

# Cómo predecir el exceso de ruido en vehículos de alta velocidad

Begoña Mateo Martínez<sup>1</sup>, Nicolás Palomares Olivares<sup>1</sup>, Pedro Huertas Leyva<sup>1</sup>, José S. Solaz Sanahuja<sup>1</sup>, Elisa Signes i Perez<sup>1</sup>, Oriol Gibert Escofet<sup>2</sup>, Joan Sapena Fernández<sup>2</sup>, José Ramón Ruiz Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INSTITUTO DE BIOMECÁNICA DE VALENCIA

<sup>2</sup> ALSTOM TRANSPORT

La percepción acústica es considerada uno de los factores de mayor importancia en la valoración del confort en vehículos de alta velocidad.

El estudio que presentamos se enmarca en un proyecto de investigación desarrollado por ALSTOM Transport y el Instituto de Biomecánica (IBV) con el objetivo de generar un modelo de predicción del disconfort acústico del sonido interior de coches de pasajeros en vehículos de alta velocidad.

## Development of a prediction model of acoustic discomfort in high-speed train passenger cars

Acoustic perception is considered as one of the most important factors in the comfort assessment in high-speed vehicles.

The present study is focused in a research project developed by ALSTOM Transport and the Instituto de Biomecánica (IBV) with the objective of generating a prediction model of interior noise acoustic discomfort in high-speed train passenger cars.

## INTRODUCCIÓN

La percepción acústica del pasajero ha sido estudiada por numerosos autores en el ámbito de la calidad sonora, ya que se considera uno de los factores de mayor importancia en la valoración del confort en un vehículo de alta velocidad. En el sector ferroviario, los operadores evalúan en la actualidad el confort acústico del pasajero a través del parámetro tradicional denominado nivel de presión sonora ponderado en A. Sin embargo, estudios recientes apuntan que esta visión es insuficiente y podría mejorarse mediante la aplicación de la psicoacústica (estudio de la percepción humana de los sonidos).

Por este motivo, surge la necesidad de desarrollar un proyecto de investigación con el objetivo de generar un modelo de predicción del disconfort acústico en vehículos ferroviarios de alta velocidad utilizando parámetros psicoacústicos. El modelo incluye parámetros sonoros obtenidos a partir de sonidos grabados en distintas áreas de pasajeros en el tren (caracterizando acústicamente todo el vehículo) y la evaluación subjetiva del confort acústico mediante ensayos con usuarios (*jury test*).

## DESARROLLO

### Plan de trabajo

El estudio ha consistido en el desarrollo de las tareas mostradas en la figura 1. En primer lugar se llevó a cabo una revisión en detalle de los últimos avances en la interpretación de los parámetros psicoacústicos. A continuación para caracterizar acústicamente el sonido en el

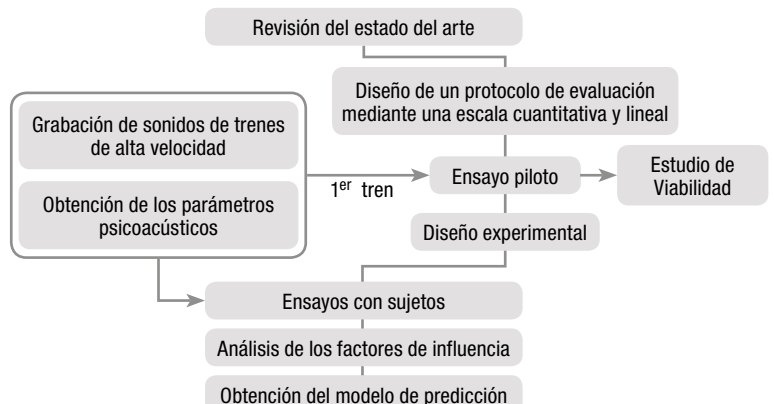


Figura 1. Etapas del estudio.

> interior del tren, se efectuaron registros sonoros en distintos vehículos de alta velocidad. Posteriormente, tras la validación del procedimiento de evaluación subjetiva de los sonidos mediante un ensayo piloto, se realizó el *jury test* con todos los sonidos obtenidos. Por último, mediante tratamiento estadístico, se estudió la relación entre los parámetros objetivos obtenidos y la evaluación subjetiva obtenida en el *jury test*. Con ello se obtuvo un modelo de predicción que calcula el nivel de confort de los pasajeros a partir de parámetros psicoacústicos.

### Medidas en campo

Los sonidos fueron grabados en seis modelos de tren de alta velocidad, de diferentes fabricantes de material rodante, mientras recorrían líneas de alta velocidad a velocidades comerciales. Para caracterizar en conjunto el sonido del interior del vehículo, las mediciones se realizaron en distintas posiciones en cada coche y en coches específicos dentro de la composición que constituyen los trenes.

Con la finalidad de reproducir de una manera realista el sonido interior de los vehículos ferroviarios en laboratorio, las medidas de campo se realizaron con un equipo de HEAD Acoustics constituido por una cabeza artificial y un *software* de grabación asociado (Figura 2). Esta cabeza artificial se encuentra específicamente diseñada para la investigación de la calidad sonora, permitiendo la grabación de sonidos de forma binaural así como la escucha posterior de los sonidos grabados en un laboratorio. De esta manera, los participantes en el *jury test* no requieren estar presentes en los vehículos para tener una impresión acústica del sonido generado por los trenes.



Figura 2. Cabeza artificial situada en el coche de pasajeros.

### Caracterización sonora

Para representar de forma objetiva los sonidos registrados, se obtuvo el parámetro denominado nivel de presión sonora ponderado en A, y los siguientes parámetros psicoacústicos: *loudness* (intensidad sonora), *sharpness* (nitidez, agudeza), *roughness* (aspereza, rugosidad), *fluctuation strength* (fluctuación) y *tonality* (tonalidad). Los parámetros fueron

calculados mediante el programa Analysis System ArtemiS de HEAD Acoustics (Figura 3).

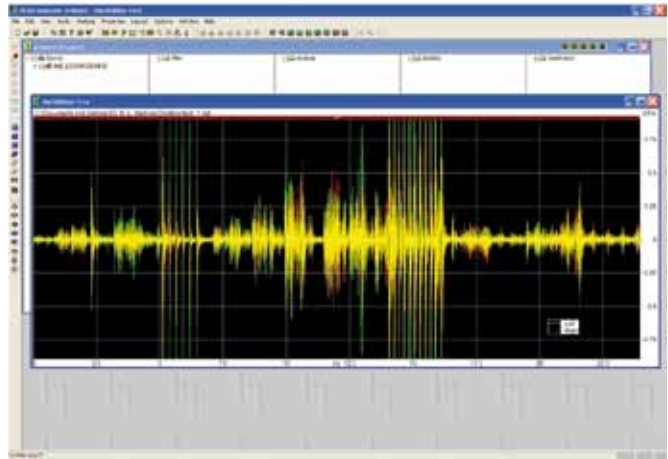


Figura 3. Cálculo de los principales parámetros psicoacústicos.

### Jury test

El equipo de reproducción consistía en un sistema de auriculares conectados a un ecualizador PEQ V de Head Acoustics. Este equipo se utilizó para reproducir con precisión grabaciones binaurales, haciendo posible que los oyentes tuvieran una impresión acústica realista similar a la que obtendrían si estuvieran dentro del tren.

El procedimiento, establecido previamente en un ensayo piloto, se basaba en la evaluación de los sonidos por parte de usuarios frecuentes de vehículos ferroviarios. La evaluación de molestias consistía en la valoración de los sonidos en una escala continua desde "0 = no molesto" a "10 = muy molesto", utilizando como ayuda sonidos de referencia en los extremos de la escala (sonidos extremos del parámetro *loudness*).

Utilizando una pizarra magnética e imanes de identificación (marcadores) de cada sonido a evaluar, los sujetos los clasificaron en una escala de molestias (Figura 4).



Figura 4. Evaluación de sonidos en una pizarra magnética.

Los participantes del estudio realizaron los ensayos en una sala silenciosa para no ser molestados por otros sonidos externos. Se sentaron en una butaca de un vehículo de alta velocidad para simular la percepción de estar viajando en un tren, recreando una atmosfera similar al lugar donde se registraron las grabaciones (Figura 5).

Para el *jury test* se grabaron un total de 50 sonidos, efectuándose ocho valoraciones para cada uno de los sonidos. Por tanto, el *jury test* permitió obtener 400 evaluaciones subjetivas de sonidos de tren.



Figura 5. Participantes durante una sesión.

## RESULTADOS

El objetivo del modelo fue la predicción de la valoración de molestia de cada sonido, utilizando los parámetros psicoacústicos como predictores. Estos predictores potenciales fueron los percentiles 5, 50, 95 y los rangos (percentil 95 - percentil 5) del nivel de presión sonora ponderado en A, *loudness*, *sharpness* y *roughness* (los parámetros *fluctuation strength* y *tonality* fueron excluidos por la ausencia de valores relevantes). La variable resultado fue el valor medio de la evaluación sonora obtenida en los *jury tests*. Después de una exploración de los datos, se seleccionó como más adecuada la técnica de regresión múltiple para calcular el modelo.

El modelo obtenido utiliza como variables predictoras el parámetro nivel de presión ponderado en A (percentil 95) y el parámetro *sharpness* (percentil 5). El modelo obtenido utilizando los parámetros psicoacústicos presenta un alto ajuste (0.90  $R^2$  ajustado), incrementando un 25% la predicción del nivel de molestia en caso de que se hubieran

utilizado únicamente parámetros acústicos tradicionales (0.65  $R^2$  ajustado). Esta mejora puede observarse en la **figura 6** donde se muestra el modelo obtenido con la inclusión de los parámetros psicoacústicos (izquierda) y el modelo predicho a partir de modelos acústicos tradicionales (derecha).

## CONCLUSIONES

El modelo obtenido puede predecir con precisión el discomfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad en condiciones reales. Los resultados indican el incremento de precisión del modelo cuando se incorporan los parámetros psicoacústicos a un modelo obtenido únicamente con parámetros acústicos tradicionales.

La mejora en las posibilidades de aplicación y realismo respecto de otros estudios reside básicamente en la variedad de trenes de alta velocidad utilizados, su completa caracterización por posiciones diferentes de medida dentro del tren y el

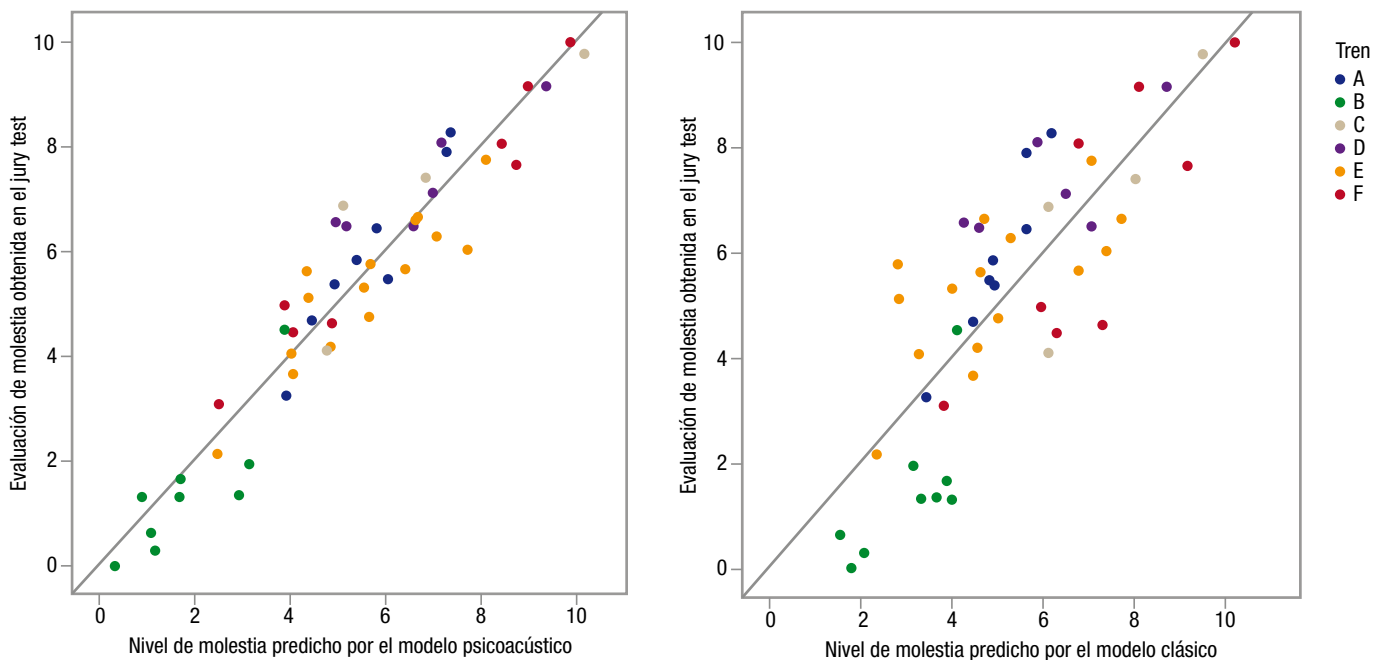


Figura 6. Comparación del modelo con parámetros psicoacústicos (izquierda) y parámetros acústicos tradicionales (derecha).

- > realismo de las condiciones de medida. Todos los sonidos han sido grabados en sus velocidades comerciales respectivas sin alteraciones por medio de programas de edición de sonidos, siendo representativos del sonido al que está sometido un pasajero en condiciones reales.

Este estudio permitirá a ALSTOM Transport aplicar los principales resultados en el diseño del futuro material rodante para garantizar un confort acústico óptimo en trenes de alta velocidad, considerándose un factor clave en la satisfacción de los pasajeros. ●

---

#### AGRADECIMIENTOS

A RENFE OPERADORA que permitió el acceso al material rodante para la realización de las medidas en los vehículos.