



## ESTUDIO DEL CAMPO SONORO INDUCIDO POR GEOMETRÍAS TRIDIMENSIONALES SOBRE UNA SUPERFICIE REFLECTANTE

*Sergio Núñez Andrés<sup>1</sup>*  
*Nuria Campillo Davó<sup>1\*</sup>*  
*Miguel Fabra Rodríguez<sup>1</sup>*  
*David Abellán López<sup>1</sup>*  
*Héctor Campello Vicente<sup>1</sup>*  
*Ramón Peral Orts<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universidad Miguel Hernández de Elche, Avda. de la Universidad, s/n.  
03202, Elche (Alicante), España

---

\* *Autor de contacto:* [ncampillo@umh.es](mailto:ncampillo@umh.es)

**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

## RESUMEN

En la actualidad los vehículos de combustión interna están siendo paulatinamente reemplazados por vehículos con propulsiones puramente eléctricas o híbridas. Esto afecta al ambiente sonoro de las ciudades convirtiendo a la rodadura en la fuente sonora predominante en estos vehículos alternativos. Sin embargo, la reducción sonora conseguida con la ausencia de los motores convencionales conlleva una mayor probabilidad de accidentes debido a la dificultad de ser escuchados en un ambiente urbano.

Con el propósito de poder actuar sobre la propagación sonora de la rodadura a través de nuevos pavimentos que incrementen la percepción acústica de los vehículos eléctricos, este trabajo presenta un estudio preliminar del campo sonoro inducido por geometrías tridimensionales sobre una superficie reflectante. Para ello, se han abordado dos enfoques diferentes de generación acústica, a través de una fuente sonora monopolar y de la vibración de una superficie. Este estudio se ha realizado a través de análisis numérico en condiciones estacionarias en entornos FEM y BEM.

## ABSTRACT

*Currently, internal combustion vehicles are gradually being replaced by vehicles with purely electric or hybrid drives. This affects the sound environment of the cities turning the road into the predominant sound source in these alternative vehicles. However, the sound reduction achieved with the absence of conventional engines leads to a greater probability of accidents due to the difficulty of being heard in an urban environment.*

*With the purpose of being able to act on the sound propagation of rolling through new pavements that increase the acoustic perception of electric vehicles, this work presents a preliminary study of the sound field induced by three-dimensional geometries on a reflective surface. To do this, two different approaches to acoustic generation have been addressed, through a monopolar sound source and the vibration of a surface. This study has been carried out through numerical analysis under stationary conditions in FEM and BEM environments.*

**Palabras Clave**— Metasuperficie, Elementos Finitos, Elementos de Contorno, Detectabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ruido de la interacción neumático/carretera es una de las principales fuentes de ruido en un flujo de tráfico. De hecho, el ruido de rodadura se convierte en la contribución más

importante a la emisión sonora total, superior al ruido del motor en un vehículo de combustión interna, cuando circula a alta velocidad.

La creciente presencia de vehículos eléctricos en las ciudades ha tenido diversos efectos, el más notable es la mejora de la contaminación acústica en estas, aunque como efecto negativo es indispensable hablar del mayor riesgo de atropello [1] que a su vez puede conllevar además de peligro para el resto de tráfico, altos precios de las pólizas de seguros de vehículos eléctricos. Estos hechos son en mayor parte debido al bajo nivel sonoro que emiten al circular.

El propósito del estudio que aquí se desarrolla es realizar un estudio preliminar del campo sonoro inducido por una serie de geometrías tridimensionales sobre una superficie reflectante.

## 2. OBJETIVOS DE ESTUDIO

El objetivo principal de este estudio es actuar sobre la propagación sonora de la rodadura a través de nuevos pavimentos con el fin de incrementar la percepción acústica de los vehículos eléctricos y evitar la creciente problemática de accidentes en estos vehículos [1], pero para poder llegar a este objetivo se deben perseguir una serie de objetivos parciales:

- 1) Estudio de la acústica en la rodadura.
- 2) Establecimiento de los valores fijos de cálculo.
- 3) Diseño de diferentes modelos, partiendo de los más básicos (referencia).
- 4) Análisis de los modelos empleando el cálculo por FEM (elementos finitos) y BEM (elementos de contorno).
- 5) Análisis y comparación de los diferentes resultados

## 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En este estudio se han empleado diferentes herramientas que han ayudado a la consecución del mismo, estas son:

- 1) Comsol Multiphysics.
- 2) Autodesk Inventor.
- 3) Sonómetro y equipo de medición.

El trabajo se ha realizado utilizando principalmente el software COMSOL para diseñar y estudiar las diversas metasuperficies.

Se emplearon dos tipos de herramientas de generación de presión acústica:

- 1) **Fuente de Potencia Monopolar:**

En esta tipología se empleó una fuente de potencia monopolar en forma de esfera y colocada a 5 centímetros de altura del pavimento, que asimila a la fuente sonora puntual equivalente que se recoge en el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-EU [2].

Para poder llevar a cabo su cálculo se requirió establecer ciertos valores fijos, por un lado, se limitó la velocidad de estudio a 20 km/h y se calculó la potencia sonora utilizando una fórmula específica.

En un estudio previamente realizado [3] en donde se calculan los decibelios emitidos por un vehículo a diferentes velocidades, se puede ver que la velocidad buscada no aparece, pero el mismo artículo ofrece una fórmula que permite realizar ese cálculo:

$$Lw\_A\text{-CPX-II @315 - 4000 Hz} = 21,0 + 39,9 * \log(v) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Aplicando esta formulación se puede llegar a la conclusión de que un vehículo circulando a 20 km/h emitiría 73 dB, convirtiendo este resultado a unidades de potencia o vatios a través de la siguiente expresión donde  $W_0$  es la referencia de la potencia igual a  $10^{-12}$ :

$$Lw = 10 * \log(W/W_0) \text{ [dB]} \quad (2)$$

El resultado obtenido por esta ecuación nos proporciona una potencia sonora de 0,00002 Vatios, esta cifra será la que se usará como potencia de la fuente sonora en los diferentes modelos.

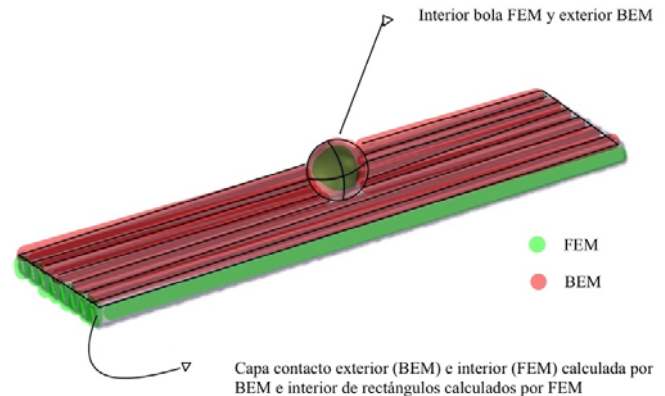
La frecuencia de estudio elegida fue de 1000 Hz, para la cual la rodadura de vehículos presenta una elevada emisión sonora.

## 2) Tapa vibratoria:

Como segundo método de generación de presión sonora se hizo uso de una base dotada de una aceleración normal de  $10 \text{ m/s}^2$  [4] que es la aceleración normal media de un neumático al pasar por un pavimento irregular.

Esta aceleración normal fue la que se empleó para hacer vibrar la tapa y excitar el aire que la rodea.

A la hora de realizar el cálculo ha sido imprescindible diferenciar entre qué elementos se iban a calcular por medio de Elementos Finitos (FEM) y cuales por Elementos de Contorno (BEM). En este estudio se ha empleado el cálculo de elementos finitos para el aire encerrado en las geometrías menores como el interior de las ranuras y de la esfera, mientras que el cálculo por elementos de contorno se ha utilizado para las geometrías mayores y el espacio exterior.



**Figura 1.** Ejemplo de modelización FEM y BEM.

## 3. MODELOS ESTUDIADOS

En el presente trabajo se han diseñado, analizado y estudiado diversas geometrías, estas se han dividido en dos tipologías:

- 1) Con Fuente de Potencia Monopolar:
  - a- Modelo de Referencia
  - b- Modelo Conductos Verticales
  - c- Modelo Conductos Horizontales
- 2) Con Tapa Vibratoria:
  - a- Modelo Referencia Tapa
  - b- Modelo Ranura Corta
  - c- Modelo Ranura Larga

A continuación, se va a explicar los diferentes modelos estudiados:

### 1.a Modelo de Referencia:

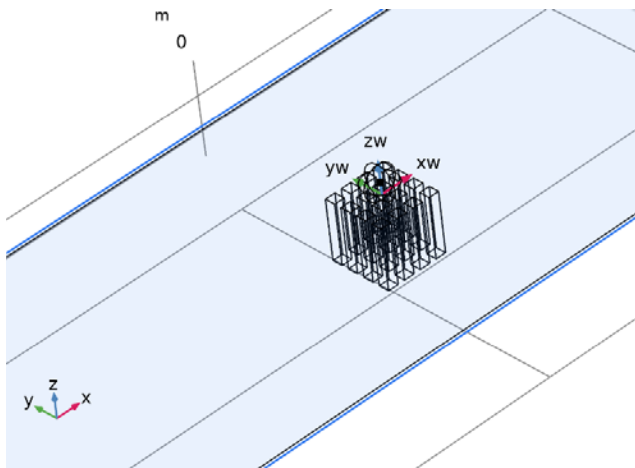
El primer modelo, y el más básico de ellos fue analizar el comportamiento de una superficie lisa totalmente reflectante de 4 metros de largo y 1 metro de ancho al someterla a una potencia sonora ubicada en el punto central de una esfera de 5 centímetros de radio y a 5 centímetros de altura con respecto del suelo tal y como indica el modelo de predicción de ruido de tráfico CNOSSOS-EU.

Este modelo inicial va a servir como referencia de partida para evaluar los posteriores modelos y comparar el posible efecto de incremento o no de los niveles de presión sonora.

La idea principal de este diseño es simular una carretera lisa sin ningún tipo de meta superficie en ella, esto hace posible el estudio y análisis del modelo más básico.

### 1.b Modelo Conductos Verticales:

En este segundo modelo se ha partido del modelo de referencia, en él se han labrado varias aberturas de forma cuadrada en el pavimento, estas geometrías se han parametrizado para facilitar su modificación tanto en el número de su distribución en columnas y filas, como en las medidas de cada lado de la abertura y profundidad de la abertura en el pavimento, esto permite obtener y valorar diferentes resultados de funcionamiento.



**Figura 2.** Modelo de Conductos Verticales.

Para un diseño eficiente y seguro para el tráfico se ha tenido muy en cuenta las dimensiones de los cuadrados a fin de evitar que las ruedas de los coches puedan sufrir cualquier tipo de daños al entrar en contacto con ellas. Con el fin de evitar un afecto bache al conducir sobre esta meta superficie se ha escogido un tamaño de sus laterales de 3 centímetros.

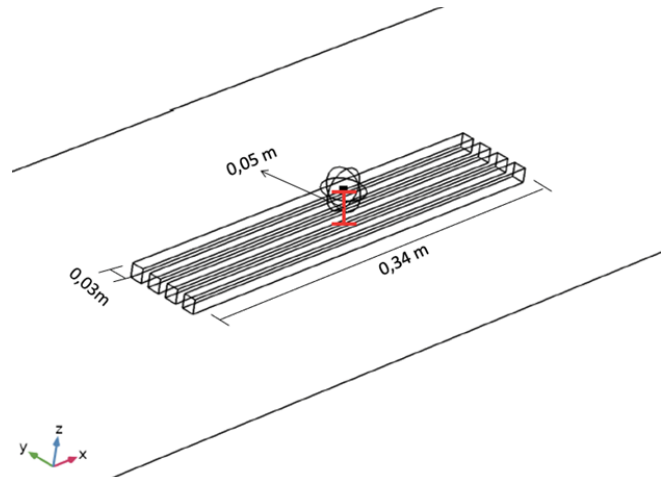
Para definir la profundidad de los orificios se ha escogido una frecuencia de 1000 Hz, que teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es de 343 m/s, dará como resultado una longitud de onda de 34,3 cm o 0,343 metros, medida que se empleará para la profundidad vertical de cada orificio.

### 1.c Modelo Conductos Horizontales:

En este modelo se ha pasado de geometrías cuadradas a geometrías rectangulares. Como en la configuración anterior se ha tenido en cuenta la anchura de los neumáticos para que no se dañen al pasar por estos huecos.

En este caso, se le ha dado la longitud de onda al largo del rectángulo en lugar de la profundidad. La configuración general del modelo es básicamente la misma que la del

anterior, pero ha permitido apreciar las variaciones que existen al emplear diferentes formas geométricas.

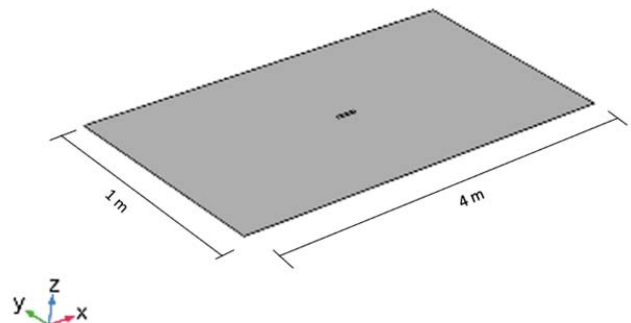


**Figura 3.** Modelo de Conductos Horizontales.

En la Figura 3 se puede visualizar la forma de la geometría en una representación tridimensional, las dimensiones de las aberturas son de 0,03 metros de profundidad, 0,34 m de largo y 0,03 metros de ancho. Como se ha mencionado con anterioridad la longitud de las aberturas se corresponde con la longitud de onda a 1000 Hz.

### 2.a Modelo Referencia Tapa:

Este diseño consiste en modelar únicamente la tapa en el pavimento liso de 1 metro de ancho y 4 metros de largo sin ningún tipo de abertura ni extrusión. Gracias a este modelo simple se podrá obtener una especie de guía sobre cómo se propaga la presión sonora y la magnitud en lo que lo hace teniendo únicamente la tapa sin ninguna geometría más, esto permitirá poder analizar los resultados del modelo de Ranura Larga y Ranura Corta.

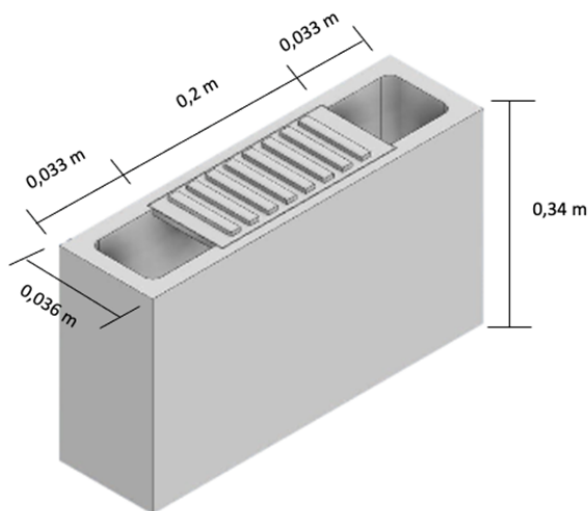


**Figura 4.** Modelo de Referencia Tapa.

## 2.b Modelo de Ranura Corta:

En este modelo se ha combinado la geometría del Modelo de Conductos Verticales con el de Conductos Horizontales, es decir la última geometría se basa en un hueco en el pavimento de forma rectangular, cubierto por una tapa con resaltes, esta tapa actúa como objeto BEM, es decir elemento de contorno y al igual que el pavimento que lo rodea es totalmente reflectante. También cuenta con dos aberturas de forma cuadrada colocadas una en cada extremo de la tapa, estas miden 3 centímetros de lado. La función de estas ranuras es actuar como frontera entre el entorno FEM o de elementos finitos que se tiene en el interior de la geometría y el entorno BEM que tenemos en el aire exterior que rodea al modelo.

Los resaltes de la tapa sirven para forzar una frecuencia de 1000 Hz en el interior del modelo, lo que permite que el aire que se encuentra contenido en su interior y el aire próximo a la tapa resaltada se excite y genere una presión sonora que se propagará por la abertura final del modelo.



**Figura 5.** Modelo Ranura Corta.

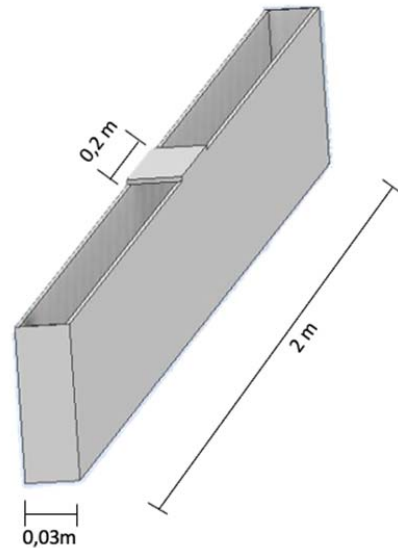
Al tener un modelo complejo, ya que combina tanto los efectos acústicos como los vibracionales se ha hecho una esquematización o simplificación de los cálculos, es decir, como primera fase se ha diseñado el pavimento como en los primeros modelos y se le ha labrado la geometría deseada.

## 2.c Modelo de Ranura Larga:

Para este modelo se ha empleado un diseño similar a una metasuperficie real, las dimensiones escogidas han sido 0,03 metros de ancho, 2 metros de longitud total, una tapa central de 0,2 metros de largo y 0,03 metros de ancho, la tapa

mencionada se ubica en el centro de la geometría, dejando una abertura a cada extremo de 0,9 metros.

El funcionamiento del modelo descrito consiste en emplear la tapa de 0,2 metros de largo e inducirle una aceleración normal semejante a la que provocaría un vehículo al rodar sobre la superficie. La longitud de 0,2 metros viene dada por la longitud que apoya del neumático en el pavimento.



**Figura 6.** Modelo Ranura Larga.

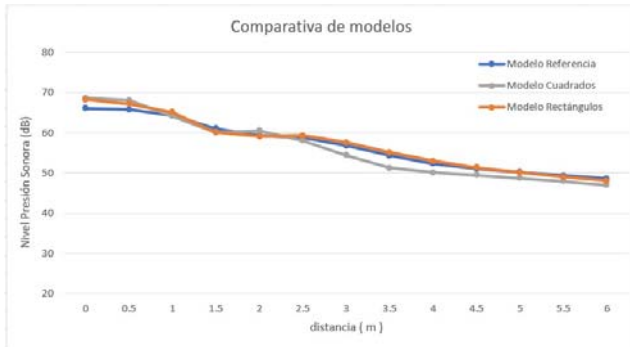
## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Con el propósito de poder analizar y comparar los diferentes modelos en las mismas condiciones, se empleó una opción de COMSOL que permite definir uno o varios puntos de recepción en el sistema.

En el presente trabajo se ha optado por tomar varios puntos situados cada uno a medio metro del anterior, llegando hasta una distancia total de 6 metros, lo que permitirá evaluar de forma numérica el efecto de cada uno de los diseños, compararlos entre ellos y analizar tanto la progresión conforme se aleja de la fuente como la mejora o empeoramiento de la amplificación del sonido con respecto al diseño de referencia, es decir, el diseño ideal en el que todo el pavimento refleja.

Para poder realizar una comparativa óptima, se ha establecido un rango de valores definido e igual para todos los modelos a la hora de realizar sus respectivas representaciones en color de los diferentes datos que ofrece el programa. Este rango ha sido de 45 a 95 decibelios para los resultados de presión sonora expresados en decibelios, y

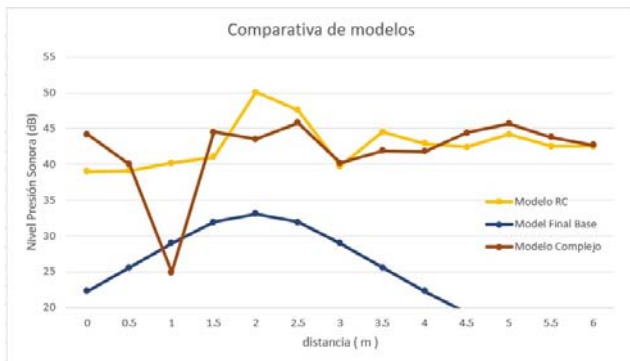
de -1,5 a 1,5 pascales para la presión sonora expresada en pascales.  
Los resultados gráficos de la primera tipología han sido los siguientes:



**Figura 7.** Gráfico comparativo modelos con fuente de potencia monopolar.

En la Figura 7 es muy sencillo ver cómo la progresión de estos modelos ha sido muy similar e incluso en el Modelo de Conductos Verticales se ha producido una disminución de la presión sonora respecto al de referencia.

En la figura 8 se muestra la gráfica comparativa de los modelos de segunda tipología, los cuales han empleado como fuente de excitación una tapa vibratoria.



**Figura 8.** Gráfico comparativo modelos con tapa vibratoria.

En esta tipología se puede ver como respecto a la línea azul la cual hace referencia al Modelo Referencia Tapa sí que hay un aumento muy notable de la presión sonora en los dos modelos restantes, además se puede destacar que el Modelo de Ranura Larga tiene un pico decreciente en el primer metro de avance, pero sin embargo ofrece un mejor rendimiento en los últimos metros de avance.

En la siguiente tabla se muestra numéricamente la progresión de presión sonora obtenida en la segunda tipología de modelos.

**Tabla 1.** Progresión nivel de presión sonora segunda tipología.

Modelos/Distancia[m]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Modelo Ref Tapa [dB]	25,6	29,0	31,9	33,1	31,9	29,0	25,6	22,3	19,3	16,6	14,2	12,1
Modelo R. Larga [dB]	44,2	40,0	24,9	44,5	43,5	45,8	40,2	41,9	41,8	44,4	45,7	43,8
Modelo R. Corta [dB]	39,1	39,9	40,2	41,0	50,1	47,6	39,7	44,5	42,9	42,4	44,2	42,5

## 6. CONCLUSIÓN

Este estudio hace referencia a la interacción entre neumáticos de vehículos y metasuperficies de carretera con el objetivo de comprender y aumentar la presión sonora en la dirección longitudinal sin afectar la propagación en direcciones transversales y verticales. El estudio propone el uso de metasuperficies para mejorar la emisión de sonido alrededor de diferentes geometrías de carretera y actuar como resonadores.

Se destacan dos grupos de resultados: uno utilizando una fuente de potencia monopolar en las tres primeras geometrías, donde el modelo de Conductos Horizontales es el más eficiente, y otro utilizando una tapa vibratoria en los modelos restantes, con un mayor rendimiento en el modelo de Ranura Larga, que muestra un pico grande de presión sonora en el primer metro de avance. Ambos grupos logran amplificar el efecto de emisión de sonido en comparación con el modelo Referencia Tapa.

Sería muy interesante abarcar tres áreas de mejora para futuras investigaciones en el estudio de generación de ruido por superficies de carretera y neumáticos: desarrollar modelos de generación de ruido más realistas y eficientes, investigar y diseñar geometrías más complejas para analizar su efecto en la presión sonora, y realizar ensayos prácticos con vehículos reales en geometrías prefabricadas para medir la presión sonora en condiciones reales.

## 7. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo ha sido financiado dentro de la Convocatoria de “Subvenciones a grupos de investigación emergentes - Convocatoria GE 2023” (referencia expediente: CIGE/2022/1), de la convocatoria de subvenciones del “Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana”, de la Conselleria





de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, de la Generalitat Valenciana.

Así mismo, los autores agradecen el apoyo recibido por el “Programa para la realización de prácticas en actividades de fomento de la investigación en los departamentos e institutos universitarios de la Universidad Miguel Hernández de Elche para el curso 2022/2023” (RR 3236/2022 y RR 00090/2023).

## 8. REFERENCIAS

[1] Motor, E. (2022, 9 septiembre). Los coches eléctricos provocan accidentes más caros y con más daños. El Motor. <https://motor.elpais.com/coches-electricos/los-coches-electricos-provocan-accidentes-mas-caros-y-con-mas-danos/>.

[2] Stylianos, K., Marco, P., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). En Publications Office of the European Union eBooks. <https://doi.org/10.2788/32029>

[3] Campillo-Davo, N., Peral-Orts, R., Campello-Vicente, H., & Velasco-Sanchez, E. (2019b). An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a Rolling tyre. *Applied Acoustics*, 143, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.017>.

[4] Gunawan, F. E., Yanfi, Y., & Soewito, B. (2015). A vibratory-based method for road damage classification. <https://doi.org/10.1109/isitia.2015.7219943>