

MODELIZACIÓN DE BADÉN COMO ELEMENTO DIRECTIVO DE ALERTA ACÚSTICA PARA PEATONES

Miguel Fabra Rodríguez¹, Ramón Peral Orts¹, Héctor Campello Vicente¹, Nuria Campillo Davó¹, Emilio Velasco Sánchez¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche. Avenida de la Universidad S/N, 03202, Elche, España
{e-mail:mfabra@umh.es}

Resumen

Para suplir la falta de alerta sonora de los vehículos silenciosos y el riesgo de atropello que ello conlleva se han desarrollado sistemas que emiten sonidos de alarma para advertir a los peatones de su presencia. En este documento, en cambio, se pretende iniciar el estudio de mejora de la detectabilidad de los vehículos modernos a través de la manipulación de su ruido de rodadura, ya que la emisión sonora proveniente de los diferentes sistemas de propulsión se ha visto reducida. Por tanto, se plantea emplear badenes que puedan ser situados en zonas de urbanas especialmente sensibles como aparcamientos o zonas peatonales. Para ello, se propone un primer modelo de análisis mediante el uso del método de elementos finitos que permite estudiar la reflexión y directividad de estos dispositivos. En el mismo, la fuente sonora es generada a través de un algoritmo empírico.

Palabras clave: ruido de rodadura, badén, sonido de alerta.

Abstract

Systems that emit alarm sounds to warn pedestrians of their presence have been developed to fill the lack of sound alerting of quiet vehicles and the risk of being run over. Instead, this document intends to start the study of improving the detectability of modern vehicles by manipulating their rolling noise, since the noise emission from the different propulsion systems has been reduced. Therefore, it is considered to use speed bumps that could be located in particularly sensitive urban areas such as parking lots or pedestrian areas. For this, a first analysis model is proposed employing the finite element method that allows studying the reflection and directivity of these devices. In it, the sound source is generated through an empirical algorithm.

Keywords: rolling noise, speed bump, warning sound.

PACS nº. 43.50.Lj

1 Introducción

Los vehículos modernos tratan de reducir de forma progresiva sus emisiones sonoras, a pesar de ello, el tráfico rodado es la fuente de ruido que a mayor cantidad de población afecta [1]. En el caso de los vehículos híbridos-eléctricos (VHEs) y eléctricos (VEs) las aportaciones sonoras de sus componentes mecánicas se ven reducidas prácticamente en su totalidad. Esta ausencia de sonido, deseada a priori, ha provocado un aumento en el número de atropellos cuando estos vehículos circulan en modo eléctrico

frente a los producidos por vehículos de combustión convencionales [2], llegando incluso a duplicar el número de casos [3].

Para solucionar esta falta de detectabilidad surgen los sistemas de alerta acústica de vehículos (Conocidos como AVAS por sus siglas en inglés). Estos sistemas están formados por diferentes distribuciones de altavoces montados sobre el vehículo, cuya función es emitir sonidos de advertencia que alerten a los peatones y usuarios de la vía su paso [4]. Pero este tipo de sonidos utilizados de forma indiscriminada pueden llegar a resultar excesivos y molestos [5], no constituyendo por tanto una solución óptima para el problema.

Por ello, es necesario estudiar a los vehículos silenciosos como una fuente generadora de ruido que puedan ser empleada para garantizar la detectabilidad ante los diferentes usuarios de la vía. Bajo estas premisas surge el proyecto de desarrollar y caracterizar acústicamente un dispositivo, con la tipología de un badén reductor de velocidad, capaz de mejorar la detectabilidad del paso de vehículos silenciosos a través de la rodadura que estos provocan.

Desde el punto de vista acústico, los badenes han sido estudiados tanto como para determinar el sonido de impacto producido al paso de un vehículo sobre ellos [6-7] como para estudiar el efecto que tienen en el interior del vehículo y el confort sus pasajeros [8-9]. Por otro lado, este documento se centra en desarrollar una metodología que permita determinar el efecto de un badén o banda reductora de velocidad sobre la propagación sonora del ruido de rodadura de un vehículo, obviando por el momento el ruido producido por la colisión de las ruedas sobre el badén.

Para ello se parte de un modelo existente de ruido de rodadura. La bibliografía [10] divide los modelos de ruido de rodadura en determinísticos, estadísticos e híbridos. Los modelos determinísticos son modelos analíticos o numéricos que estudian alguno de los aspectos físicos de la producción sonora, como puede ser el bombeo de aire [11] o vibraciones [12]. Los modelos estadísticos se nutren de medidas empíricas para desarrollar sus modelos de regresión. Los modelos híbridos por su parte utilizan características de los dos tipos de modelo anteriores, en primer lugar, emplean un submodelo determinístico que calcula ciertos parámetros que sirven de entrada para que un submodelo estadístico pueda predecir el sonido generado [10].

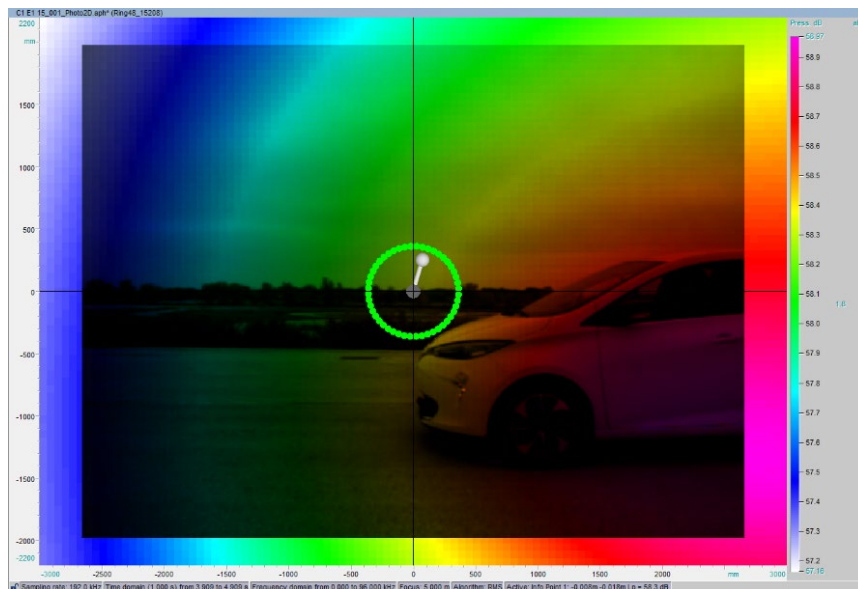


Figura 1 – Fotografía acústica realizada sobre un vehículo eléctrico en pista de ensayos.

La ventaja de utilizar un modelo estadístico de ruido de rodadura frente a uno determinístico o híbrido es que se contempla de forma global la producción sonora y no se limita a estudiar ciertos aspectos

concretos de la producción de ruido. De entre los modelos disponibles, para este estudio se ha seleccionado el modelo CNOSSOS [13] empleado en la actualidad para la elaboración de mapas de ruido. Este modelo permite estudiar un vehículo como foco sonoro al modelizarlo como una fuente puntual. Esta forma de generación resulta adecuada tras haber realizado ensayos Pass-By normalizados sobre un vehículo eléctrico. En estos ensayos se empleó un array de micrófonos circular que permite realizar fotografías acústicas como la mostrada en la Figura 1, donde con una escala de color superpuesta a la fotografía digital se puede determinar el nivel de presión sonora en un plano. Mediante esta herramienta se puede analizar de forma visual la propagación acústica: en la Figura 1 se puede apreciar que el foco de ruido se localiza en la parte central inferior del vehículo, ya que el color magenta indica el máximo valor de intensidad sonora en la escala proporcionada.

2 Metodología

El modelo desarrollado para estudiar el comportamiento acústico de un badeén en la propagación sonora del ruido de rodadura se compone de dos partes. La primera estudia la generación sonora del ruido de rodadura a partir de diferentes parámetros de entrada mientras que la segunda estudia la propagación empleando un modelo numérico.

2.1 Generación mediante modelo empírico

El Modelo europeo CNOSSOS de 2012 [13] calcula el ruido de tráfico rodado en una determinada vía a partir de la aportación sonora individual de cada vehículo. El modelo considera una fuente puntual localizada a la mitad de la longitud y anchura del vehículo y a una altura de 5 mm del pavimento, como se indica en la Figura 2. Esta fuente sonora puntual se compone tanto de las contribuciones sonoras debidas a la interacción entre el neumático y la calzada como del ruido del sistema de propulsión.

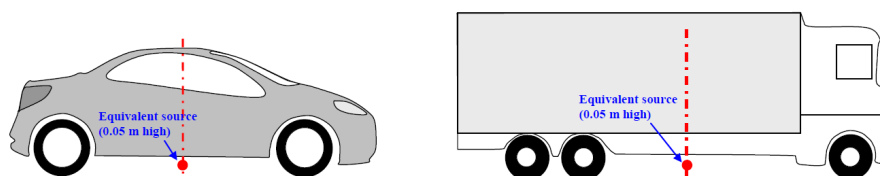


Figura 2 – Localización de la fuente sonora puntual equivalente de un vehículo [13].

Para considerar un vehículo silencioso, como un vehículo circulando en modo eléctrico, o para desestimar por completo el ruido del motor y sistema de transmisión se toma como aportación única a la potencia de la fuente el ruido de rodadura [14].

El nivel de potencia sonora $L_{WR\ i,m}$ para el ruido de rodadura se muestra en la Ec. 1 [13].

$$L_{WR\ i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right). \quad (1)$$

Donde $A_{R,i,m}$ y $B_{R,i,m}$ son constantes que dependen de la banda de octava con frecuencia central i y del tipo de vehículo m : 1 para vehículos de cuatro ruedas ligeros como los turismos, 2 para vehículos medios como furgones y 3 pesados como camiones. La tabla de valores para estos parámetros se puede encontrar actualizada en la tabla *F-1* de [15]. v es la velocidad de circulación del vehículo en km/h y v_{ref} es la velocidad de referencia fijada en $70\ km/h$.

Este nivel de potencia puede ser corregido con el término $\Delta L_{WR,i,m}$ dependiendo del tipo de calzada según la Ec. 2 [13].

$$\Delta L_{WR\,road,i,m} = \alpha_{road,i,m} + \beta_{road,m} \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right). \quad (2)$$

Donde $\alpha_{road,i,m}$ es una constante que depende del tipo de calzada *road*, de la banda de octava *i* y del tipo de vehículo *m*, mientras que $\beta_{road,i,m}$ depende únicamente del tipo de vehículo y de calzada. Los valores para estos parámetros pueden consultarse en la tabla F-4 de [15].

Otra corrección en la generación sonora $\Delta L_{WR\,temp}$ debida a la temperatura *temp* se muestra en la Ec. 3 [13]. Donde el coeficiente *K* se puede simplificar a 0.08 dB/°C para los vehículos ligeros y a 0.04 dB/°C para los medios y pesados.

$$\Delta L_{WR\,temp} = K \log_{10}(20 - temp). \quad (3)$$

El nivel de potencia final corregido se obtiene según la Ec. 4.

$$L_{WRC\,i} = L_{WR\,i,m} + \Delta L_{WR\,road,i,m} + \Delta L_{WR\,temp}. \quad (4)$$

2.2 Propagación mediante modelo numérico

Para estudiar la propagación sonora y las reflexiones sobre los badenes se emplea un software de cálculo de elementos de contorno BEM, mediante el cual se resuelve la ecuación de Helmholtz para hallar de forma estacionaria y a un determinado valor de frecuencia la presión acústica en cada uno de los puntos del espacio tridimensional.

La fuente sonora que emite el ruido de rodadura se introduce como una fuente puntual separada 5 mm del suelo cuyo valor para cada valor de frecuencia *i* se calcula según la Ec. 5.

$$L_{RS\,i} = L_{WRC\,i} - 3\,dB. \quad (5)$$

La reducción de 3 dB en el nivel de presión sonora de la fuente se debe a que el modelo CNOSSOS considera la suma de fuentes incoherentes al incluir la reflexión con el pavimento, mientras que el cálculo del software BEM realiza una suma coherente al duplicar la amplitud de la señal [16].

La calzada se representa como un plano reflectante ya que las diferencias tanto en la producción como en la propagación sonora de un tipo de calzada u otro ya se encuentran incluidas en la Ec. 2. Las diferentes geometrías de badén se introducen también como superficies rígidas al sonido.

Las simulaciones se realizan para cada una de las frecuencias centrales de las bandas de octava de 63 a 8000 Hz. Posteriormente se suman las contribuciones de cada banda y se pondera para obtener el nivel de presión sonora con ponderación A.

La Figura 3 muestra el resultado de una simulación a 1000 Hz sobre la que se plotea los resultados de nivel de presión sobre los planos cartesianos. La flecha, con dirección y sentido positivo del eje X, muestra el sentido de la marcha del vehículo modelizado. Considerando una longitud media de 4 m para un turismo, al situar la fuente puntual sobre el origen de coordenadas, el badén situado a 2 m del plano ZY del origen se situaría en el plano frontal del vehículo.

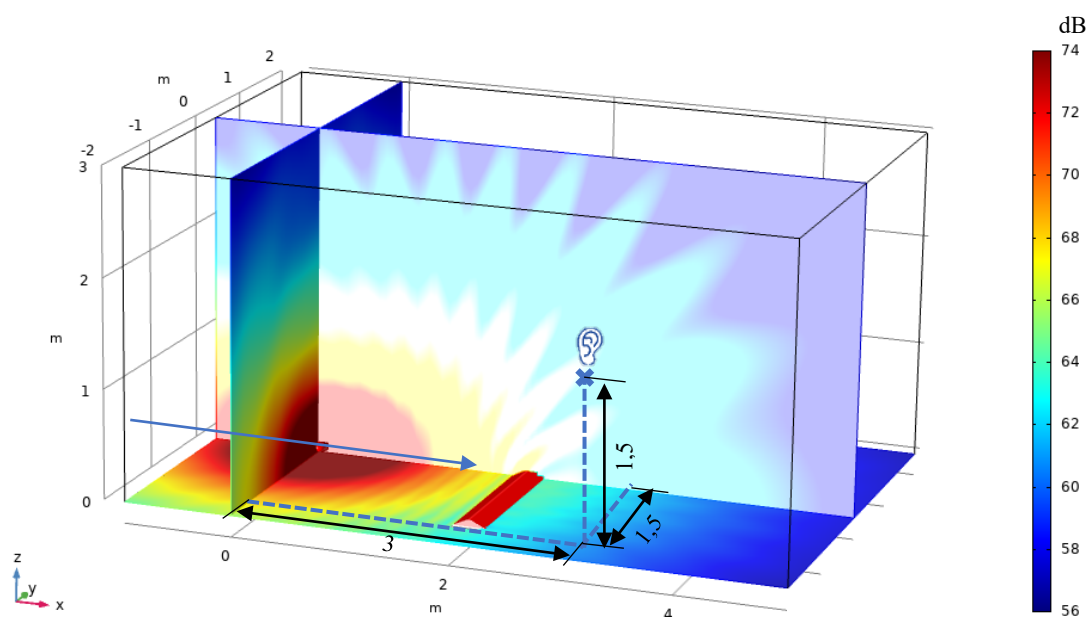


Figura 3 – Simulación del nivel de presión sonora a 1000 Hz y posición del receptor.

3 Resultados

Se realizan una serie de simulaciones que modelizan un ensayo de Pass-By al desplazar la fuente puntual sobre la dirección y sentido de la marcha a diferentes distancias del badén. El receptor (ver Figura 3) estudiado se sitúa a 3 m del origen de coordenadas en dirección de la marcha, a una altura de 1,5 m y a una separación del plano longitudinal XZ de 1,5 m. Los badenes modelados tienen una longitud de 3 m a lo largo del eje Y, con lo que el receptor se sitúa a orillas de este a una distancia sobre el eje X de 1 m, representando así a un peatón al borde de la vía antes de cruzarla.

3.1 Geometrías de badén

En primer el primer estudio realizado se comparan diferentes tipologías geométricas de badén. Todas las secciones de las geometrías empleadas tienen una base de 300 mm y una altura máxima de 65 mm. Las diferentes secciones se muestran en la Figura 4, se considera un sentido de la marcha de izquierda a derecha para diferenciar las geometrías 4 y 5.

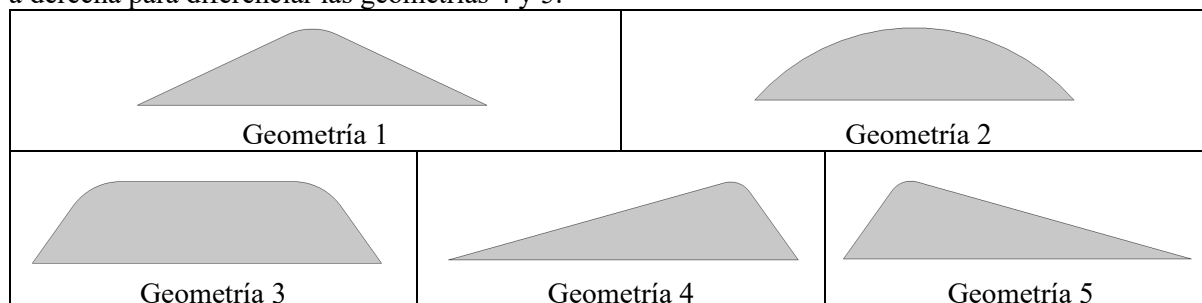


Figura 4 – Secciones de badén empleadas.

Los resultados del nivel de presión sonora medido en el receptor para cada geometría se muestran en la Figura 5. Como datos de entrada al modelo estadístico se emplea un vehículo ligero o turismo, una velocidad de 20 km/h , una temperatura de 20°C y el tipo de calzada de referencia estándar. Es a partir de los 3 m de separación entre el plano frontal del vehículo al badén cuando se obtiene un incremento en el nivel de presión al emplear estos dispositivos, incremento que llega a ser de 1 dB a un metro del badén (2 respecto del receptor) para las geometrías 2 y 3.

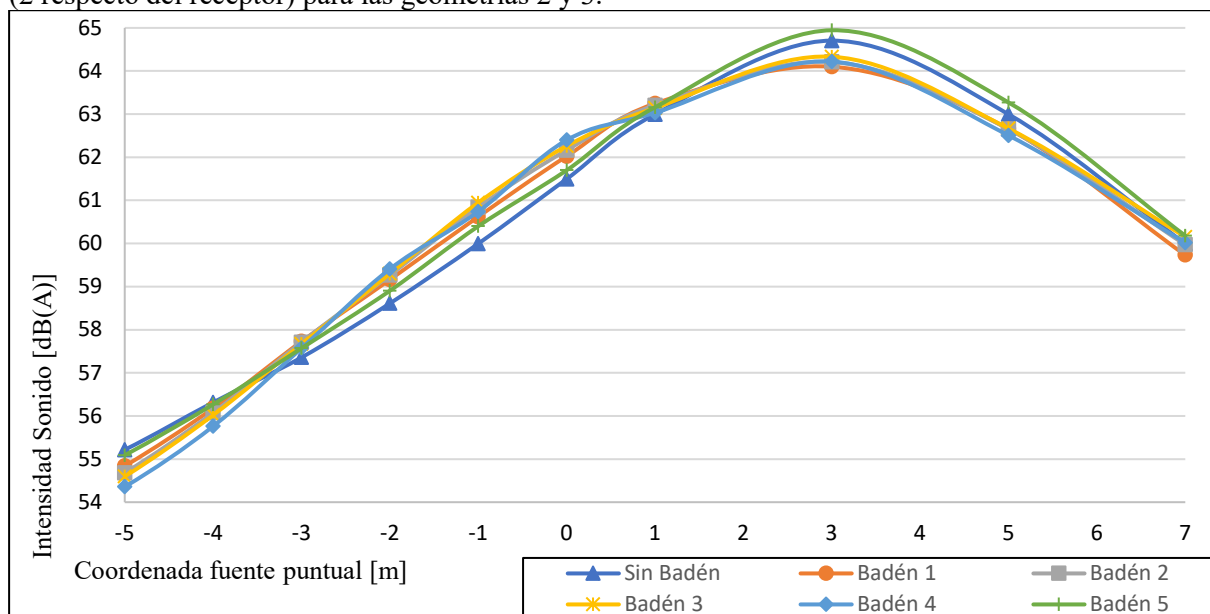


Figura 5 – Niveles de presión sonora con ponderación A obtenidos para las diferentes geometrías de badenes.

El efecto amplificador de estos badenes se acentúa hasta alcanzar 2 dB sobre la banda de 1000 Hz como se muestra en la Figura 6. Esta banda es la de mayor potencia sonora generada durante el proceso de rodadura [17].

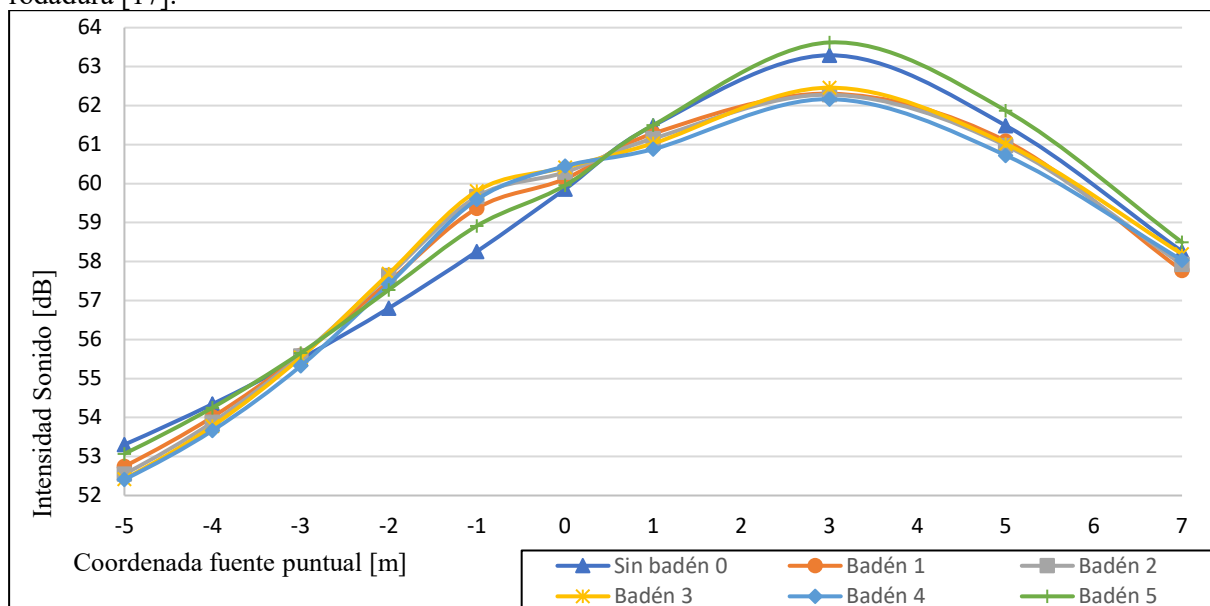


Figura 6 – Niveles de presión sonora a 1000 Hz obtenidos para las diferentes geometrías de badenes.

3.2 Múltiples badenes

Tras estudiar la propagación sobre las diferentes geometrías de sección se escoge el segundo tipo para comprobar el efecto que tendría incrementar el número de badenes sobre el receptor. La Figura 7 muestra el nivel de presión calculado en el caso de situar:

- 1 badén de geometría 2 a 2 m del origen de coordenadas como se ha realizado en el punto anterior.
- 3 badenes iguales añadiendo 2 al original con una separación entre ellos de 30 cm en el sentido de aproximación del vehículo.
- 5 badenes iguales añadiendo 2 a cada lado del original con una separación entre ellos de 30 cm.

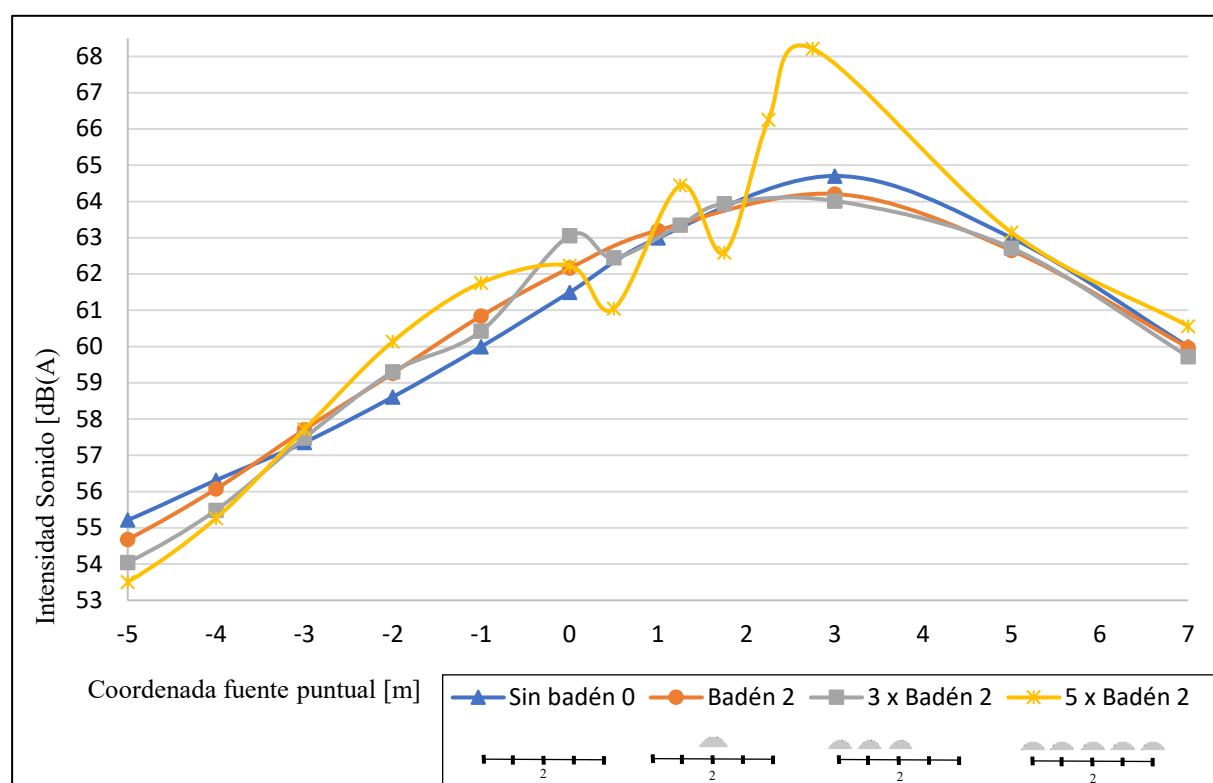


Figura 7 – Niveles de presión sonora con ponderación A obtenidos para las combinaciones de badenes de geometría 2 indicadas.

El mayor incremento en el nivel de presión sonora se obtiene para la combinación de 5 badenes, donde se produce una oscilación de amplitud creciente hasta llegar a la cota del receptor. La combinación de 3 badenes no proporciona un incremento reseñable frente a utilizar un único badén. Esta oscilación, producida al emplear 5 badenes, se debe a que al localizarlos a una cota más próxima del receptor, la señal generada se ve sucesivamente ocultada o focalizada sobre el punto de medida.

4 Conclusiones

Este documento inicia una línea de investigación que tiene como objetivo analizar la mejora en la detectabilidad de los vehículos silenciosos a través de la inclusión en la vía de elementos pasivos tipo

badén. Para ello se ha estudiado el ruido de rodadura como foco sonoro del vehículo cuya señal puede ser direccionada a través de estos dispositivos.

Los resultados obtenidos indican que, únicamente considerando el efecto reflectante producido por la inclusión de un badén de geometría adecuada, se puede incrementar el nivel de presión sonora percibido por un receptor cercano durante el proceso de aproximación de un vehículo, mientras que emplear múltiples badenes provoca oscilaciones en el nivel de presión sonora registrado.

Los próximos trabajos a desarrollar analizarán el efecto que supone sobre la detectabilidad el uso de estos badenes. Además, se pretende estudiar el ruido producido por el impacto de los neumáticos sobre estos dispositivo y las formas de incrementar y manipular esta señal a través de su diseño.

Referencias

- [1] European Environment Agency, *Road traffic remains biggest source of noise pollution in Europe*, 2017.
- [2] S. Brenda, M. Petria, Ph. Haasa, Ch. Kretteka and C. Haasper, “Hybrid and electric low-noise cars cause an increase in traffic accidents involving vulnerable road users in urban areas,” *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, vol. 20 (4), pp. 339-341, October 2012.
- [3] J. Wu, R. Austin and C.L. Chen, “Incidence Rates of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles: An Update,” *Ann. Emerg. Med.*, vol. 64 (2), pp. 195–196, August 2014.
- [4] M.U. Jen and M.H. Lu, “Warning sound of electric vehicle for pedestrian safety,” *INTER-NOISE 2011*, presented at 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2011.
- [5] I. Salleh, M.M. Zain and R.R. Hamzah, “Evaluation of annoyance and suitability of a back-up warning sound for electric vehicles,” *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 8, pp. 1267-1277, December 2013.
- [6] M. Behzad, M. Hodaei and I. Alimophammadi, “Experimental and numerical investigation of the effect of a speed bump on car noise emission level” *Applied Acoustics*, vol. 68, pp. 1346–1356, November 2017.
- [7] N. Distefano and S. Leonardi, “Experimental investigation of the effect of speed bumps in sequence on noise emission level from motor vehicles” *Noise Control Engineering Journal*, vol. 63, pp. 582–597, November 2015.
- [8] V. Barone, D. Walter-Mongelli and A. Tassitani, “Vibrational Comfort on Board the Vehicle: Influence of Speed Bumps and Comparison between Different Categories of Vehicle” *Advances in Acoustics and Vibration*, pp. 1–6, September 2016.
- [9] L. Liang, S. Chen and P. Li, “The evaluation of vehicle interior impact noise inducing by speed bumps based on multi-features combination and support vector machine” *Applied Acoustics*, vol. 163, June 2020.
- [10] T. Li, R. Burdisso and C. Sandu, “Literature review of models on tire-pavement interaction noise” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 420, pp. 357-445, April 2018.
- [11] M.B. Leba-Bassil, J. Cesbrond and P. Klein, “Tyre/road noise: A piston approach for CFD modeling of air volume variation in a cylindrical road cavity” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 469, March 2020.

- [12] Y. Wei, X. Feng, Z. Fuqiang and D. Xiang, “Simulation of rolling noise based on the mixed Lagrangian-Eulerian method” *Tire Sci. Technol*, vol. 44, pp. 36-50, January 2016.
- [13] S. Kephelopoulos, M. Paviotti and F. Anfosso-Ledee, *Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)*, European Commission Joint Research Centre, Luxembourg publications Office of the European Union, 2012.
- [14] H. Campello-Vicente, R. Peral-Orts, N. Campillo-Davo and E. Velasco-Sanchez, “The effect of electric vehicles on urban noise maps,” *Applied Acoustics*, vol. 116, pp. 59-64, January 2017.
- [15] A. Kik and A. Van-Beeck, *Amendments for CNOSSOS-EU: Description of issues and proposed solutions*, RIVM official reports, 2019.
- [16] B. Peeters and G. van-Blokland, “Correcting the CNOSSOS-EU road noise emission values”, in *Euronoise 2018*, Crete.
- [17] U. Sandberg and J.A. Ejsmont, *Tyre/road noise reference book*. Informex. Kisa, Sweden, 2002.