

## IDENTIFICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN AÉREA DEL RUIDO EN AUTOCARES

**J. Berasategui<sup>\*</sup>, U. Galfarsoro, M. J. Elejabarrieta**

Mondragón Unibertsitatea, Loramendi 4, 20500 Mondragón  
mjelejabarrieta@eps.mondragon.edu

### **Resumen**

Para aumentar el confort vibroacústico de un autocar es necesario conocer cualitativa y cuantitativamente tanto las fuentes de ruido y vibraciones, como las vías de transmisión de las mismas. Con este fin, en primer lugar, se ha definido y aplicado un procedimiento de medida y análisis para la caracterización vibratoria y acústica de un autocar en diferentes modos de funcionamiento: ralentí, velocidad constante, aceleración y deceleración. Una vez identificadas las principales fuentes de ruido del autocar (motor, grupo de transmisión, rodadura y aerodinámica) se ha evaluado la contribución al ruido interior, por transmisión aérea, del motor y del grupo de transmisión. De estos ensayos, se ha determinado que el ruido y las vibraciones que percibe el viajero por debajo de 500 Hz se deben exclusivamente a la transmisión estructural.

**Palabras-clave:** ruido, vibraciones, fuentes, vías de transmisión y autocares.

### **Abstract**

To improve the vibroacoustic comfort of a coach it is necessary to know qualitatively and quantitatively the noise and vibration sources, as well as their transmission paths. With this purpose a procedure has been defined and applied for vibroacoustic characterization of a coach in different operating modes: idle, constant speed, acceleration and deceleration. Once the mains noise sources of the coach (engine, transmission group, tread and aerodynamics) has been identified, the airborne contribution to interior noise of the engine and transmission group has been evaluated. From these tests, it has been determined that the noise and vibrations perceived by the passenger below 500 Hz are exclusively due to structural transmission.

**Keywords:** noise, vibrations, sources, transmission paths, coaches.

## 1 Introducción

Hoy en día, el uso de autocares como transporte colectivo terrestre está generalizado en la sociedad y su utilización se fomenta desde todas las instituciones públicas. Los usuarios de este tipo de vehículos exigen que sean confortables, más aún en largos recorridos. En este sentido la reducción del ruido y de las vibraciones en el interior del autocar es un requerimiento esencial para obtener una buena calidad del vehículo y la satisfacción del viajero.

En un vehículo existen diferentes fuentes de ruido y vibración que afectan de distinto modo al ruido del interior [1], ya que la transmisión de ruido de las fuentes se da por vía aérea o estructural [2]. Las principales fuentes son el motor, la caja de cambios, el grupo de transmisión, la rodadura y la aerodinámica. El motor es la fuente más importante, ya que actúa en todas las condiciones de funcionamiento del autocar [3] y [4]. Las restantes fuentes entran en funcionamiento cuando el autocar se mueve, y en concreto las fuentes de rodadura y aerodinámica aumentan su importancia según aumenta la velocidad del autocar.

Mejorar el confort vibroacústico del autocar es uno de los principales objetivos de los ingenieros de diseño de este medio de transporte. Para conseguir esa mejora, es necesaria su caracterización vibroacústica, y para ello se ha establecido un procedimiento de medida y análisis del ruido y de las vibraciones que se dan en el autocar en diferentes modos de funcionamiento [5]. Con los resultados de estas medidas se ha determinado el nivel de ruido en el interior del habitáculo y la contribución al mismo de las vibraciones de diferentes elementos del autocar. También se han realizado dos tipos de ensayos para cuantificar la transmisión aérea del ruido al interior del habitáculo. Por una parte, con el autocar en marcha se ha apantallado el ruido que generan el motor y el grupo de transmisión, por lo que se atenúa su transmisión aérea. Por otra parte, con el motor del autocar apagado se ha reproducido mediante dos altavoces el ruido que emiten estas dos fuentes en diferentes condiciones de funcionamiento, con lo que los autospectros de vibración y de ruido medidos en el interior del habitáculo se deben exclusivamente a la transmisión aérea, ya que se han suprimido las fuentes de vibración.

Para realizar el estudio, se ha seleccionado un autocar de lujo de avanzada tecnología, pensado para realizar viajes de larga duración, ya que en este tipo de vehículos es esencial el confort de los pasajeros.

## 2 Procedimiento de medidas experimentales vibroacústicas

La norma ISO 5128-1980 [6] detalla como se deben llevar a cabo las medidas de ruido dentro de vehículos motorizados. El procedimiento de medida del ruido y las vibraciones del autocar que se ha establecido, se atiene a dicha norma.

Se han utilizado 32 canales de adquisición entre micrófonos y acelerómetros, distribuidos en el interior y exterior del autocar. Dos micrófonos se encuentran en el exterior del habitáculo, próximos al motor (M6) y al grupo de transmisión (M5). Los cuatro restantes están colocados en el interior: dos en la parte trasera (M3 y M4), uno junto a la puerta central (M2) y el último en la parte delantera (M1). En la Figura 1.a se indica, con M1 a M6, la distribución de dichos micrófonos.

En cuanto a las vibraciones, se ha medido la aceleración en 15 posiciones con acelerómetros del tipo ICP. Cuatro de estos acelerómetros están colocados fuera del habitáculo cerca del motor (A8 y A9) y del grupo de transmisión (A3 y A4). En estos puntos se han utilizado acelerómetros triaxiales, ya que el motor y el grupo de transmisión excitan el autocar en las tres direcciones espaciales. El resto de los acelerómetros son uniaxiales y se encuentran distribuidos en el interior del autocar: en la luna lateral

(A7), en la luna trasera (A14), en el panel lateral (A15), en el techo (A13) y el resto en diferentes partes del suelo de butacas (A1, A2, A5, A6, A10 y A10). En la Figura 1.b se indican con A1 a A15 la posición de los acelerómetros. Así mismo, en todo momento se han registrado las revoluciones del motor mediante un tacómetro fotoeléctrico, En la Figura 1 se muestran los ejes principales del autocar, siendo X el longitudinal, Y el transversal y Z el vertical.

Las condiciones de funcionamiento del autocar han sido las siguientes:

- Ruido de fondo. Todos los equipos del autocar apagados.
- Autocar parado y el motor a 500 rpm, 1400 rpm y 1800 rpm. El principal objetivo de estas medidas es caracterizar las vibraciones del motor y el ruido generado por estas vibraciones.
- Velocidad constante de 50 km/h, 70 km/h y 100 km/h. En estas medidas están presentes todas las fuentes principales de ruido y vibraciones del autocar.
- En punto muerto a 100 km/h. Con esta medida se reduce al mínimo el ruido emitido por el motor. Así se establece la contribución de otras fuentes de ruido como la rodadura o la aerodinámica.

Las medidas en carretera se han efectuado en una carretera llana con el asfalto en buenas condiciones y con un tiempo estable, sin viento ni lluvia. El tráfico de otros vehículos no ha intervenido en las medidas.

El análisis se ha realizado con autoespectros de banda estrecha de 10 Hz a 8 kHz, con una resolución de 0.625 Hz. Además, los autoespectros de ruido se les ha aplicado la ponderación A.

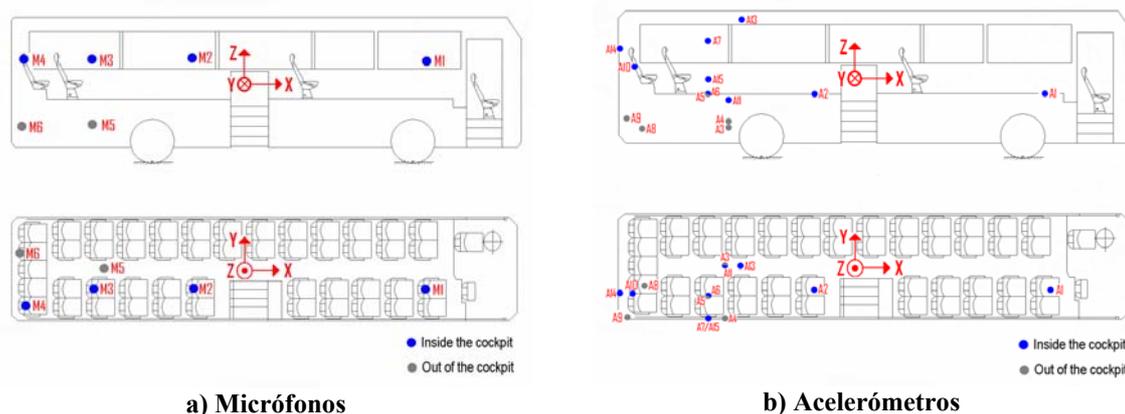


Figura 1 – Posición de los transductores.

Además del procedimiento de medida, descrito previamente, para la caracterización vibroacústica del autocar se han definido dos ensayos adicionales, con el fin de evaluar la contribución de la transmisión aérea al ruido interior. A estos ensayos se les denomina como: pantallas y altavoces. En ambos se mantienen el número y posición de los transductores descritos en la caracterización vibroacústica, de forma que los resultados de las diferentes medidas sean comparables.

El ensayo de pantallas se ha realizado en dos fases. En primer lugar se ha apantallado únicamente el motor, como se indica en la Figura 2.a. En esta situación se han realizado medidas con el autocar en parado y con el motor a diferentes regimenes de giro (500 y 1400 rpm). En la segunda fase, se ha apantallado el grupo de transmisión como se observa en la Figura 2.b (incluyendo la caja de cambios y el diferencial), y se ha medido en parado y a velocidades constantes de 50 y 100 km/h.

Las pantallas están hechas de madera laminada de 12 mm. En el lado contiguo a las fuentes vibroacústicas se ha colocado material absorbente de 40 mm de espesor, y en la cara opuesta, se ha adherido una lamina pesada para aumentar la perdida por transmisión (TL) de las pantallas.

Hay que destacar que tras efectuar las medidas con las pantallas colocadas en el motor y en el grupo de transmisión, se han retirado las mismas y se han repetido las medidas en las mismas condiciones de funcionamiento, con la intención de evaluar correctamente el efecto de las pantallas.

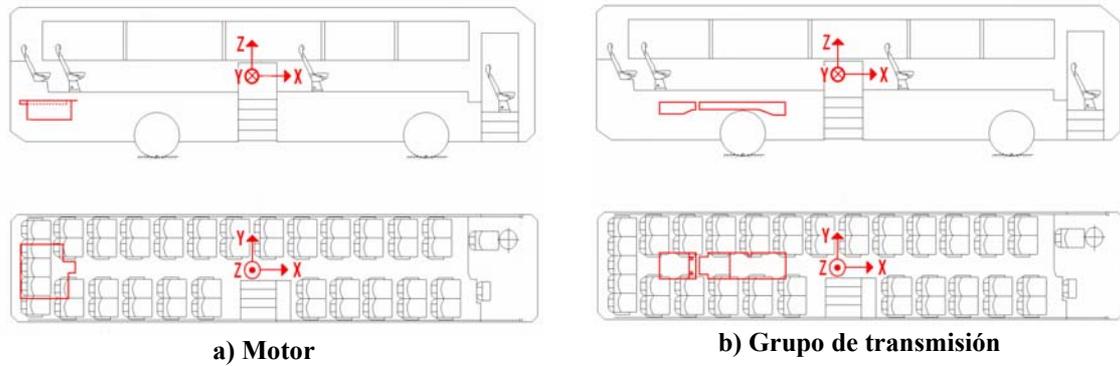


Figura 2 – Posición de las pantallas en rojo.

En el ensayo denominado Altavoces, se ha simulado con la ayuda de dos altavoces la medida en parado con el motor a 1400 rpm. De esta manera, se ha eliminado la excitación vibratoria de las fuentes, manteniendo únicamente la excitación aérea.

Las señales de entrada de los altavoces son las captadas en los dos micrófonos colocados en el exterior del habitáculo (M5 y M6), en las medidas con el autocar parado y el motor a 1400 rpm. Los dos altavoces se han colocado en el compartimento motor próximos a las posiciones de M5 y de M6, ver en la Figura 3 designados como AL1 y AL2, y se han orientado hacia el interior tal y como se aprecia en la Figura 4.

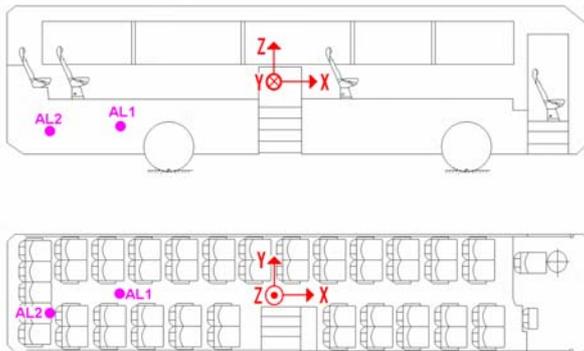


Figura 3 – Posición de los altavoces.



Figura 4 –Altavoz AL1.

### 3 Resultados

#### 3.1.1 Pantallas

Los resultados de las medidas con pantallas cubriendo el motor, muestran que la pantalla no sirve para reducir el nivel de ruido en el interior del habitáculo. En la Figura 5 se pueden comparar los espectros del micrófono M4 sin pantallas y con pantallas a 1400 rpm, con el autocar en parado.

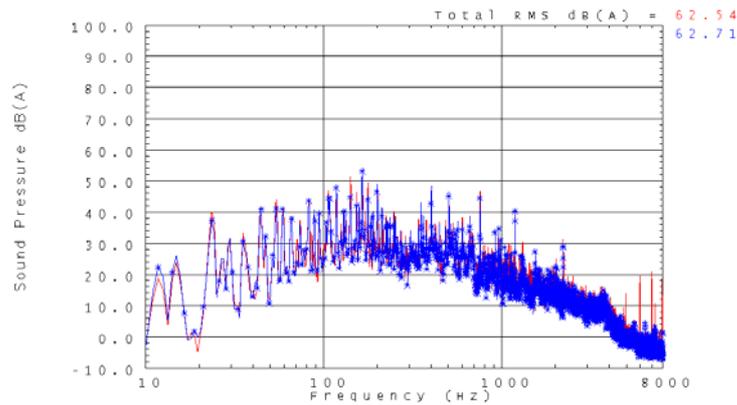


Figura 5 – Ruido en M4 a 1400 rpm sin pantallas (-) y con pantallas (-\*-).

Respecto al apantallamiento del grupo de transmisión los resultados de las medidas realizadas a 50 y 100 km/h muestran que la atenuación que introducen las pantallas es mínima. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se aprecia el ruido que capta M4, sin y con pantallas a velocidad constante de 100 km/h.

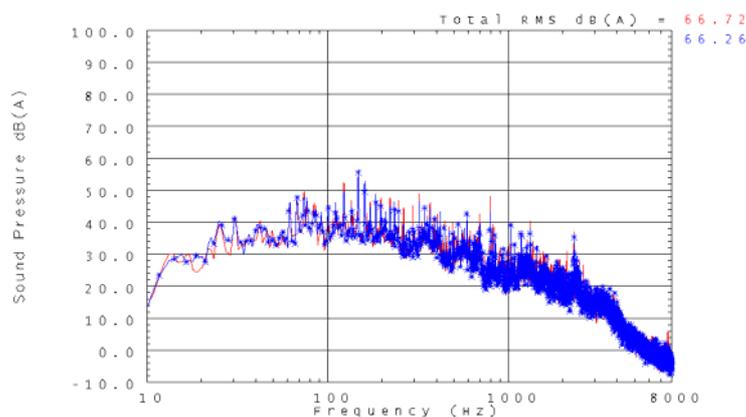


Figura 6 – Ruido en M4 a 100 km/h sin pantallas (-) y con pantallas (-\*-).

De estas medidas se concluye que el apantallamiento de las principales fuentes vibroacústicas como el motor o el grupo de transmisión no sirve para disminuir el nivel de ruido percibido por el usuario en el interior del autocar.

### 3.1.2 Altavoces

La simulación de la medida a 1400 rpm, con altavoces tiene como objetivo evaluar la contribución al ruido interior de la transmisión aérea del motor. Para ello, a partir de las señales temporales de los dos micrófonos del exterior (M5 y M6) de la medida a 1400 rpm de la caracterización vibroacústica se han generado los archivos “.wav”, para después reproducirlos con los altavoces. Para que estos altavoces puedan emitir un ruido similar al de las fuentes reales se ha ajustado el volumen del amplificador a un nivel similar al captado por M6.

Cabe mencionar que la simulación ha tenido algunas limitaciones, ya que los altavoces no pueden reproducir con exactitud el espectro de M6 en todo el rango de frecuencias requerido, siendo la limitación mayor a bajas y altas frecuencias. Además, ambos altavoces reproducen la misma señal con el mismo nivel ya que únicamente se ha dispuesto de un único amplificador.

En estas medidas no hay ninguna fuente de vibración en funcionamiento, por lo que todas las vibraciones registradas son producidas por excitación aérea. Con las señales grabadas, se ha realizado una comparación entre las medidas con el motor en funcionamiento a 1400 rpm y la medida con altavoces.

A causa de las limitaciones mencionadas, el ruido captado próximo a la caja de cambios (M5) ha sido 15 dBA superior al real en la medida con altavoces, Figura 8.a. Eso se debe principalmente al alto nivel a medias y altas frecuencias. En cambio en el compartimiento motor (M6), el ruido emitido por los altavoces ha sido inferior en los extremos de la banda, tal y como se aprecia en la Figura 8.b.

Dadas estas limitaciones, a continuación se presenta un análisis cualitativo de los resultados obtenidos en estos ensayos.

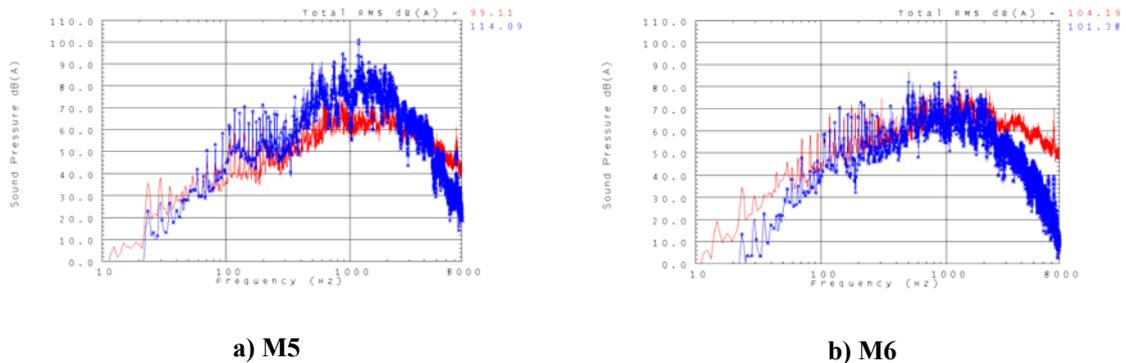


Figura 8 – Ruido a 1400 rpm en funcionamiento (-) y reproducido por los altavoces (-\*-).

En cuanto al ruido registrado en el interior del habitáculo, el nivel total es similar, aunque los espectros sean muy diferentes, tal y como se aprecia en la Figura 9. Con altavoces, el ruido por debajo de 100 Hz es prácticamente nulo, y además los máximos entre 100 y 200 Hz, son 10 dBA inferiores a los de la señal de referencia. En cambio, por encima de 350 Hz los altavoces introducen máximos importantes que no se observan a 1400 rpm.

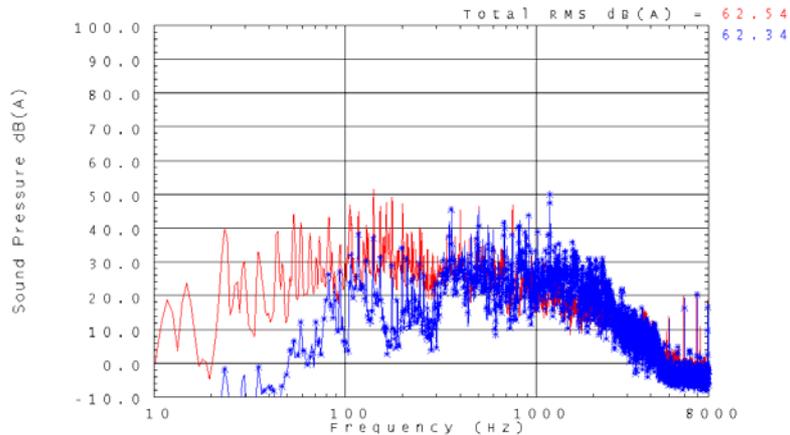


Figura 9 – Ruido en el interior a 1400 rpm en funcionamiento (-) y reproducido por los altavoces (-\*-).

En el ensayo con los altavoces se elimina toda excitación vibratoria, así que todas las vibraciones registradas en diferentes paneles se deben a la excitación aérea. Como se aprecia en la Figura 10, las vibraciones del suelo del pasillo se concentran entre 500 y 1200 Hz, en cambio a bajas frecuencias el nivel vibratorio es prácticamente nulo.

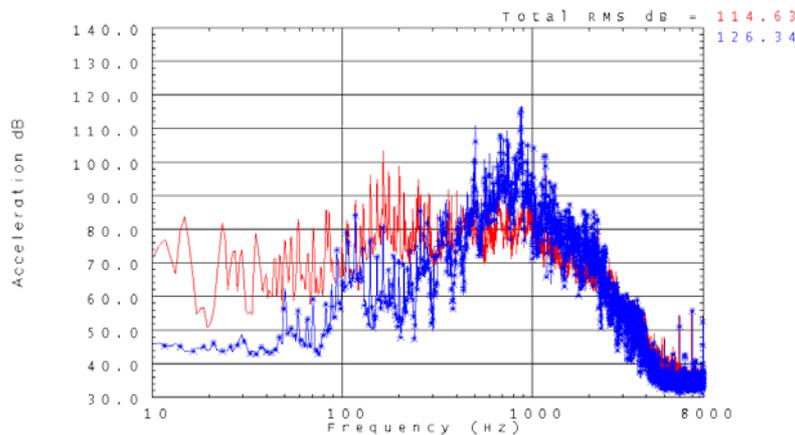


Figura 10 – Vibraciones en el suelo del pasillo (A11) a 1400 rpm en funcionamiento (-) y reproducido por los altavoces (-\*-).

## 4 Conclusiones

La colocación de las pantallas no ha reducido significativamente ni el nivel de ruido en el interior del autocar, y ni el nivel de las vibraciones en diferentes paneles. Por lo que se concluye que la transmisión aérea de ruido no es la causa principal del ruido en el interior del autocar.

Las medidas con los altavoces han demostrado que la transmisión aérea de ruido no provoca máximos importantes de ruido y vibraciones por debajo de los 350 Hz. Por tanto el ruido en el interior a bajas frecuencias, se debe a la transmisión estructural de las vibraciones generadas por las fuentes.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el proyecto UE-2007-5 financiado por el Gobierno Vasco y por el proyecto TRA-2007-61780/A financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia en el programa Investigación Científica.

## Referencias

- [1] Lee, S.K. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration. *Journal of Sound and Vibration*, v 310, 2008, p 149-168
- [2] Batel, B.;Hald, J. Source/Path contribution analysis of automotive airborne sources. *Proceedings of the 2004 International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA*, Leuven, September 20-22 2004, p 2881-2894.
- [3] Liang, X.Y.; Shu, G.Q. Study of diesel engine noise source identification. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, v 26, 2005, p 67-71.
- [4] Jia, J.D.; Wang, Y.L.; Li, J.X. Noise source identification and noise control of the bus. *Journal of Vibration and Shock*, v 27, 2008, p 161-164.
- [5] Berasategi, J.; Galfarsoro, U.; Elejabarrieta, M.J.; Insausti, I. Structure borne noise inside a coach. *Acoustics '08*, Paris, 29 de Junio a 4 de Julio de 2008.
- [6] ISO 5128: Measurement of noise inside motor vehicles, 1980 (E).