

# Métodos numéricos para el estudio NVH de vehículos eléctricos e híbridos



J. Carbajo<sup>1</sup>; L. Godinho<sup>2</sup>; P. Amado-Mendes<sup>2</sup>; P. Borza<sup>3</sup>; M. Sánchez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Alicante, España.

<sup>2</sup> University of Coimbra, Portugal.

<sup>3</sup> University of Brasov, Romania.

<sup>4</sup> Universidad Miguel Hernández de Elche, España

jesus.carbajo@ua.es

PACS: 43.28.Js; 43.50.Lj

## Resumen

Este trabajo recoge algunas de las contribuciones numéricas de análisis NVH (*Noise, Vibration and Harshness*) para el diseño de vehículos híbridos y eléctricos, llevadas a cabo en el marco de la Acción COST TU1105. Dado el auge que está teniendo la fabricación de este tipo de vehículos en los últimos años, resulta de gran interés el desarrollo de nuevas herramientas de análisis y predicción para una mejor comprensión de los mismos. Es por ello que se han estudiado diferentes problemas vibroacústicos del interior y exterior del vehículo. Además, se han propuesto nuevas soluciones de materiales y modelos que pueden servir como guía para el diseño de sus dispositivos específicos. En general, los resultados de este trabajo han demostrado ser de gran utilidad para su uso en la industria del transporte y motivan seguir investigando en esta dirección.

## Abstract

This paper reviews some relevant contributions related to Noise, Vibration and Harshness (NVH) analysis numerical techniques for design of hybrid and electric vehicles, worked out in the framework of the COST Action TU1105. It is well known that the manufacturing of these types of vehicles is increasing over the years, so the development of new analysis and prediction tools for better understanding thereof is of great interest. In doing so, different vibroacoustic problems of interior and exterior of the vehicle have been studied. Additionally, some novel material solutions and models that can serve as a guide for their specific device design have been proposed. In general, the results from this work are proven to be useful for their use in the transport industry and encourage further research on this direction.

## 1. Introducción

El estudio NVH de vehículos constituye uno de los principales ejes de trabajo en el sector de la automoción, no solo por el evidente interés de la industria del transporte, sino por sus implicaciones socioeconómicas. En este contexto, la creciente demanda de EVs (*Electric Vehicles*) y HEVs (*Hybrid EVs*) ha motivado el desarrollo de herramientas que permitan analizar las características vibroacústicas de este nuevo tipo de vehículos. Por otra parte, si bien los EVs presentan un impacto positivo en el medio ambiente al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [1-4], su comportamiento «silencioso» plantea a su vez una serie de retos en cuanto a la seguridad vial que también deben de ser abordados [5, 6]. A este respecto, el uso de AVAS (*Acoustic Vehicle Alerting Systems*) representa una de las principales novedades [7].

Dada la complejidad asociada al estudio NVH de vehículos, es común el empleo de métodos numéricos por

parte de ingenieros y profesionales del sector durante las fases de diseño. Algunos de los métodos más empleados para el análisis estructural y acústico son el FEM (*Finite Element Method*) y el BEM (*Boundary Element Method*), respectivamente. Así, mientras que el primero se emplea típicamente para estudiar el comportamiento vibroacústico en el interior del vehículo, el segundo suele utilizarse para evaluar el ruido radiado al exterior. Una de las principales limitaciones de estos métodos es su elevado coste computacional para el análisis en altas frecuencias, siendo en este caso habitual recurrir a otras metodologías como SEA (*Statistical Energy Analysis*) o simplificaciones teóricas en base a modelos analíticos. En su conjunto, estos métodos sirven de banco de trabajo para el desarrollo de nuevos sistemas que se adapten a las nuevas necesidades de un sector que afrontará importantes cambios en los próximos años.

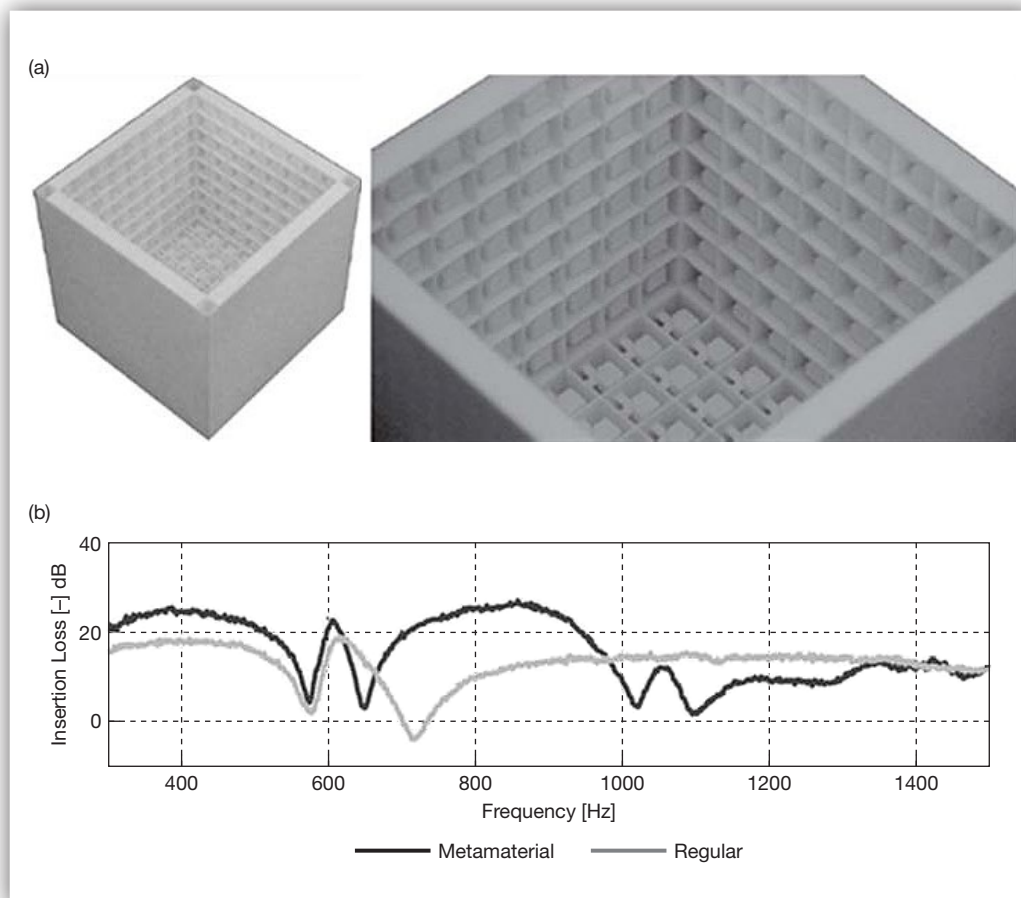
En este trabajo se recogen algunos resultados correspondientes a las actividades llevadas a cabo en el marco de la Acción COST TU1105 «*NVH analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles*» por el «*Workgroup 3: Numerical NVH analysis techniques applied to EVs*». Si bien los objetivos de la Acción cubren un amplio rango de técnicas de análisis de diseño NVH, dicho grupo centró sus esfuerzos en implementar metodologías y realizar contribuciones numéricas para el estudio de EVs.

Este documento está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se describen brevemente las contribuciones numéricas asociadas al análisis estructural de los EVs, tales como el desarrollo de nuevos materiales apropiados para este tipo de vehículos o el estudio dinámico de sus elementos estructurales. En la Sección 3, se presentan las técnicas de simulación para la predicción del campo acústico radiado por los EVs, centrándose específicamente en el diseño y optimización de los AVAS. Finalmente, la Sección 4 resume las principales conclusiones de estas actividades y expone algunas de las líneas futuras de trabajo.

## 2. Metodologías numéricas para el análisis estructural de EVs

Dentro de las metodologías numéricas asociadas al análisis estructural de EVs, resultan de especial interés aquellas destinadas al desarrollo de nuevos materiales o al modelado de sus elementos característicos. De hecho, dado que el confort acústico en el interior del vehículo está estrechamente ligado a su comportamiento vibroacústico, ésta es en sí una labor esencial. A continuación se enumeran y describen brevemente algunas de las contribuciones realizadas al respecto.

En la búsqueda generalizada de nuevos materiales y estructuras ligeras para su uso en EVs, pretendiendo que éstas a su vez sean robustas y mejoren el rendimiento de las soluciones existentes, Claeys et al. [8] han desarrollado un concepto de metamaterial basado en estructuras tipo sandwich que exhibe un excelente aislamiento acústico (ver Figura 1). Este metamaterial aprovecha las propiedades dinámicas de los elementos resonantes que lo integran para conseguir una solución con un buen comportamiento acústico, que además es ligera y ofrece amplias posibilidades de diseño.



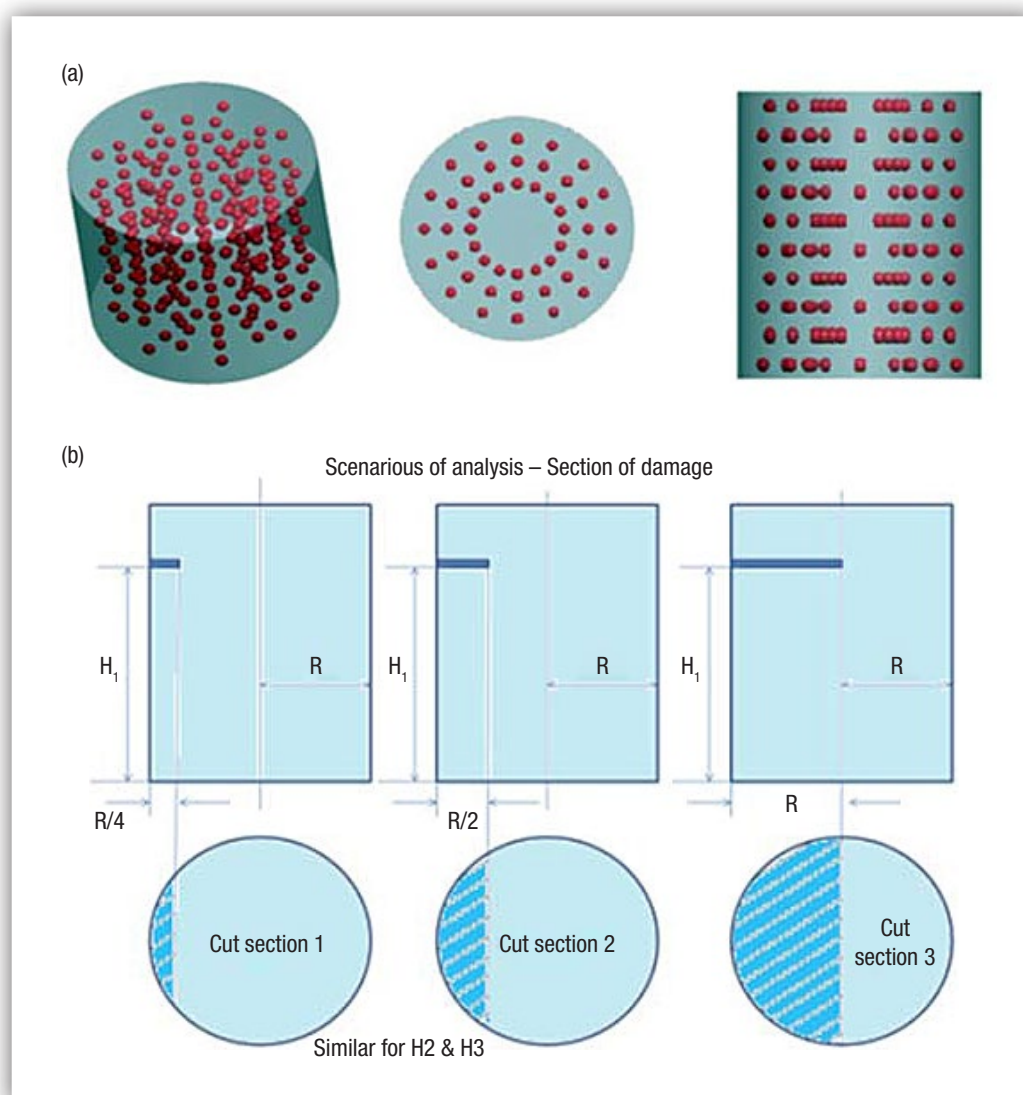
**Figura 1.** Metamaterial desarrollado por Claeys et al. [8]: (a) Prototipo y (b) comparativa de las pérdidas por inserción con un prototipo con paneles planos (Regular).

Siguiendo en la línea de estructuras tipo sandwich, Rijk y Nijman [9] han estudiado el comportamiento dinámico de una estructura laminada también de tipo sandwich, modelando la misma como un material equivalente utilizando un método de homogenización. Esto permite, por ejemplo, incorporar dichos materiales en modelos de elementos finitos de forma sencilla, evitando de esta forma implementaciones más complejas. En esta vertiente de simplificar el modelado de los sistemas que componen un EV, Vlase [10] desarrolló una formulación numérica basada en las ecuaciones de Lagrange de utilidad para la optimización del análisis de vibraciones usando el FEM.

Una interesante aplicación es la propuesta por Itu et al. [11] para la detección temprana de daño en un material (en concreto a un amortiguador inercial). En su estudio comparan los resultados de un análisis modal en

FEM de estos amortiguadores inerciales y medidas experimentales de identificación modal, detectando el daño en los mismos cuando las diferencias entre ambos procedimientos superan un determinado umbral (Figura 2). Esta aplicación es de especial interés, pues no solo permite reducir gastos de material, sino que además supone un importante ahorro de tiempo en las inspecciones visuales periódicas.

Otro trabajo que ofrece una perspectiva más detallada de los motores eléctricos que incorporan los EVs es el llevado a cabo por Dos Santos et al. [12]. En éste, desarrollan un modelo multifísica del sistema SRM (*Switched Reluctance Motor*) de un EV contemplando los efectos electromagnéticos, estructurales y acústicos (ver Figura 3). Basándose en su modelo, es posible predecir el nivel de presión sonora alrededor del motor así como gestionar el consumo energético del mismo.



**Figura 2.** Detección temprana del daño en un amortiguador inercial (Itu et al. [11]): (a) modelo físico y (b) escenarios de análisis.

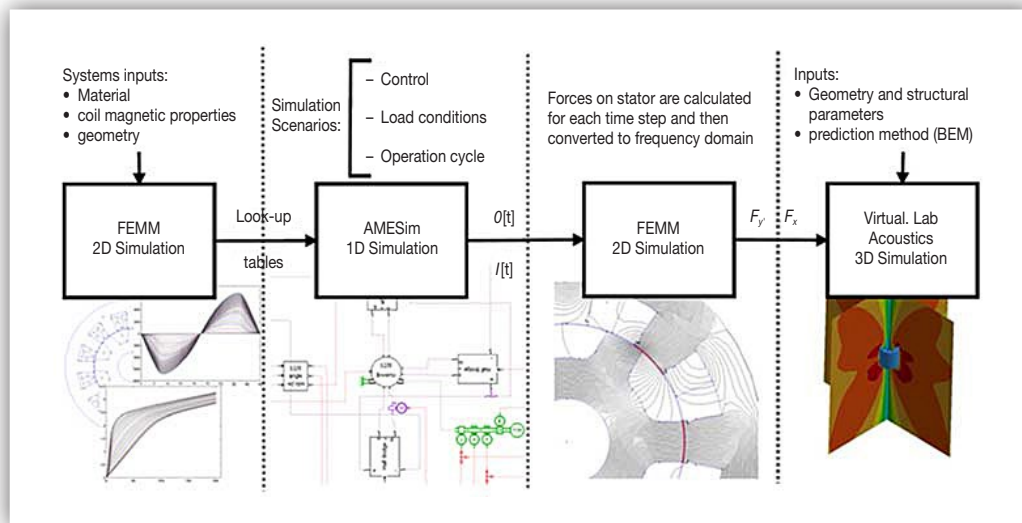


Figura 3. Fases del modelado multifísica de un motor eléctrico desarrollado por Dos Santos et al. [12].

### 3. Técnicas de predicción del campo acústico radiado por los EVs

La predicción del campo acústico radiado por los EVs es otro de los aspectos fundamentales de su análisis NVH, no solo por la importancia de evaluar su contaminación acústica, sino también por la novedad que supone la incorporación de AVAS. Los AVAS son unos dispositivos de emisión acústica cuya instalación en los EVs es considerada necesaria por el marcado carácter «silencioso» de éstos respecto a los vehículos de combustión interna tradicionales. Esta particularidad pretende facilitar su detectabilidad y reducir el riesgo que supone para ciclistas y peatones, especialmente para personas invidentes o mayores. Es por ello que su estudio ha recibido una gran atención dentro de las actividades llevadas a cabo.

Uno de los métodos preferidos para realizar simulaciones del campo acústico radiado, siendo por tanto muy adecuada para este tipo de problemas, es el BEM. Godinho et al. [13] explotaron las potencialidades del BEM para estudiar el efecto del uso de AVAS en los EVs. Además, para soslayar algunas de las limitaciones de dicho método implementaron un modelo mucho más eficiente computacionalmente utilizando el ACA-BEM (*Adaptative Cross Approximation* BEM). Esta herramienta numérica les permitió predecir el campo acústico generado para diferentes configuraciones de AVAS y evaluar la influencia del escenario urbano en su patrón directivo (ver Figura 4).

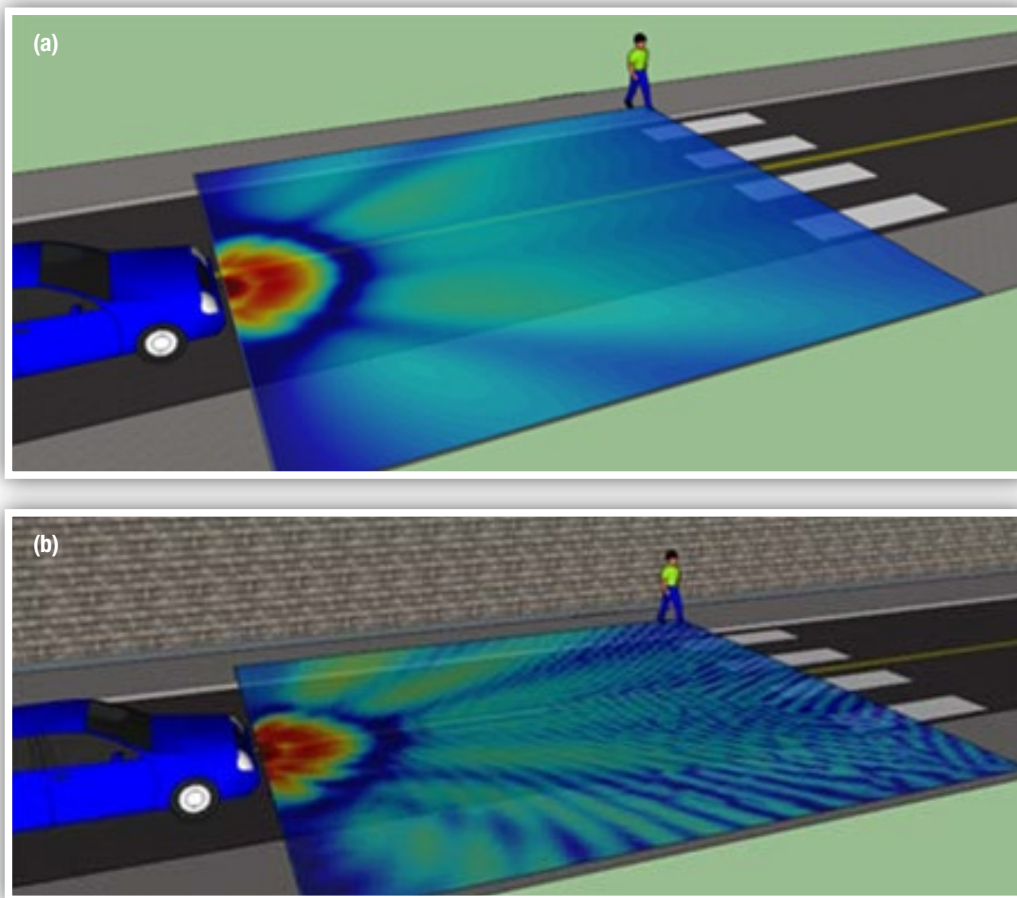
Van Genechten et al. [14] propusieron una serie de herramientas de simulación numérica para el diseño de los AVAS con control de directividad basadas en algoritmos avanzados de *beamforming*. Así mismo, también plantearon la posibilidad de usar estas herramientas para

diseñar un sistema complementario en el interior del vehículo que permita alertar al conductor del mismo.

Por otra parte, Carbajo et al. [15] exploraron el uso de un low-cost end-fire array como AVAS en EVs. Este tipo de arrays permiten realizar un control de la directividad de la fuente sonora sin necesidad de sistemas electrónicos adicionales, empleando además un único altavoz. A partir de un modelo numérico, estudian el efecto de la geometría del array en su rendimiento acústico y proponen un modelo analítico simplificado del mismo.

### 4. Conclusiones

En este trabajo se recogen algunas de las contribuciones numéricas para el análisis NVH de EVs desarrolladas en el marco de la Acción COST TU1105. Se discute la especial importancia que tiene la predicción del comportamiento vibroacústico de estos vehículos ante su creciente auge en la industria del transporte. A lo largo del mismo, se ha diferenciado entre aquellas investigaciones relacionadas con el análisis estructural de los EVs y las orientadas a predecir el campo acústico que radian los AVAS que éstos deben integrar. Algunos ejemplos son el desarrollo de nuevos materiales que mejoran las prestaciones acústicas de los ya existentes, la implementación de sistemas para la detección temprana de daños, o el diseño de los sistemas AVAS, entre otros. En ambos casos queda de manifiesto la necesidad de disponer por parte de los distintos profesionales que se agrupan dentro del sector de la automoción, de nuevas soluciones o herramientas de utilidad como las citadas. En resumen, los resultados invitan a seguir trabajando en el desarrollo de estos y nuevos métodos numéricos para el diseño de EVs.



**Figura 4.** Modelo en ACA-BEM propuesto por Godinho et al. [13]. Distribución del NPS generado por un AVAS calculado a 1000 Hz para: (a) calle abierta y (b) calle con muro lateral.

## 5. Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren mostrar su más sincero agradecimiento a todos y cada uno de los miembros de la Acción COST TU1105, desde los investigadores hasta las empresas, asociaciones y otros entes sin cuya colaboración a lo largo de estos cuatro años que ha durado la misma este trabajo no habría sido posible.

## 6. Referencias

- [1] Marbjerg G. Noise from electric vehicles - a literature survey. Compett, 2013.
- [2] Nordelöf A, Messagie M, Tillman A-M, Söderman MJ, Van Mierlo J. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles - what can we learn from life cycle assessment? *Int J Life Cycle Assess* 2014; 19:1866-1899.
- [3] European Environment Agency. Noise in Europe 2014. 2014.
- [4] European Environment Agency. Evaluating 15 years of transport and environmental policy integration - TERM 2015: Transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe. 2015.
- [5] NHTSA. Quieter cars and the safety of blind pedestrians: Phase I. 2010.
- [6] NHTSA. Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles - Draft environmental assessment. 2013.
- [7] Pedersen TH, Gadegaard T, Kjems K, Skov U. White paper on external warning sounds for electric cars-Recommendations and guidelines. Delta, 2011.
- [8] Claeys C, Deckers E, Pluymers B, Desmet W. A light-weight vibro-acoustic metamaterial demonstrator: Numerical and experimental investigation. *Mech Syst Signal Pr* 2016; 70-71:904:918.
- [9] Rijk S, Nijman E. Equivalent material modelling of sandwich beam assemblies: propagating and evanescent wave considerations. *NVH Analysis techniques for Design and Optimization of Hybrid and Electric Vehicles*. Germany: Shaker Verlag; 2016.

- [10] Vlase S. Eigenvalues and Eigenmodes of an Inclined Homogeneous Truss in a Rotational Field. *Rom J Phys* 2014; 59: 699-714.
- [11] Itu C, Borza PN, Scutaru ML, Pena CG, Mateo SS, Vlase S. Damage detection in the inertial dampers of electrical vehicle using experimental modal identification. *NVH Analysis techniques for Design and Optimization of Hybrid and Electric Vehicles*. Germany: Shaker Verlag; 2016.
- [12] Dos Santos FLM, Anthonis J, Naclerio F, Gyselinck JJC, Van der Auweraer H, Goes LCS, Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle. *IEEE T Ind Electron* 2014; 61 (1): 469–76.
- [13] Sánchez-Milán A, Carbajo J, Godinho L, Peral-Orts R, Ramis J. On the use of the BEM to study the noise emitted by circulating EVs or HVS in urban environment. *Tecniacústica*; 21-23 Octubre 2015; Valencia, España 2015.
- [14] Van Genechten B, Berkhoff AP. Simulation-based design of a steerable acoustic warning device to increase (H)EV detectability while reducing urban noise pollution. *Proc Transport Research Arena* 2014; 14-17 Abril 2014; Paris, Francia 2014.
- [15] Carbajo J, Elliott S, Cheer J. Study of a low-cost end-fire array for use in electric vehicles. *Proc Internoise*; 21-23 Agosto 2016; Hamburgo, Alemania 2016.

## NoisePlatform

Plataforma online de monitorización de ruido



### SOLUCIÓN PARA LA MONITORIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA



Smart cities



Ambiental



Obras



Industria



Ocio

# GIP, Global Insulation Package

SOLUCIÓN COMPLETA para la medición de aislamiento acústico:  
MEDICIÓN – CÁLCULOS – INFORME

**MI006**  
Máquina  
de impactos



**FP122**  
Fuente Sonora  
omnidireccional

 **Bluetooth®**

**SC420**  
Sonómetro  
Analizador de espectro



**SOFTWARE**  
Cálculo de Aislamientos  
CESVA Insulation Studio (CIS)  
Ayuda a la medición  
CESVA Measuring Assistant (CMA)

Incluye  
ISO 16283-1

**CESVA**  
NOISE  
MEASURING  
INSTRUMENTS  
SINCE 1969

Maracaibo, 6 - 08030 Barcelona (Spain)

T. (34) 934 335 240 info@cesva.com  
F. (34) 933 479 310 www.cesva.com