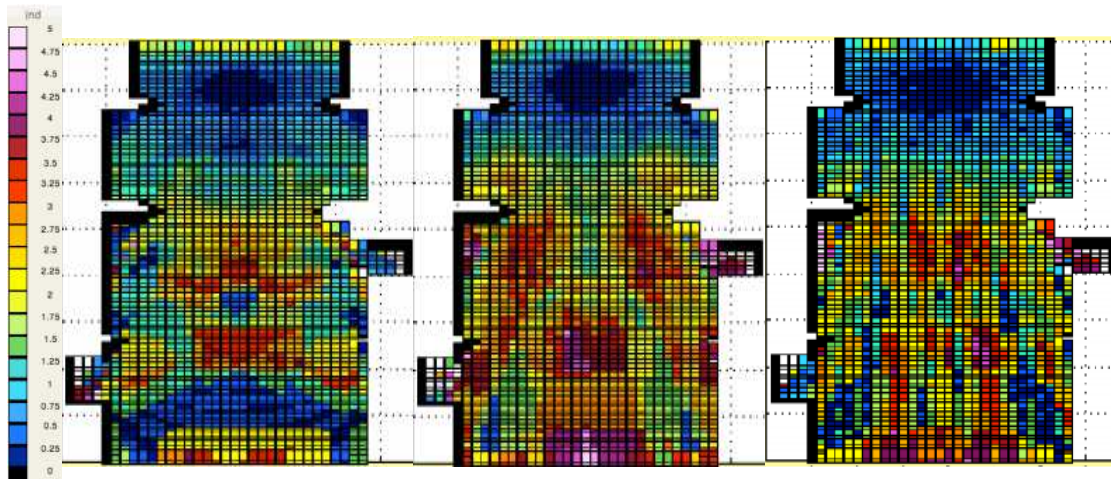


Figura 6. Incremento de nivel de presión sonora generado por las superficies curvas en la banda de 1 kHz. Subdivisiones cada 45º (izda), 22,5º (centro) y 5º (dcha)

En la Figura 6 se muestra el incremento de nivel de presión sonora generado por las superficies curvas presentes en la sala test para la banda de 1 kHz. Podía preverse la amplificación en el eje central, reduciéndose a medida que el receptor se aleja del foco. Asimismo, según la teoría ondulatoria, se encontrarían arcos de amplificación dependientes de la frecuencia, seguidos de arcos de ausencia de amplificación debidos a interferencias. Los resultados no mantienen una correlación clara entre el número de subdivisiones y el valor obtenido. Curiosamente, pueden observarse patrones diferentes, similares a los esperados según la acústica ondulatoria, pero en este caso generados por la diferente subdivisión de las superficies curvas. Al aumentar el número de división de las superficies curvas se combinan zonas de amplificación con zonas de ausencia de amplificación, pero también se puede observar cierta concentración de la amplificación, primero en tres zonas fácilmente diferenciadas, y a medida que se aumenta la división, llega a aparecer una sola focalización central, que se ensancha conforme el receptor está más alejado de la fuente. Estos patrones se repetían para el resto de frecuencias, convirtiendo la focalización en la sala en un fenómeno prácticamente independiente de la frecuencia.

## CONCLUSIONES

Para las geometrías simples estudiadas, los resultados de Odeon en receptores muy cercanos a la fuente, y por tanto dentro de la zona de focalización, son los más alejados del valor teórico predicho por la acústica geométrica. Sin embargo, en zonas más alejadas, los valores simulados siguen una tendencia similar. De hecho, fuera de la zona focal, o cuando la focalización no se presente en la sala, no parece necesario representar las superficies curvas con la subdivisión recomendada en las especificaciones del programa de simulación. Los resultados indican que con menos subdivisiones puede obtenerse la misma precisión. Aunque por otro lado, el aumento de número de superficies en la creación de la geometría en la sala test analizada supuso

variaciones de nivel de presión sonora de hasta 3 jnd en algunos puntos, observándose patrones de focalización diferentes.

## REFERENCIAS

- [1] Kuttruff, H. Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls. *Acta Acustica united with Acustica* 77, 176-182 (1992)
- [2] Vercammen, M, Sound Concentration Caused By Curved Surfaces, PhD thesis, Eindhoven University of Technology (2012).
- [3] Vercammen, M. Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation. *Acta Acustica united with Acustica* 96, 82-91 (2010).
- [4] Vercammen, M. Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part II: Geometrical Acoustics and Engineering Approach. *Acta Acustica united with Acustica* 96, 92-101 (2010).
- [5] Christensen, C. L., Koutsouris, G., ODEON Room Acoustic Software Version 12 User Manual, 2<sup>a</sup> edition. Basics, Industrial, Auditorium and Combined Edition (2013).
- [6] Ortega, A. Valdorba Románica. Asociación de Desarrollo Valdorba – Orbaibarrako Garapenerako Elkartea (2005).
- [7] San Martín, R., Arregui, A., Machín, J., Arana, M., Comparison of measured and simulated room acoustic parameter values using high resolution grids. *Acoustics Australia* 42, 27-30 (2014).