

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO NUMÉRICO "STREET CANYON" PARA PROPAGACIÓN DE RUIDO EN ÁREAS URBANAS

Asunción González-Rodríguez*, Jacob D.R. Bordón, Cristina Medina, Juan
J. Aznárez, Orlando Maeso y Fidel García

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
35017 Las Palmas de Gran Canaria, España
(asuncion.gonzalez, jacobdavid.rodriguezboron, cristina.medina, juanjose.aznarez,
orlando.maeso, fidel.garcia)@ulpgc.es
web: <https://www.siani.es>

Palabras clave: Ruido urbano, Contaminación acústica, Método sin malla, Aitken-Shanks

Resumen. *El ruido es uno de los fenómenos contaminantes del que más se quejan los ciudadanos. En los últimos años el ruido derivado de actividades de comercio y ocio que afecta a calles peatonales, en la mayor parte de los casos calificadas como residenciales, se ha incrementado notablemente. Tener la posibilidad de predecir los niveles de ruido producidos por grupos de personas situados en la calle es importante para abordar este problema del ruido ambiental. El objetivo de este trabajo es la validación de un modelo numérico basado en la técnica fuente-imagen que permite reproducir la propagación acústica producida por distintas fuentes puntuales omnidireccionales, que representan el ruido generado por personas, entre dos contornos paralelos reflejantes y un tercero perpendicular a los anteriores, también reflejante. Este modelo representa una calle estrecha entre edificios altos. La técnica empleada conduce a una serie oscilante con una convergencia muy lenta que es acelerada mediante algoritmos eficientes. Con el espectro de emisión y la intensidad de cada una de estas fuentes, se calculan los índices acústicos habituales en cualquier punto a partir de los resultados en frecuencia obtenidos de este modelo. Con el fin de verificar el modelo numérico se han realizado medidas experimentales en el pasaje de acceso del edificio de Ciencias Básicas de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Para ello se han utilizado hasta 5 fuentes sonoras y 2 sonómetros dispuestos en múltiples configuraciones. Los resultados obtenidos permiten afirmar la idoneidad del modelo.*

1 INTRODUCCIÓN

El ruido es uno de los principales factores de estrés en las zonas urbanas. En los últimos años, las ciudades se ven afectadas por un tipo diferente de contaminación acústica, el derivado de actividades de comercio y ocio que afecta a núcleos peatonales cada vez más extensos. En su mayoría se trata de zonas calificadas como residenciales en las que los vecinos se ven sometidos a unos niveles de ruido muy elevados a lo largo de gran parte del día y la noche.

Para determinar los niveles de ruido, la técnica habitual es la medida experimental directa, mediante sonómetros u otros equipos de medida. Es la forma más precisa y segura de elaborar mapas de contaminación acústica. Aun así, esta técnica adolece de dos problemas fundamentales: 1) Es costosa si se quiere un alto nivel de detalle y por tanto se incluye un elevado número de puntos de medida, y 2) no permite predecir los niveles de ruido en situaciones futuras si se proponen cambios de uso o se incorporan nuevas actividades.

Aunque los estudios sobre la transmisión del sonido en zonas urbanas se remontan a los años sesenta, los modelos matemáticos y numéricos resultantes siguen siendo incapaces de predecir con exactitud los campos sonoros en las calles de las ciudades. Tener la posibilidad de predecir los niveles de ruido producidos por grupos de personas situados en la calle es importante para abordar este problema del ruido ambiental.

El objetivo de este artículo es la validación experimental de un modelo numérico basado en la técnica fuente-imagen que permita reproducir la propagación acústica producida por una o varias fuentes puntuales omnidireccionales entre 2 contornos paralelos reflejantes y un tercero perpendicular a los anteriores, también reflejante. Este modelo puede representar lo que se conoce como cañón urbano (street canyon) [1], en definitiva, una calle estrecha entre edificios altos. Para algunas situaciones reales, puede ser un modelo muy representativo de los niveles de ruido para observadores en una calle con una densidad media-alta de fuentes emisoras.

2 MODELO MATEMÁTICO PARA CONTORNOS REFLEJANTES

El problema consiste en determinar la presión acústica en una serie de puntos (receptores) debida a una serie de fuentes (consideradas puntuales y omnidireccionales), situadas en un dominio delimitado por dos contornos verticales paralelos (fachadas infinitas) y un tercero perpendicular a los anteriores (suelo), siendo todos perfectamente reflejantes.

Se considera que el medio de propagación del sonido (aire) está en reposo (sin viento), las vibraciones mecánicas son de pequeña amplitud, y es isoterma, homogéneo y no viscoso. En régimen armónico, la ecuación que gobierna la propagación de ondas acústicas es la ecuación de Helmholtz [2, 5]:

$$\nabla^2 p + k^2 p + \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = 0 \quad (1)$$

donde p es la presión acústica en cualquier punto \mathbf{x} del dominio analizado, k es el número de onda $k = w/c$, w es la frecuencia angular ($w = 2\pi f$), f es la frecuencia ordinaria (en Hz), c es la velocidad del sonido, y $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ fuente interna situada en \mathbf{x}_0 correspondiente

a una función Delta de Dirac. Los contornos se consideran perfectamente reflejantes, con lo cual el gradiente de presión es nulo en ellos:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

La solución para el problema tridimensional es:

$$p(k, r) = \frac{1}{4\pi r} e^{-ikr} \quad (3)$$

donde $r = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_0|$ es la distancia desde el receptor (\mathbf{x}) al punto de la fuente (\mathbf{x}_0). Mediante la superposición de otra fuente imagen de la original respecto a un plano (método de las imágenes), se verifica que dicho plano es perfectamente reflejante. Ello permite plantear una solución de Green del semiespacio:

$$p(k, r) = \frac{1}{4\pi r} e^{-ikr} + \frac{1}{4\pi \tilde{r}} e^{-ik\tilde{r}} \quad (4)$$

En la que \tilde{r} es la distancia desde la imagen al punto de la fuente. La propagación del sonido en una calle estrecha (*street canyon*) puede calcularse usando nuevamente el método de las imágenes. La Fig. 1 representa un esquema general del método, en donde se parte de una fuente situada a una altura z_0 del suelo entre dos fachadas de altura y longitud infinitas separadas una distancia A . A partir de una sucesión infinita de fuentes virtuales en los lados interiores de las fachadas y suelo, se obtiene una solución que permite satisfacer la Eq. (2) en los contornos del problema. Por tanto, la presión acústica en cualquier punto receptor entre fachadas pueden calcularse a partir de:

$$p(k, r) = \frac{1}{4\pi} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{r_n} e^{-ikr_n} \right] \quad (5)$$

$$r_n = [(x \pm x_0 + 2nA)^2 + (y - y_0)^2 + (z \pm z_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

siendo $\mathbf{x}(x, y, z)$ la posición del receptor, $\mathbf{x}_0(x_0, y_0, z_0)$ la posición de la fuente, i y k han sido definidos anteriormente. Esta serie constituye la solución de Green al problema planteado.

Esta serie tiene una velocidad de convergencia sublineal. Para acelerar la convergencia de la serie se ha utilizado el procedimiento Δ^2 de Aitken [3, 4], en donde la serie original se transforma en otra:

$$\hat{p}_n = p_n - \frac{\Delta p_n^2}{\Delta^2 p_n} \quad (6)$$

donde $\Delta p_n = p_{n+1} - p_n$ siendo p_n la expansión finita de n términos de Eq. (5). La aplicación sucesiva de esta transformación permite incrementar la velocidad de convergencia. Así, la serie transformada Δ^4 de Aitken-Shanks es:

$$\check{p}_n = \hat{p}_n - \frac{\Delta \hat{p}_n^2}{\Delta^2 \hat{p}_n} \quad (7)$$

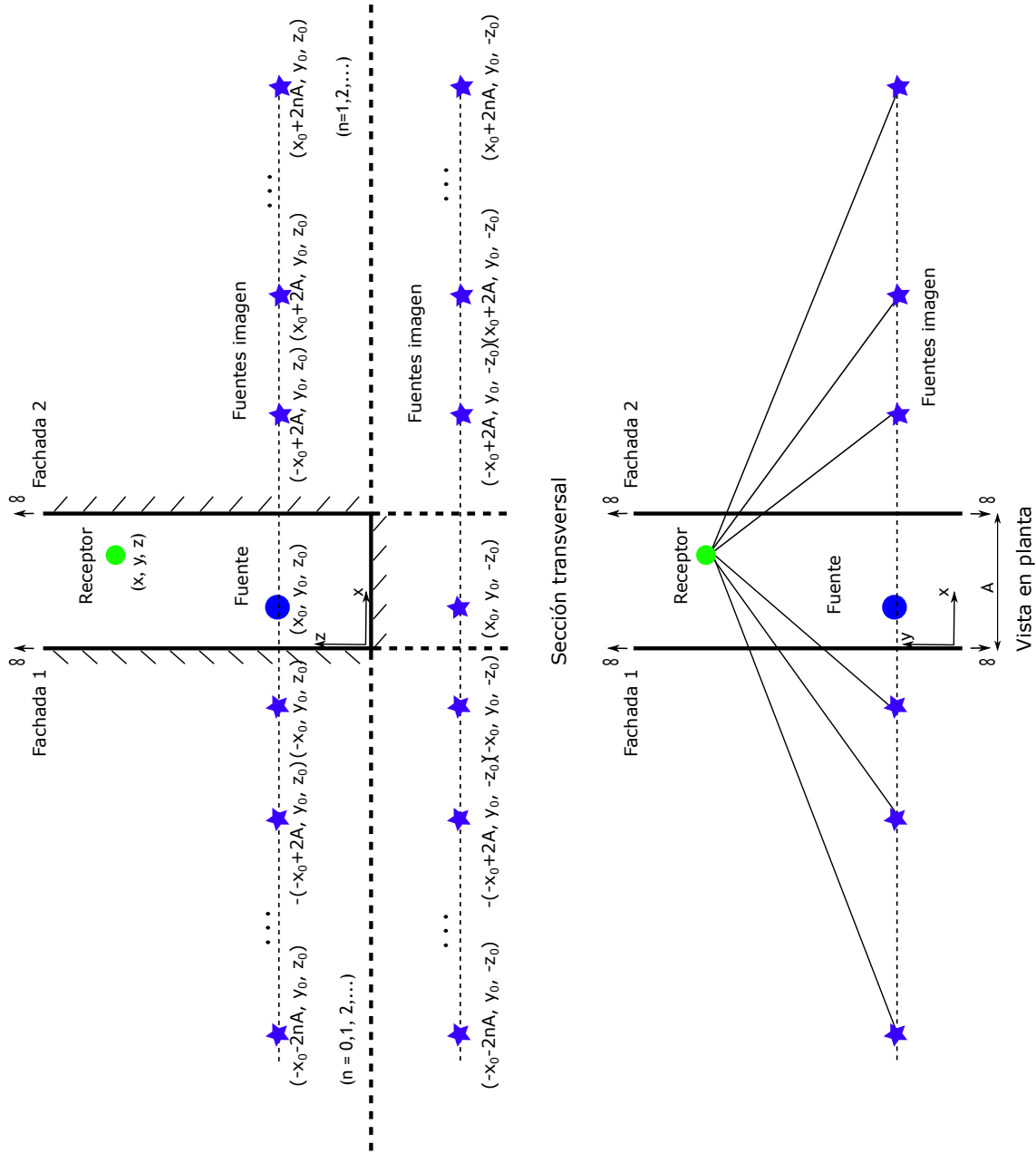


Figura 1: Superposición de fuente e imágenes para obtener la solución de Green de la presión sonora debida a una fuente puntual y omnidireccional en una calle con fachadas paralelas infinitas y suelo perfectamente reflejantes.

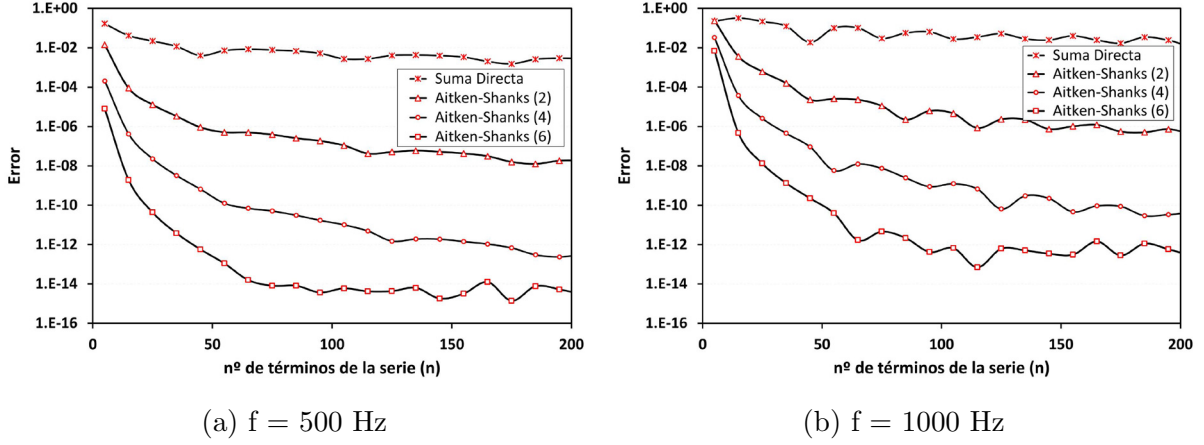


Figura 2: Error frente al número de términos de la serie

en la que \check{p}_n es:

$$\check{p}_n = \frac{\begin{vmatrix} p_n & p_{n+1} & p_{n+2} \\ \Delta p_n & \Delta p_{n+1} & \Delta p_{n+2} \\ \Delta p_{n+1} & \Delta p_{n+2} & \Delta p_{n+3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \Delta p_n & \Delta p_{n+1} & \Delta p_{n+2} \\ \Delta p_{n+1} & \Delta p_{n+2} & \Delta p_{n+3} \end{vmatrix}} \quad (8)$$

La Fig. 2 representa la convergencia de la serie al aplicar el método Aitken-Shanks Δ^2 , Δ^4 , Δ^6 y la suma directa frente al número de términos de la serie para las frecuencias de 500 Hz y 1000 Hz. En nuestro modelo hemos tomado 50 términos de la serie transformada Δ^4 de Aitken-Shanks, cuya convergencia conlleva errores en ambos casos menores que 10^{-8} .

3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del experimento

Para validar el modelo matemático se realizó una toma de datos en el pasaje de acceso del Edificio de Ciencias Básicas situado en el Campus Universitario de Tafira, ya que las características del mismo son idóneas para reproducir el efecto del *street canyon*. El ancho del pasaje es de 8.3 m y los edificios a ambos lados del mismo son de 3 plantas. Se estableció un origen de coordenadas en centro de la fachada oeste del pasaje, donde el eje y tiene dirección longitudinal, el x tiene dirección transversal, y el origen de coordenadas de z se sitúa en el suelo. La Fig. 3 muestra un plano de situación del lugar y la posición del sistema de referencia, mientras que la Fig. 4 muestra cómo es el pasaje desde el interior.

Como emisores de sonido se utilizaron 5 altavoces del fabricante Ultimate Ears modelo Wonderboom-2. La Tabla 1a identifica cada altavoz con una etiqueta (A1, A2, A3, A4, A5) y su posición, mientras que la Fig. 4a muestra una foto de éstos en el pasaje. La

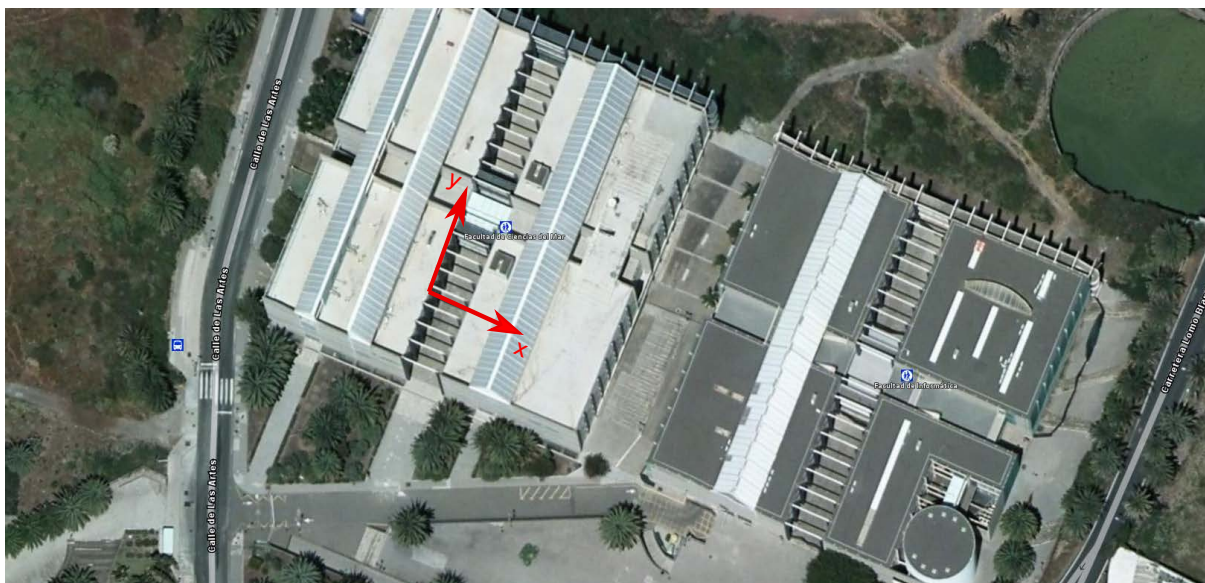


Figura 3: Edificio de Ciencias Básicas (Campus Universitario de Tafira-ULPGC). Posición del sistema de referencia: coordenadas UTM (455560, 3105428, 298) m.



(a) Situación de las fuentes/altavoces



(b) Situación de los receptores/sonómetros

Figura 4: Situación de fuentes y receptores en el pasaje

Altavoz	Posición (m)	Conexión Bluetooth		
A1	(4.16,0.00,1.42)	SB1		
A2	(4.16,2.00,1.42)	SB2		
A3	(4.16,4.00,1.42)	Emparejado a A2	Sonómetro	Posición (m)
A4	(4.16,-2.00,1.42)	SB3	R1	(6.52, 0.00, 1.33)
A5	(4.16,-4.00,1.42)	Emparejado a A4	R2	(7.12, 0.00, 8.61)
(a) Situación de los altavoces			(b) Situación de los receptores	
Ensayo	Altavoces activos	Receptores activos		
1	A1, A2, A3, A4, A5	R1, R2		
2	A2, A3	R1, R2		
3	A1	R1, R2		
4	A4, A5	R1, R2		
(c) Altavoces y receptores activos en cada ensayo				

Tabla 1: Configuración de altavoces y receptores en cada ensayo

señal de audio se envía mediante 3 conexiones Bluetooth desde un ordenador portátil a los altavoces A1, A2 y A4, mientras que los altavoces A3 y A5 se emparejaron respectivamente a los altavoces A2 y A4, tal y como se representa en la Fig. 5. En todos los experimentos realizados, la señal de audio enviada a los altavoces fue ruido rosa.

Como receptores se usaron dos sonómetros marca Brüel & Kjær modelos 2270 y 2250-L. Durante la toma de datos se colocaron en ambos sonómetros la correspondiente pantalla antiviento, tal y como establece el fabricante para medidas en el exterior. La posición de los sonómetros se muestra en la Tabla 1b, mientras que la Fig. 4b muestra una foto de éstos en el pasaje.

Se realizaron un total de 4 ensayos, siendo la duración de cada uno de ellos de 30 segundos. Cada ensayo difiere únicamente en los altavoces activos durante el mismo, según recoge la Tabla 1c.

3.2 Configuración del modelo matemático

El modelo matemático descrito en el apartado 2 permite obtener la presión sonora (en Pa) para una fuente puntual de intensidad variable con la frecuencia y posición según establece la solución de Green. Para poder comparar adecuadamente los resultados experimentales y los resultados obtenidos con este modelo numérico, es necesario, por un lado, medir las presiones en los mismos términos que lo hacen los sonómetros, y, por otro, establecer un espectro de emisión de las fuentes.

Los sonómetros recogen el nivel de presión sonora L_p en dB definido por:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{\langle p^2 \rangle}{\langle p_{\text{ref}}^2 \rangle} \quad (9)$$

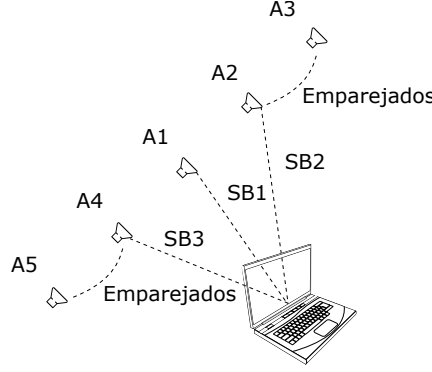


Figura 5: Conexiones Bluetooth entre portátil y altavoces

donde la expresión $\langle p^2 \rangle$ es la media cuadrática temporal de la presión acústica:

$$\langle p^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt \quad (10)$$

y $\langle p_{ref}^2 \rangle$ es la media cuadrática de una determinada presión de referencia. Dicho L_p se mide para todo el espectro audible, pero se suman energéticamente todas las contribuciones dentro de las bandas de frecuencias de tercio de octava comprendidas entre 12.5 Hz y 16 kHz, de tal manera que los sonómetros exportan un valor de L_p para cada banda de tercio de octava. Por ello, no es suficiente con ejecutar el modelo para cada una de las frecuencias centrales de tercio de octava, sino que se debe ejecutar para varias frecuencias dentro de la banda, y luego sumar convenientemente las presiones resultantes. Se ha encontrado que con 20 frecuencias dentro de cada banda de frecuencias es suficiente para alcanzar la convergencia de un L_p promedio representativo de cada banda.

La intensidad de todas las fuentes se establece según un ensayo previo en campo abierto con el sonómetro situado a 1 metro de distancia. Esto permite obtener un espectro de la fuente con el cual asignar la intensidad de la misma para cada banda de frecuencia. En la Fig. 6 se muestra el esquema del ensayo y el espectro de presiones obtenido.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presenta un análisis comparativo y una discusión sobre los resultados experimentales y los resultados obtenidos mediante el modelo numérico. Las Figs. 6 a 10 muestran la configuración de fuentes y receptores de cada ensayo, y los resultados experimentales y numéricos en cada caso en forma de espectros de nivel de presión.

En todos los ensayos se observa la tendencia general de que por debajo de la frecuencia de 63 Hz no hay un buen acuerdo entre los resultados experimentales y los resultados numéricos. Sin embargo, por encima de esa frecuencia y hasta 16 kHz hay un paralelismo apreciable.

En la Fig. 7 se muestra la configuración del primer ensayo y los resultados obtenidos. El ensayo consistió en activar las cinco fuentes, y medir las presiones en los receptores

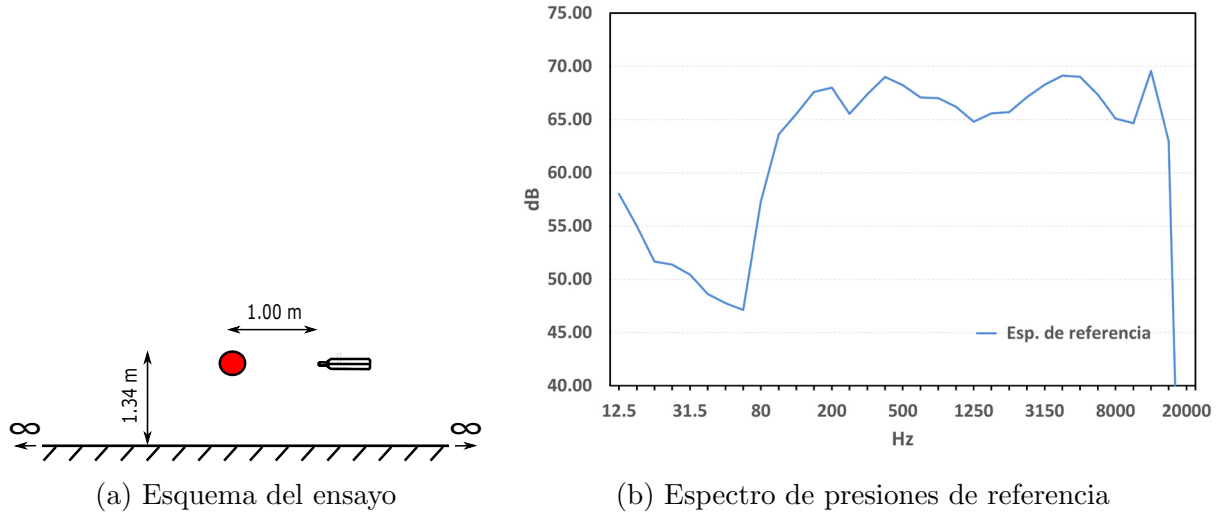


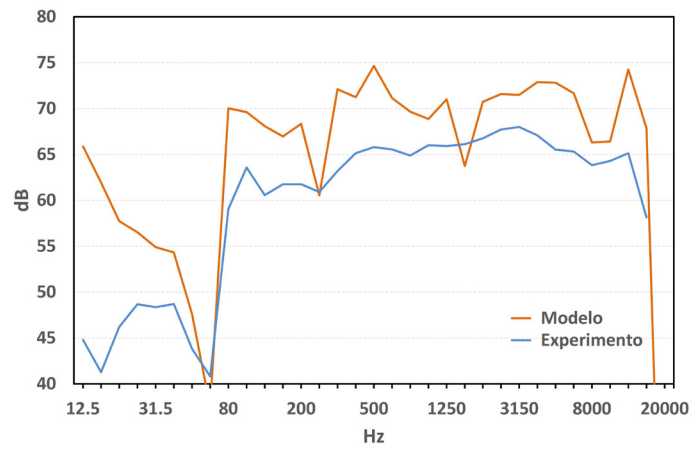
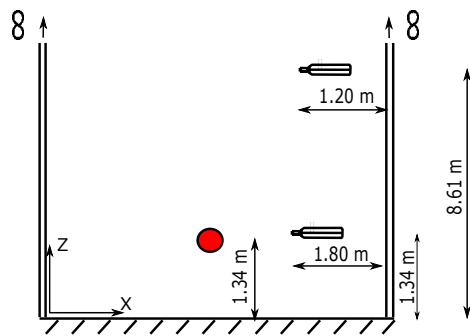
Figura 6: Ensayo de caracterización de las fuentes

R1 y R2. Los resultados muestran una tendencia general parecida entre experimento y modelo numérico, pero con diferencias que oscilan entre los 5 y 10 dB, tanto en R1 como en R2. Estas diferencias son importantes, pero tienen una explicación plausible que comentaremos más adelante.

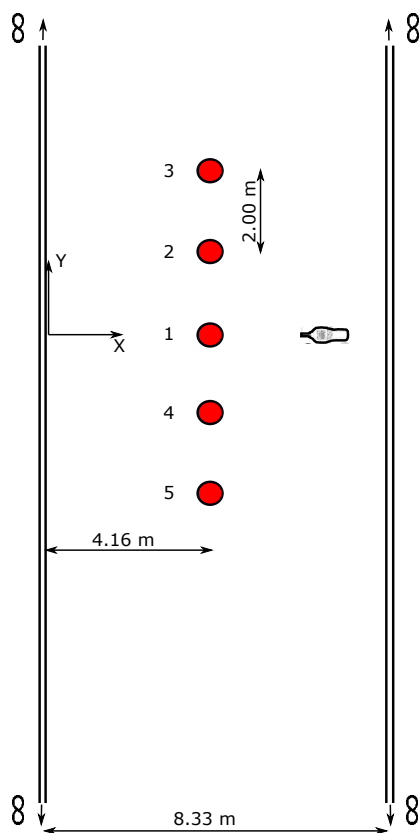
En las Figs. 8 a 10 se muestran las configuraciones y resultados para los ensayos 2, 3 y 4 respectivamente. En estos ensayos, en vez de estar activados todos los altavoces, están activos exclusivamente aquellos de cada una de las salidas de bluetooth. La comparación entre resultados experimentales y numéricos arrojan ahora un acuerdo mucho mayor, siendo las diferencias menores a 3 dB para las frecuencias de interés.

En la Fig. 11 se muestran nuevamente los resultados relativos al ensayo 1, pero también se añade la superposición de los resultados de los ensayos 2, 3 y 4. El acuerdo entre los resultados obtenidos mediante superposición y los resultados numéricos es ahora bueno, en la línea de lo obtenido para los ensayos 2, 3 y 4. Ello desvela que el origen de la discrepancia original en los resultados experimentales del ensayo 1 (Fig. 7) puede estar en el mal funcionamiento de la salida múltiple bluetooth. En los ensayos 2 y 4, a pesar de tener 2 altavoces activos en cada caso, éstos están emparejados mediante el sistema del fabricante, lo cual garantiza una salida simultánea y con similar intensidad en ambos.

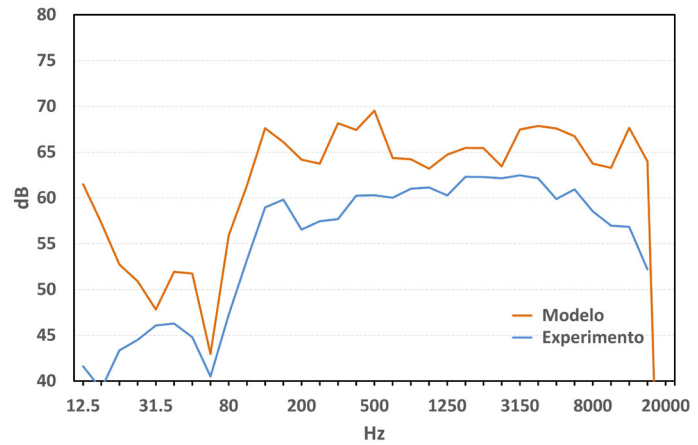
El uso de varias conexiones inalámbricas bluetooth simultáneas se realizó mediante instalación y configuración de varios adaptadores bluetooth, cuya salida de audio es controlada por software (en Ubuntu 20.04 la aplicación `bluetoothctl`). En ensayos posteriores utilizando micrófonos se ha confirmado que no sólo hay un retraso en la salida de audio (del orden de decenas de milisegundos), sino que el volumen en cada salida no era similar en todas las salidas. Además, se comprobó que dicha aplicación no permite un control adecuado de todos estos parámetros. Por tanto, en futuros ensayos debe desistirse de utilizar conexiones inalámbricas (excepto emparejamientos configurados por el fabricante).



(b) Niveles de presión en el R1

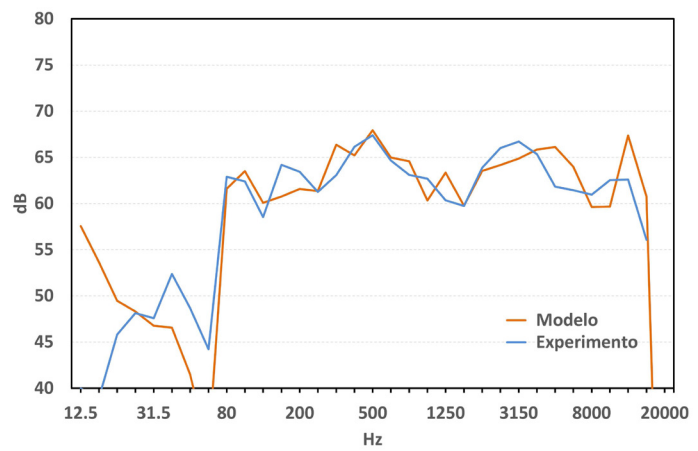
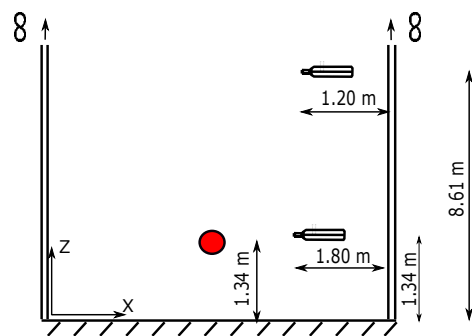


(a) Esquema del ensayo 1

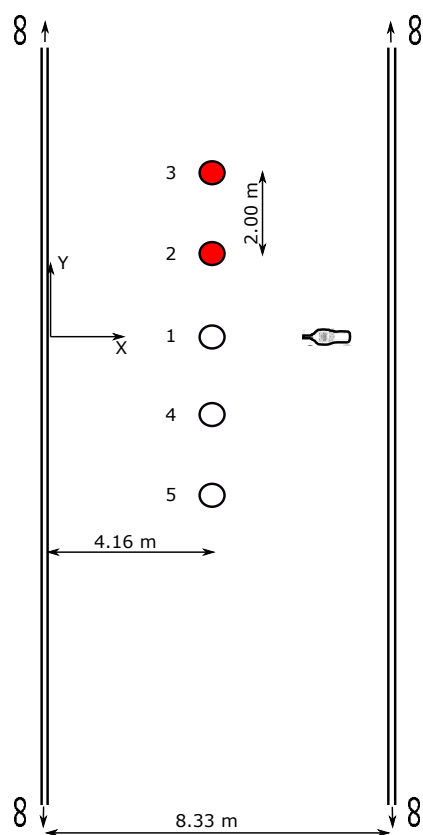


(c) Niveles de presión en el R2

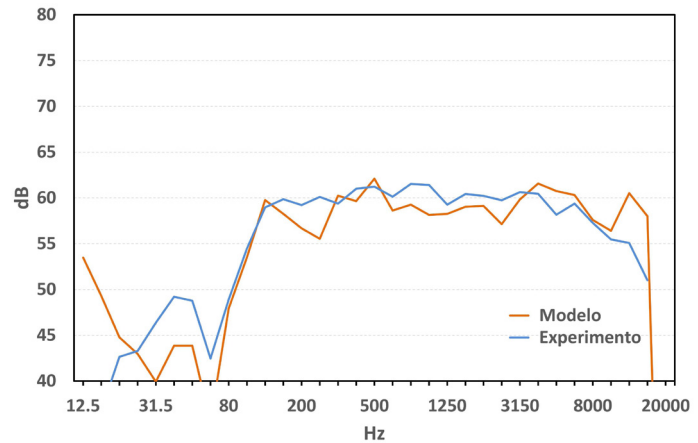
Figura 7: Ensayo 1



(b) Niveles de presión en el R1

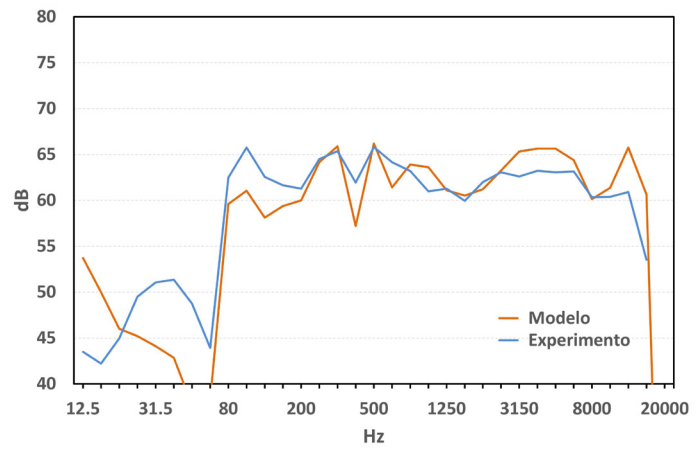
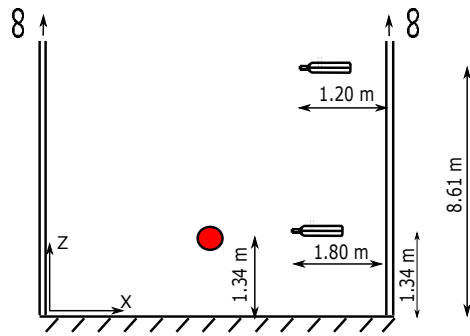


(a) Esquema del ensayo 2

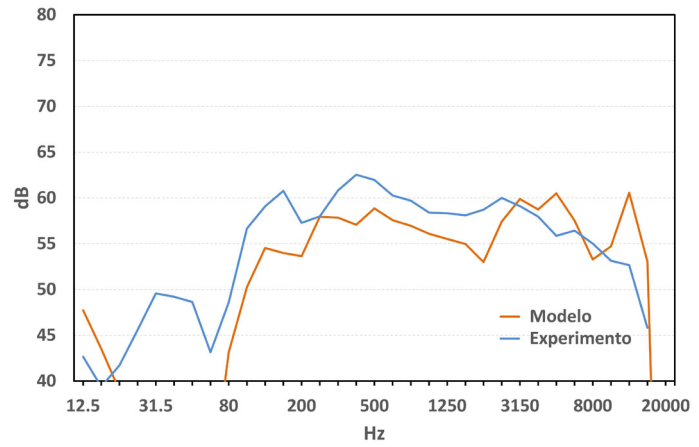
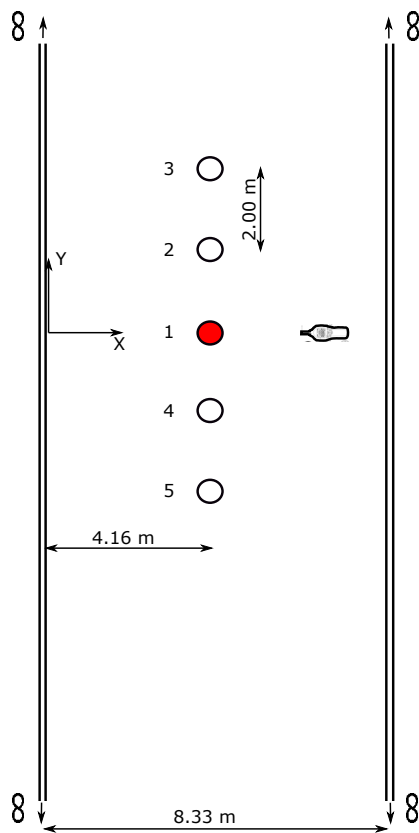


(c) Niveles de presión en el R2

Figura 8: Ensayo 2



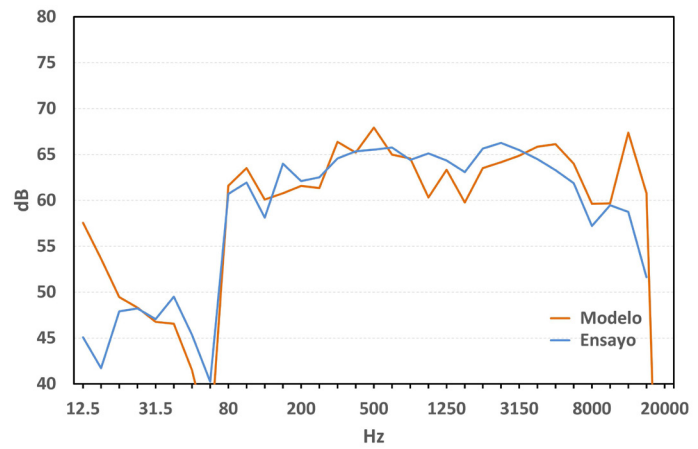
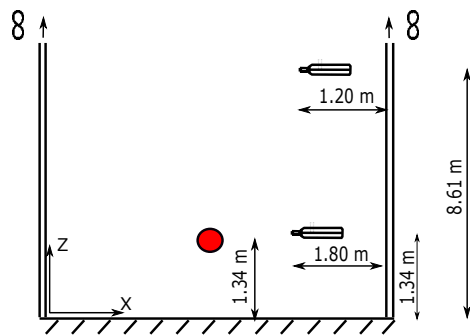
(b) Niveles de presión en el R1



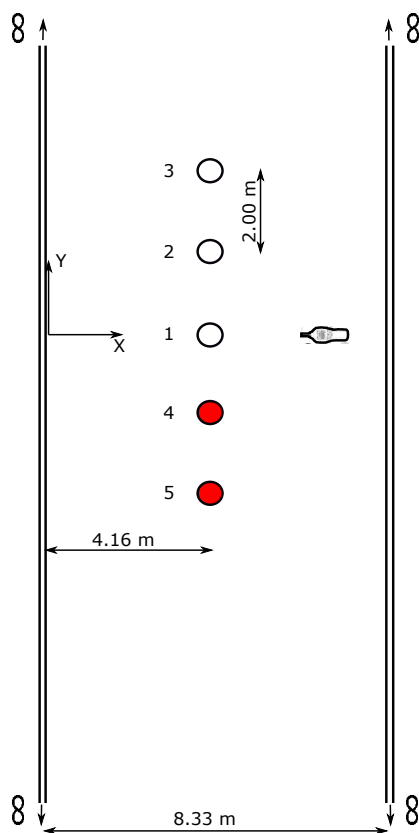
(c) Niveles de presión en el R2

(a) Esquema del ensayo 3

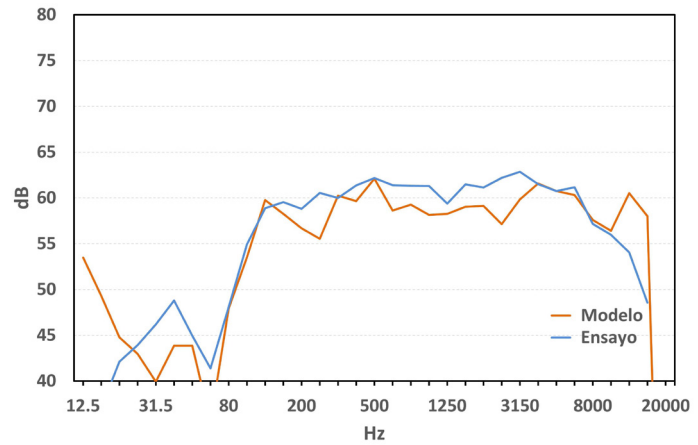
Figura 9: Ensayo 3



(b) Niveles de presión en el R1

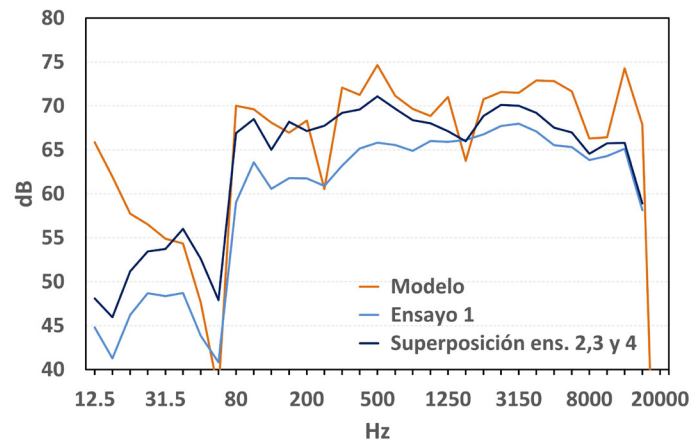


(a) Esquema del ensayo 4

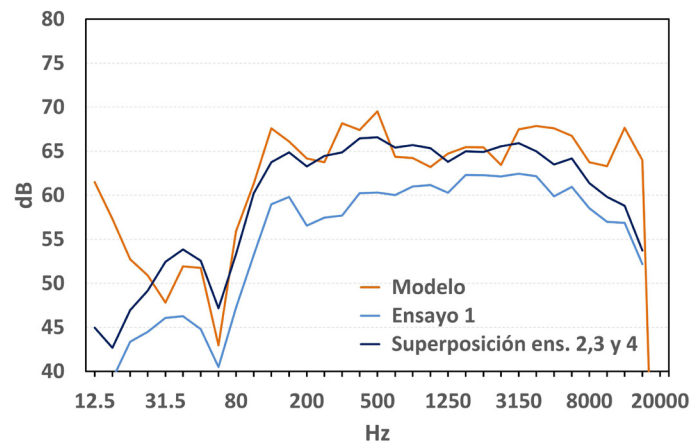


(c) Niveles de presión en el R2

Figura 10: Ensayo 4



(a) R1



(b) R2

Figura 11: Comparativa de niveles de presión obtenidos mediante el modelo del ensayo 1, mediante los resultados experimentales del ensayo 1, y mediante la superposición de los resultados experimentales de los ensayos 2, 3 y 4.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado y validado experimentalmente un modelo numérico para problemas acústicos tipo "street canyon", de bajo coste computacional y aptitud ahora demostrada. Las conclusiones pormenorizadas de este trabajo son:

- Los resultados del modelo numérico propuesto y los resultados experimentales en los experimentos bien controlados arrojan discrepancias aceptables inferiores a 3 dB dentro del espectro de frecuencias de interés.
- El análisis conjunto de todos los ensayos experimentales y los resultados del modelo numérico permitieron detectar deficiencias relativas al equipamiento para uno de los ensayos. Se detectó que el uso de salidas múltiples bluetooth mediante adaptadores carece de la controlabilidad adecuada para ensayos acústicos de este tipo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con equipamiento y materiales facilitados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Asimismo, la participación en este congreso está financiada por el Instituto Universitario SIANI. Los Autores desean agradecer expresamente su apoyo para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J. Kang, Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **107**, pp. 394–1404 (2000)
- [2] O. Maeso y J.J. Aznárez, *Estrategias para la reducción del impacto acústico en el entorno de carreteras. Una aplicación del Método de los Elementos de Contorno*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, (2005)
- [3] A. Aitken, On Bernoulli's numerical solution of algebraic equations. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, Vol. **46**, pp. 289–305 (1926)
- [4] D. Shanks, Non-linear transformation of divergent and slowly convergent sequences, *Journal of Mathematics and Physics*, Vol. **34**, pp. 1–42 (1955)
- [5] S.N.Chandler-Wilde y D.C. Hothersall, Sound propagation above an inhomogeneous impedance plane. *Journal Sound and Vibration*, Vol. **98(4)**, pp. 475–491 (1985)