

Técnicas de análisis del NVH para el diseño y optimización de vehículos eléctricos e híbridos: Acción Europea COST TU1105



Nuria Campillo-Davó¹; Bert Pluymers²; Simone Delvecchio³; Ahmed Rassili⁴; Jan-Welm Biermann⁵; Athanassios Mihailidis⁶

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche, Elche, Spain.

² KU Leuven, Leuven, Belgium.

³ Siemens Industry Software S.r.l., Italy.

⁴ Liège University, Liège, Belgium.

⁵ Institute für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Germany.

⁶ Aristotle University of Thessaloniki, Greece

ncampillo@umh.es

PACS: 43.50.Lj

Resumen

La introducción en el mercado automovilístico de vehículos alternativos con nuevos sistemas de propulsión, como los vehículos eléctricos e híbridos, se percibe como una solución potencial a los problemas medioambientales generados por el transporte rodado. Sin embargo, la aparición de estos vehículos plantea a su vez nuevos retos desde un punto de vista técnico para optimizar su comportamiento acústico y vibratorio. En este contexto surgió la Acción COST TU1105, con el objetivo de recopilar y proponer nuevas técnicas de análisis de ruido y vibraciones que se puedan aplicar durante el diseño y desarrollo de los vehículos eléctricos e híbridos. En este monográfico se recogen las principales conclusiones alcanzadas como resultado del trabajo desarrollado por el consorcio de la Acción.

Abstract

The introduction of alternative propulsion systems in the automotive market, such as electric vehicles and hybrid vehicles, is perceived as a potential solution to environmental problems derived from the road transport. However, the emergence of those vehicles poses as well new challenges from a technical point of view for optimizing their acoustical and vibrational behavior. In that context was created the COST Action TU1105, with the main objective to acquire and propose new techniques for the analysis of noise and vibrations of those vehicles to be applied during the design and development phases of electric and hybrid vehicles. In this monograph, the main conclusions reached as a result of the work done by the consortium of the Action are collected.

1. Introducción

La incorporación de los vehículos eléctricos (VEs) y de vehículos híbridos (VEHs) en el mercado automovilístico en los últimos años se percibe como una posible solución a los problemas medioambientales acarreados por los vehículos tradicionales, equipados con motores de combustión interna (ICEs). Desde el punto de vista de la emisión de gases nocivos, se espera que la propulsión eléctrica contribuya a alcanzar el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, lo que implicará una mejora en la calidad del aire en áreas urbanas, una disminución de las fuentes causantes del calentamiento global, y una reducción del consumo de recursos no renovables. Desde el punto de vista de la calidad sonora en las ciudades, también se espera que los vehículos alternativos proporcionen una reducción de la contaminación acústica derivada de los flujos de tráfico e impacten positivamente en los mapas de ruido de las

ciudades, dado el aumento significativo del ruido derivado del tráfico rodado [1].

Según [2], estaba previsto que la demanda mundial de VEHs avanzara rápidamente desde las 1,6 millones de unidades en 2010, hasta 4,3 en 2015 y aproximadamente el doble en 2020. Sin embargo, la presencia real de estos vehículos en el parque automovilístico español y europeo, reflejada en el número de nuevas matriculaciones, es actualmente todavía muy escasa, salvo en ciertas excepciones como Noruega [3]. En este sentido, los vehículos eléctricos e híbridos presentan ciertos aspectos que desde el enfoque de los usuarios pueden suponer desventajas frente a los vehículos ICEs. Al factor económico y al precio más elevado de estos vehículos, se unen otros factores como la sensación de conducir un vehículo con una autonomía limitada o con un alto tiempo de recarga de la batería, lo que genera la incertidumbre en los usuarios sobre si éstos vehículos

satisfarán sus necesidades de movilidad individual. Así mismo, su reducida emisión sonora y la posibilidad de generar situaciones potencialmente peligrosas asociadas a su baja detectabilidad por parte del peatón, o un ambiente sonoro particularmente silencioso en el interior de la cabina que puede ser confuso para el conductor, lo que puede llevar a los potenciales consumidores a optar por la adquisición de un vehículo tradicional antes que uno eléctrico o híbrido.

Por tanto, para que los VEs y VEHs puedan ser competitivos en un mercado tan tradicionalmente marcado por los vehículos de combustión interna, es necesario que a nivel comunitario y estatal se sigan desarrollando políticas de incentivación hacia la compra de estos vehículos. Pero además, también es fundamental que los vehículos alternativos reúnan unas adecuadas condiciones técnicas, entre las cuales se encuentra disponer de un comportamiento acústico y vibracional (por sus siglas en inglés NVH —Noise, Vibration and Harshness—) aceptable por parte de los usuarios. En este sentido, la mayor parte del know-how existente aplicable al diseño y resolución de problemas asociados con el NVH durante la fase de desarrollo de nuevos vehículos se concentra en los vehículos de combustión interna. Por lo que dadas las relevantes diferencias entre los vehículos convencionales y las nuevas generaciones, es esencial recopilar el escaso y disperso conocimiento que existe actualmente sobre estos vehículos, y desarrollar nuevas técnicas de análisis del NVH que se puedan aplicar durante la fase de diseño y desarrollo de estos nuevos sistemas de propulsión.

En este contexto y con el fin de contribuir en el estudio y desarrollo de las futuras generaciones de vehículos se creó la Acción COST TU1105 «NVH analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles» [4]. El objetivo principal del proyecto es poner en común y coordinar el conocimiento existente sobre vehículos eléctricos que hay disperso en Europa, y proponer y desarrollar nuevas técnicas para analizar su comportamiento acústico y vibracional que se puedan emplear durante la fase de diseño de estos vehículos.

2. NVH en la automoción

El concepto NVH —*Noise, Vibration & Harshness*— aplicado a la automoción permite describir el comportamiento dinámico de los vehículos automóviles en un rango de frecuencias completo. Es decir, abarca desde las vibraciones de estructuras apreciables a baja frecuencia, pasando por la gama sensible y audible del confort acústico percibido (*harshness*), hasta el rango de ruido audible a alta frecuencia limitado por la capacidad de percepción del oído humano [5].

Una metodología usual para abordar los problemas de ruido y vibraciones en vehículos es adoptar el enfoque de análisis de sistemas, en el cual una o más fuerzas de excitación generan una o más respuestas que están relacionadas mediante la función de transferencia del sistema. En los vehículos automóviles, las excitaciones pueden venir de cualquier fuente posible de ruido y vibración, como por ejemplo las vibraciones del motor o el ruido de escape. En muchas ocasiones resulta de interés conocer la respuesta de estas fuentes en localizaciones determinadas en el interior de la cabina, tales como en la posición del conductor o de los pasajeros. En estos casos, la función de transferencia que se obtiene es la función desde la fuente de ruido o vibración hasta el receptor, y ésta puede ser vibracional, acústica o una combinación de ambas.

En los casos en los que existen muchas fuentes de ruido y vibración, se suele emplear una metodología en cascada para categorizarlos, en la que habitualmente se hace una distinción de las fuentes de ruido que se transmiten por vía estructural y por vía aérea. Entre las primeras se encuentran las vibraciones del motor, las vibraciones generadas en la interacción neumático-pavimento, o las vibraciones del escape. Entre las segundas, se distinguen la radiación acústica del bloque motor, el ruido aerodinámico, o el ruido de la admisión y del escape. Por otro lado, también se suele plantear una opción alternativa que consiste en considerar todas las fuentes posibles en un primer nivel del modelo de cascada y en un segundo nivel considerar las vías de transmisión que siguen las fuentes, distinguiendo entre vías acústicas y estructurales.

Por tanto, con el fin de minimizar los niveles sonoros en un vehículo hasta conseguir un nivel objetivo, se requiere bien modificar siempre y cuando sea posible el ruido generado por las diferentes fuentes o modificar las vías de transmisión que recorre el ruido. Los métodos para estudiar problemas vibro-acústicos se pueden clasificar en analíticos, numéricos y experimentales. Las ventajas de los métodos analíticos radican en que pueden predecir resultados acústicos o vibratorios sin ser necesarios demasiados cálculos, en un tiempo breve y generalmente sin limitaciones de frecuencia. Los métodos numéricos son muy útiles para modelizar casos reales de un modo preciso, y para predecir la radiación sonora y de vibraciones de estructuras complejas. A diferencia de los métodos analíticos, los métodos numéricos requieren un gran número de cálculos y tiempo para su resolución, un considerable coste personal para diseñar modelos detallados y solamente son aplicables para análisis en bajas frecuencias. Por otro lado, existen muchas técnicas experimentales para resolver problemas vibro-acústicos, entre las cuales una ampliamente

utilizada en la industria de la automoción para el análisis de las diferentes vías de transmisión es la conocida como TPA o NPA (de sus siglas en inglés *Transfer Path Analysis* o *Noise Path Analysis*), con la que se puede obtener una descripción completa de las características acústicas de un vehículo con un buen conocimiento de sus causas.

El ruido y las vibraciones juegan un importante rol en lo que se conoce como la calidad sonora del vehículo. La calidad sonora y vibratoria de un vehículo es un tema muy amplio dada la compleja interacción entre el usuario y el vehículo. En las sociedades industrializadas, donde el uso de los vehículos para el transporte de pasajeros ha sido un medio de transporte prevalente durante las últimas décadas, los usuarios han desarrollado expectativas muy concretas sobre la sensación que se desea al usar un automóvil, y estas expectativas, junto con el coste o el consumo, definen las decisiones de compra. La industria de la automoción a nivel mundial ha invertido considerables recursos en los últimos veinte años para comprender el rol que el sonido y las vibraciones juegan en las percepciones de los usuarios y para definir objetivos realistas para asegurar el interés comercial.

En este sentido, y como se comentaba anteriormente, es fundamental que los vehículos alternativos reúnan un NVH que sea acorde a las expectativas y preferencias de los usuarios de los mismos, para que éstos sean competitivos en el sector. Y para ello es imprescindible poder disponer de las herramientas y técnicas de análisis adecuadas que permitan abordar la definición del comportamiento acústico y vibracional desde la fase de diseño de estos vehículos hasta su posterior fabricación, adaptando, siempre y cuando sea posible, las técnicas existentes aplicadas al NVH en vehículos ICEs, o desarrollando específicamente nuevas técnicas para su uso en VEs y VEHs.

2.1. Tipos de sistemas de propulsión en VEs y VEHs

Para poder abordar el problema del NVH en vehículos eléctricos e híbridos, es fundamental conocer los tipos de sistemas de propulsión existentes actualmente. Estos sistemas se pueden clasificar según diferentes criterios, encontrando que en este tipo de vehículos usualmente se distinguen los vehículos propulsados por motores eléctricos, los sistemas de pilas de combustible y las unidades híbridas [6].

Por un lado, bajo la designación de vehículos eléctricos se recogen los vehículos propulsados por motores eléctricos alimentados por baterías, extensores de rango y sistemas de pilas de combustible. Como vehículos eléctricos puros se consideran los propulsados por motores eléctricos alimentados por baterías que se cargan con la red eléctrica pública. Otra opción es cargar las

baterías usando una unidad extensora de rango, en la que un generador que carga las baterías se acciona mediante un motor de combustión. Finalmente, los vehículos con pila de combustible son los que una pila de combustible compuesta por hidrógeno o metanol proporciona la energía eléctrica.

Por otro lado, bajo la designación de vehículos híbridos se engloban los vehículos propulsados por dos motores diferentes (habitualmente un motor de combustión interna y un motor eléctrico) y sus correspondientes sistemas de almacenaje. Estos vehículos se pueden clasificar en función del grado de electrificación y en el modo en el que se acoplan sus motores.

En relación con el grado de electrificación de los VEHs, se pueden encontrar: los sistemas start/stop, que permiten que el motor de combustión se pare cuando el vehículo se detiene; los vehículos micro-híbridos (micro hybrid o grado de hibridación baja), que permiten un frenado regenerativo simple por medio de un alternador integrado que se añade al sistema de start/stop; los semi-híbridos (mild hybrid o grado de hibridación media), que permiten la impulsión y el frenado regenerativo; y los híbridos puros (full hybrid o grado de hibridación completa), que permiten una propulsión eléctrica además de todas las funciones mencionadas anteriormente.

En función del modo en el que los VEHs acoplan sus motores, se pueden encontrar: los vehículos híbridos en serie, en los que los componentes están dispuestos a lo largo del mismo eje; los vehículos híbridos en paralelo, en los que tanto el motor de combustión como el motor eléctrico pueden propulsar el vehículo mediante una conexión mecánica directa a las ruedas; los vehículos híbridos combinados (también denominados en serie-paralelo), en los que se combinan las características de los sistemas en serie y paralelo; los vehículos híbridos con transmisión power-split, donde la potencia mecánica del motor de combustión se transmite a las ruedas por dos vías diferentes: directamente mediante una transmisión mecánica y a través de una ruta auxiliar que se compone de dos máquinas eléctricas que operan como motor y generador que conforman una transmisión continuamente variable; y los vehículos híbridos enchufables (o plug-in), en los que la batería se carga mediante conexión a la red eléctrica pública y se descarga durante el funcionamiento del vehículo de un modo similar a como lo haría un depósito de combustible, lo que permite que el vehículo circule en modo exclusivamente eléctrico a bajas velocidades (20-50 km/h).

Puesto que los vehículos híbridos no tienen la limitación de autonomía que presentan los puramente eléctricos, ni el inconveniente en cuanto a emisiones contaminantes que presentan los vehículos de combustión

interna, suelen encontrarse más acorde con las necesidades de los consumidores y sus patrones de conducción actuales y futuros. Los vehículos híbridos combinan la ventaja de tener integrados dos sistemas de propulsión diferentes, la posibilidad de circular sin emisiones locales y la capacidad de recorrer largas distancias. Los vehículos eléctricos se presentan más adecuados para una movilidad en entorno urbano y recorridos de corta distancia. Los híbridos podrían ser la principal solución para una movilidad sostenible, para el transporte de usuarios individuales, para el transporte de mercancías y para el transporte público, así como para la movilidad en entorno urbano también. En resumen, las necesidades de los consumidores deben definir las mejores opciones para la movilidad alternativa en entornos urbanos e interurbanos. Pero también los requerimientos de otros usuarios de las vías —peatones, ciclistas, otros conductores, etc.— deben tenerse en cuenta.

3. Metodología de trabajo en la Acción COST TU1105

Junto con el objetivo principal del proyecto, se definieron una serie de objetivos secundarios que permitirían abordar el proyecto de un modo más detallado. En primer lugar, era fundamental conocer las necesidades de la industria dentro del sector del NVH de VEs y VEHs así como evaluar la percepción y las expectativas que los consumidores pueden tener sobre las condiciones interiores y exteriores de un vehículo alternativo en relación a su ambiente acústico y vibraciones en la cabina. También sería esencial recopilar el conocimiento que existía en Europa sobre NVH tanto en vehículos convencionales, como también el disperso conocimiento sobre vehículos alternativos, con el fin de adaptar, siempre que fuese posible, las técnicas empleadas para el diseño de vehículos tradicionales a los nuevos sistemas de propulsión. Se requería además estimular a los usuarios finales, compañías de transporte y autoridades responsables del desarrollo de infraestructuras sobre las nuevas interacciones que existen entre los vehículos alternativos y el medio ambiente, así como promover nuevas iniciativas europeas en este campo y difundir hacia los usuarios finales los resultados que se obtuviesen en este proyecto.

En el consorcio del proyecto, se creó una activa y multidisciplinar red de investigadores que trabajan en el ámbito del NVH y de la dinámica de vehículos desde diferentes perspectivas: desde equipos de investigación en el ámbito de las técnicas experimentales y numéricas, el control activo y pasivo de sistemas, y la calidad sonora, hasta grupos de investigación trabajando en aspectos relacionados con la psicología y necesidades de los consumidores.

El programa científico dentro de la Acción COST TU1105 se estructuró en cinco grupos de trabajo (WG), cuyas actividades se enfocaron a alcanzar los objetivos comentados anteriormente. En el WG1 se trabajó en compilar el estado del arte sobre las técnicas de análisis del NVH aplicadas a los vehículos ICEs y las características relacionadas con el ruido y las vibraciones de los nuevos vehículos. El WG2 se centró en desarrollar técnicas experimentales para el análisis sonoro y vibratorio de VEs y VEHs, mientras que el WG3 se enfocó a desarrollar técnicas numéricas. El WG4 se orientó al estudio del comportamiento acústico de estos vehículos, analizando su detectabilidad y la efectividad de aplicar sonidos de advertencia para mejorar dicha detectabilidad. Finalmente, el WG5 se dedicó a la difusión de resultados hacia todos los niveles de la sociedad.

4. Conclusiones

La Acción COST TU1105, enmarcada dentro del programa de Acciones COST de la Unión Europea, comenzó sus actividades en abril de 2012. Durante los cuatro años que ha durado el proyecto, se ha consolidado un consorcio en el que han participado 37 entidades de 17 países diferentes (incluyendo 3 entidades no Europeas), entre los que se incluyen miembros de instituciones académicas e institutos de investigación, empresas del sector de automoción y colectivos afectados [6]. Por tanto, este proyecto ha proporcionado la oportunidad única de reunir investigadores seniors y noveles, autoridades europeas en la reglamentación del transporte rodado, consultores, representantes de la industria y asociaciones de transporte, para recopilar las necesidades y proponer nuevas herramientas y metodologías dentro del campo del NVH en vehículos con propulsión alternativa. El trabajo realizado por el consorcio ha permitido alcanzar resultados punteros, obteniendo un análisis detallado de los enfoques existentes para analizar el NVH, así como su validación para ser aplicados en las nuevas generaciones de vehículos. Los resultados del proyecto están recopilados en el libro «*COST Action TU1105-NVH Analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles*» [6].

En los artículos recogidos en el presente monográfico de la Revista de Acústica dedicado a la Acción COST, se describen las principales actividades y conclusiones obtenidas en el proyecto. En concreto, se da una visión general sobre las expectativas del consumidor hacia el uso y compra de vehículos híbridos y eléctricos en función del ruido y las vibraciones, se resumen las principales técnicas experimentales y numéricas para el análisis sonoro y vibratorio de VEs y VEHs, y se analiza el comportamiento acústico de estos vehículos prestando especial atención a su detectabilidad y la efectividad de los sonidos de advertencia.

Finalmente, los resultados y conclusiones de este proyecto, y junto con la visión proporcionada por los miembros del consorcio pertenecientes a la EARPA (European Automotive Research Partners Association) han permitido identificar las necesidades, prioridades y retos del NVH cruciales en el campo de la automoción para el diseño y la fabricación de las futuras generaciones de vehículos. Entre estos trabajos futuros se encuentran: el desarrollo de nuevas herramientas para el análisis del NVH especialmente aplicado a los nuevos componentes integrados en los vehículos alternativos como motores eléctricos, extensores de rango, engranajes o la electrónica de potencia; el progreso en el diseño de una nueva generación de materiales inteligentes que permitan mitigar el ruido y la vibración provenientes del vehículo y sus componentes; la utilización de una manera simbiótica de los sistemas de control y sensores existentes actualmente en los vehículos, para adaptar y mejorar el comportamiento acústico y vibratorio de estos vehículos y sus componentes; el desarrollo de nuevas funciones que permitan incluir, no sólo las métricas ingenieriles basadas en las medidas objetivas de decibelios para conocer la percepción sobre el NVH de los consumidores y usuarios de la vía, sino también aspectos subjetivos relacionados con factores humanos y medioambientales; y el diseño de un nuevo concepto de ruido urbano, basado en la idea de que las ciudades del futuro tengan mapas de ruido cuyas principales fuentes sonoras provengan de vehículos silenciosos equipados con sonidos de advertencia directivos para alertar a peatones, junto con el uso generalizado de otras señales ubicadas en edificios y mobiliario urbano que permitan la navegación peatonal segura y a su vez la definición de los paisajes sonoros urbanos.

Los miembros de la Acción, junto con aquellas personas que puedan estar interesadas, continuarán trabajando en estos puntos clave para el futuro desarrollo del campo de la investigación y la innovación en el NVH, en nuevos y futuros proyectos y actividades de colaboración, contribuyendo de este modo al legado de la Acción COST TU1105.

5. Agradecimientos

Los artículos recogidos en el presente monográfico están basados en el trabajo de la Acción COST TU1105 «NVH analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles», financiada por el programa de Acciones COST (European Cooperation in Science and Technology) de la Unión Europea. Los autores de este monográfico quieren agradecer de un modo especial a todos los miembros del consorcio de la Acción COST TU1105 (ver listado de miembros en [6]), que gracias a su trabajo, esfuerzo y dedicación al proyecto han contribuido a los excelentes resultados obtenidos en la Acción. Así mismo, quieren agradecer a la Sociedad Española de Acústica la excelente oportunidad brindada para dar difusión mediante el presente monográfico a los logros alcanzados en este proyecto, así como el patrocinio institucional brindado durante la Conferencia Final de la Acción celebrada los días 6 y 7 de abril en la Universidad Miguel Hernández de Elche.

6. Referencias

- [1] European Commission's Green Paper of 4th November 1996 on Future Noise Policy /*COM/96/540 FINAL*/
- [2] The Freedonia Group. (2006). «World Hybrid-Electric Vehicle», Oct. 2006.
- [3] A. Lazarevic. «Electrified and other alternative fuel vehicles-EU policies concerning such vehicles». Proceedings of the COST Action TU1105 Final Conference. Elche, Spain, April 2016.
- [4] http://www.cost.eu/COST_Actions/tud/TU1105
- [5] S. Delveccio. WG1 of COST Action TU1105. «State of art in NVH of ICE and Electrified Vehicles». Extended Scientific Report of COST Action TU1105. 2013.
- [6] N. Campillo-Davo, A. Rassili, (eds). NVH analysis techniques for design and optimization of hybrid and electric vehicles. Aachen, Germany: Shaker Verlag; 2016.

BRÜEL & KJÆR

LÍDER EN ENSAYOS ACÚSTICOS Y DE VIBRACIÓN

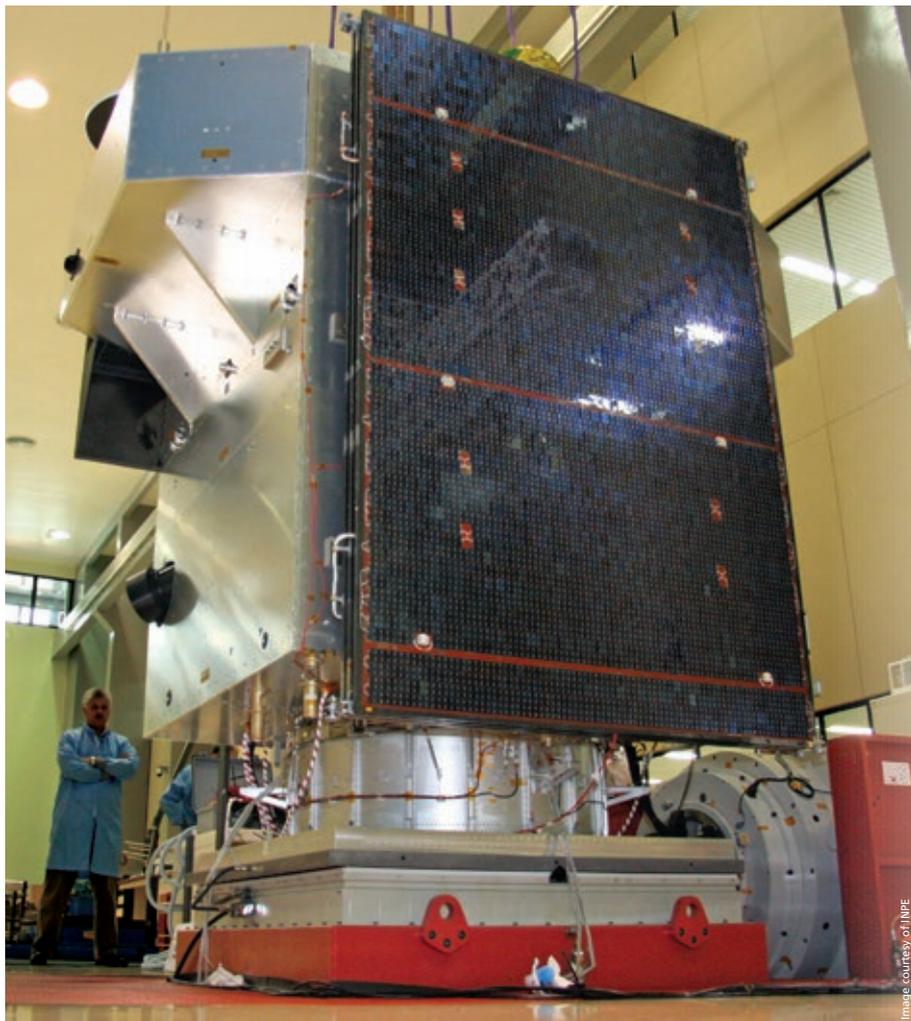


Image courtesy of INPE

TODO DEL MISMO PROVEEDOR

Brüel & Kjær posee la gama más completa de sistemas de medida y ensayo de sonido y vibraciones



Soluciones completas para satélites, lanzadores, subsistemas y cajas de equipos

- Vibradores y controladores
- Transductores y sistemas de adquisición
- Software de análisis y procesado
- Gestión de datos e informes

Brüel & Kjær 

BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær Ibérica, S.A.

Teide, 5 · 28703 San Sebastián de los Reyes (Madrid)
Tel.: 91 659 08 20 · Fax: 91 659 08 24

bruelkjaer@bksv.com

www.bksv.com/aerospace

CREAR ESPACIOS APTOS PARA LA GENTE
OPTIMIZANDO LA ACÚSTICA

DISFRUTE LA CALMA



Una acústica pobre nos impide trabajar de manera eficiente en la oficina o en el puesto de trabajo y, dejamos de disfrutar en los conciertos y eventos sociales. La calidad del sonido de una habitación depende de su tamaño, su forma y de sus materiales. Todo se reduce a que las reflexiones sonoras son demasiadas, demasiado pocas o, se producen en la dirección equivocada.

Con las herramientas innovadoras de Brüel & Kjær como fuentes acústicas, sonómetros y software de análisis, se puede optimizar la calidad del sonido y medir el aislamiento. Usted puede averiguar si una habitación es adecuada para los fines previstos, si está debidamente aislada y, mejorar su diseño acústico.

Preparado para la ISO 16283. Además, utilizando la nueva generación de sonómetros G4, homologados según ITC 2845, puede asegurar la metrología legal incluso de sus datos, de acuerdo con Welmeq 7.2. Mejore su incertidumbre de medida y demuestre con absoluta seguridad que su equipo no ha sido manipulado.

Brüel & Kjær 

BEYOND MEASURE

Brüel & Kjær Ibérica, S.A.

C/ del Teide 5 · Bajo Edif. Milenio

28703 San Sebastián de los Reyes (Madrid)

Teléfono: +34 91 659 08 20 · Fax: +34 91 659 08 24

bruelkjaer@bksv.com

www.bksv.es/roomacoustics