



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Física Aplicada

**Aproximación metodológica a la
obtención de modelos de percepción de
molestias a partir de parámetros
psicoacústicos en vehículos ferroviarios.
Aplicación a trenes de alta velocidad.**

Tesis doctoral

Autora: Begoña Mateo Martínez

Director: Dr. Antonio Uris Martínez

Dra. Rosa Porcar Seder

Dr. José S. Solaz Sanahuja

Valencia, Diciembre de 2015

A mi madre

Agradecimientos

A mis directores de tesis por su guía, asesoramiento, apoyo y confianza durante el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto de Biomecánica de Valencia y a todos mis compañeros que me han acompañado profesional y personalmente durante todos estos años.

A mis compañeros que han contribuido a este trabajo, en especial, a Nicolás, Pedro, Elisa y José.

Mi agradecimiento también a ALSTOM Transport por impulsar este proyecto y su apoyo técnico y a RENFE OPERADORA que permitió el acceso al material rodante para la realización de las medidas en los vehículos.

A Pablo por allanar el camino y por su apoyo imprescindible durante estos meses, gracias.

A Hernán, su alegría me proporciona la ilusión e impulso necesarios.

A mi familia y a la de Pablo por ayudarnos a encontrar el tiempo y apoyarnos en nuestros proyectos.

A mis padres, que me proporcionaron los cimientos sobre los que construir y llegar hasta aquí.

Resumen

El confort a bordo es, hoy en día, uno de los motivos clave de la elección del medio de transporte. Por tanto, ofrecer una mayor comodidad es una ventaja competitiva a la hora de presentar una oferta diferenciada ante otros modos de movilidad y ante la competencia que aparecerá con la liberalización del transporte de viajeros por ferrocarril.

El ruido es clave como factor que influye en el confort del pasajero. Por ello, a finales de los años noventa, comienzan a aparecer los primeros estudios relevantes sobre confort acústico de vehículos de alta velocidad. Aunque la mayor parte de los estudios se centran principalmente en la caracterización física, se han realizado algunos avances en intentar relacionar el ruido interior con el confort del pasajero.

El objetivo principal de la presente investigación es realizar una aproximación metodológica a la obtención de un modelo psicoacústico que permita predecir el nivel de molestias de los pasajeros en condiciones de circulación comerciales, así como realizar una comparativa de diferentes vehículos ferroviarios de alta velocidad en cuanto a su calidad sonora.

Con este objetivo, ha sido necesaria la definición una metodología experimental para la obtención de parámetros objetivos del ruido de fondo así como de medidas subjetivas de la percepción del pasajero.

En concreto, para el cálculo de medidas objetivas, se ha definido un procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial que permita la caracterización psicoacústica para su comparativa. El estudio de campo realizado ha permitido identificar las variables psicoacústicas que mejor describen el ruido de fondo y conocer como varían en función de su localización dentro del vehículo.

Para la medida de la percepción se ha definido una metodología de evaluación del nivel de molestia de los sonidos representativa de la percepción del pasajero. Esta metodología ha sido validada como resultado del estudio, obteniendo una elevada fiabilidad en la medida del nivel de molestia.

La metodología experimental ha sido aplicada en un estudio de campo donde se registró el sonido en el interior de seis vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial. El estudio de campo permitió registrar cuarenta y seis sonidos que posteriormente fueron valorados por pasajeros en cuanto a su nivel de molestia.

Con el objetivo de obtener un modelo de predicción del nivel de molestia, las variables psicoacústicas: nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness* de los sonidos registrados fueron analizadas junto con el nivel de molestia percibido mediante un análisis de regresión lineal múltiple. El modelo obtenido presenta una capacidad de predicción del 90,8%.

Adicionalmente, se realizó una comparativa de los vehículos que formaron parte del estudio de campo en cuanto a su nivel de molestia y su caracterización psicoacústica.

Resum

El confort a bord, és, hui en dia, un dels motius clau de l'elecció del mitjà de transport. Per tant, oferir una major comoditat és un avantatge competitiu a l'hora de presentar una oferta diferenciada front a altres modes de mobilitat i davant la competència que apareixerà amb la liberalització del transport de viatgers per ferrocarril.

El soroll és clau com a factor que influeix en el confort del passatger. Per això, a finals dels anys noranta, comencen a aparèixer els primers estudis rellevants sobre confort acústic de vehicles d'alta velocitat. Encara que la major part dels estudis es centren principalment en la caracterització física, s'han realitzat alguns avanços en intentar relacionar el soroll interior amb el confort del passatger.

L'objectiu principal de la present recerca és realitzar una aproximació metodològica a l'obtenció d'un model psicoacústic que permeta predir el nivell de molèsties dels passatgers en condicions de circulació comercials, així com realitzar una comparativa de diferents vehicles ferroviaris d'alta velocitat en quant a la seua qualitat sonora.

Amb aquest objectiu, ha sigut necessària la definició d'una metodologia experimental per a l'obtenció de paràmetres objectius del soroll de fons, així com les mesures subjectives de la percepció del passatger.

En concret, per al càlcul de mesures objectives, s'ha definit un procediment de mesura del soroll a l'interior de vehicles d'alta velocitat circulant a velocitat comercial que permeta la caracterització psicoacústica per a la seua comparativa. L'estudi de camp realitzat a permès identificar les variables psicoacústiques que millor descriuen el soroll de fons i conèixer com varien en funció de la seua localització dins del vehicle.

Per a la mesura de la percepció s'ha definit una metodologia d'avaluació del nivell de molèstia dels sons representativa de la percepció del passatger. Aquesta metodologia ha sigut validada com resultat de l'estudi, obtenint una elevada fiabilitat en la mesura del nivell de molèstia.

La metodologia experimental ha sigut aplicada en un estudi de camp on es registrà el so a l'interior de sis vehicles d'alta velocitat circulant a velocitat comercial. L'estudi de camp va permetre enregistrar quaranta sis sons que posteriorment foren valorats per passatgers en quant al seu nivell de molèstia.

Amb l'objectiu d'obtindre un model de predicció del nivell de molèstia, les variables psicoacústiques nivell de pressió sonora ponderat A, *loudness*, *sharpness* i *roughness* dels sons enregistrats foren analitzades junt amb el nivell de molèstia percebut mitjançant una anàlisi de regressió lineal múltiple. El model obtingut presenta una capacitat de predicció del 90,8%.

Addicionalment, es va realitzar una comparativa dels vehicles que formaren part de l'estudi de camp en quant al seu nivell de molèstia i la seua caracterització psicoacústica.

Summary

Comfort on board is, nowadays, one of the main reasons for the choice of transport means. Therefore, offering greater comfort is an advantage against other modes of mobility and the competition brought about by liberalization of rail passenger transport.

Noise is a key factor influencing passenger comfort. Therefore, in the late nineties, the first relevant acoustic comfort studies about high-speed vehicles began to appear. Although most studies focus mainly on the physical characterization, they have made some progress on trying to relate the interior noise and the passenger comfort.

The main objective of this research is to conduct a methodological approach to obtaining a psychoacoustic model, in order to predict the level of discomfort of passengers in conditions of commercial circulation, and make a comparison between different high-speed rail vehicles in terms of sound quality.

For this purpose, it was necessary to define an experimental methodology to obtain objective parameters of the background noise, as well as subjective measures of perception.

In particular, for the calculation of objective measures, this study develops a procedure to measure sound inside high-speed vehicles traveling at commercial speed, that allows their psychoacoustical comparison. The field study has identified the psychoacoustic variables that best describe the background noise, and how they vary according to their location within the vehicle.

To measure the perception, a methodology to assess the level of annoyance of representative sounds has been defined. This methodology has been validated as a result of the study, obtaining a high reliability in the measurement of discomfort levels.

The experimental methodology was applied in a field study, where the sound within six high-speed vehicles traveling at commercial speed was recorded. That field study allowed to record forty-six sounds that were subsequently measured in their level of discomfort by passengers.

In order to obtain a model to predict the level of annoyance, different psychoacoustic variables were analyzed: A weighted pressure level, *loudness*, *sharpness* and *roughness* of the sounds, along with the level of annoyance perceived by multiple linear regression. The model obtained has a predictive capacity of 90.8%.

Moreover, the research includes a comparison of the level of discomfort and a psychoacoustic characterization of the vehicles that were part of the field study.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN.....	29
1.1. Introducción. Antecedentes.....	31
1.1.1. Relevancia del confort acústico en vehículos ferroviarios	31
1.1.2. Origen de la investigación	34
1.2. Estructura del trabajo.....	34
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1. Introducción.....	39
2.2. Introducción a la calidad sonora	40
2.2.1. Parámetros de medida del sonido	41
2.2.2. Definición de calidad sonora	48
2.3. Caracterización sonora en el interior de los vehículos ferroviarios	51
2.3.1. Fuentes sonoras en los vehículos.....	51
2.3.2. Caracterización del ruido interior	54
2.3.3. Condiciones de medida de los vehículos	57
2.3.4. Posición de las mediciones dentro del vehículo	58
2.3.5. Instrumentación para registro de sonidos	59
2.4. Evaluación de la percepción subjetiva del sonido: <i>jury test</i>.....	61
2.4.1. Métodos utilizados en <i>jury test</i>	61
2.4.1.1. Métodos de evaluación directa	61
2.4.1.1.1. Métodos de valoración escalada (response (rating) scales)	62
2.4.1.1.2. Métodos de free magnitude estimation	63
2.4.1.1.3. Métodos de escalas semánticas.....	64
2.4.1.1.4. Métodos de semántica diferencial.....	65
2.4.1.2. Métodos de comparaciones por pares.....	66
2.4.1.3. Método de ordenación en rango.....	68
2.4.2. Selección de los atributos a evaluar.....	68
2.4.3. Selección de los evaluadores	69
2.4.3.1. Perfil de los evaluadores participantes en <i>jury test</i>	69

2.4.3.2. Número de evaluadores participantes.....	70
2.4.4. Recomendaciones sobre la duración del test, número y presentación de estímulos	70
2.4.5. Entornos y equipos de escucha.....	71
2.5. Estado del arte en calidad sonora de vehículos ferroviarios de alta velocidad	74
2.5.1. Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: integration of subjective parameters (Letourneaux <i>et al.</i> , 2000).....	75
2.5.2. Noise assessment in a high-speed train (Pariziet <i>et al.</i> , 2002)	78
2.5.3. Psychoacoustical indicators of acoustical comfort inside trains for background noise and emergent signals (Boullet <i>et al.</i> , 2007).....	83
2.5.4. Acoustic comfort indicator for the assessment of interior noise in Korean high-speed trains (Choi <i>et al.</i> , 2011)	86
2.5.5. Sound quality subjective evaluation analysis of noise inside high-speed trains (Zhang <i>et al.</i> , 2012).....	89
2.5.6. Sound quality evaluation analysis on the interior noise of high-speed train (Yang <i>et al.</i> , 2014)	90
2.5.7. Conclusiones sobre el estado del arte en modelos psicoacústicos para vehículos de alta velocidad	92
2.6. Conclusiones	96
3. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO.....	99
3.1. Introducción.....	101
3.2. Objetivos	101
3.3. Plan de trabajo	103
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	109
4.1. Introducción.....	111
4.2. Planteamiento metodológico.....	111
4.3. Definición inicial de la metodología	113
4.3.1. Procedimiento inicial de medida de un vehículo de alta velocidad para su caracterización psicoacústica	113
4.3.1.1. Introducción	113
4.3.1.2. Definición de alta velocidad.....	114
4.3.1.2.1. Definición de alta velocidad en el presente estudio.....	115

4.3.1.2.2.	Vehículos de alta velocidad en España.....	116
4.3.1.3.	Condiciones experimentales del estudio de campo. Consideraciones.....	117
4.3.1.4.	Factores de influencia en nivel de ruido	118
4.3.1.5.	Control de los factores de influencia	122
4.3.1.6.	Definición inicial de las condiciones de medida de cada vehículo	124
4.3.1.7.	Distribución inicial de los puntos de registro en el interior de los vehículos	125
4.3.2.	Metodología inicial de evaluación subjetiva del nivel de molestia	128
4.3.2.1.	Introducción.....	128
4.3.2.2.	Construcción de una escala de referencia para el nivel de molestia . ..	128
4.3.2.3.	Definición del proceso de medida principal. Nivel de molestia .	131
4.3.2.3.1.	Entorno de escucha.....	131
4.3.2.3.2.	Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia	133
4.3.2.4.	Selección de los evaluadores	135
4.3.2.5.	Definición del test de semántica diferencial. Otros procesos de medida	136
4.3.3.	Definición inicial del procesado de la información	138
4.3.3.1.	Caracterización psicoacústica del sonido.....	139
4.3.3.2.	Estimador del nivel de molestia.....	140
4.3.3.3.	Comparativa entre vehículos	140
4.3.3.4.	Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia.....	141
4.3.4.	Conclusiones	143
4.4.	Materiales y métodos del estudio piloto	146
4.4.1.	Objetivos e introducción al estudio piloto	146
4.4.2.	Estudio de campo para la caracterización de un vehículo de alta velocidad . ..	147
4.4.2.1.	Vehículo analizado y recorrido.....	147
4.4.2.2.	Instrumentación y condiciones de medida establecidas.....	147
4.4.2.3.	Selección de los puntos de medida objetivo	148

4.4.2.4.	Sonidos validados para su utilización en la fase de evaluación subjetiva	149
4.4.3.	Estudio de evaluación subjetiva	151
4.4.3.1.	Evaluación subjetiva del nivel de molestia.....	151
4.4.3.2.	Evaluación mediante semántica diferencial.....	151
4.4.3.3.	Valoración del protocolo	151
4.4.3.4.	Evaluación de la fiabilidad del evaluador.....	151
4.4.3.5.	Sujetos de participantes en la valoración.....	152
4.4.4.	Procesado de datos en el estudio piloto.....	152
4.4.4.1.	Validación de los sonidos registrados. Número de sonidos validados	153
4.4.4.2.	Caracterización psicoacústica de los sonidos validados	153
4.4.4.3.	Estimador del nivel de molestia de los sonidos validados y clasificación.....	153
4.4.4.4.	Análisis para la definición del procedimiento de medida de un vehículo	154
4.4.4.4.1.	Validación y exploratorio de la caracterización psicoacústica del sonido	154
4.4.4.4.2.	Influencia de la disminución de la velocidad comercial	154
4.4.4.4.3.	Elaboración de hipótesis para la distribución de los puntos de registro dentro del vehículo	154
4.4.4.5.	Análisis para la definición de la metodología de la evaluación subjetiva	155
4.4.4.5.1.	Validación de la medida de nivel de molestia	155
4.4.4.5.2.	Evaluación de la fiabilidad del evaluador y repetibilidad de la evaluación intrasujeto	156
4.4.4.5.3.	Determinación del número necesario de evaluaciones de cada sonido. Calculo del tamaño de muestra	156
4.4.4.5.4.	Exploración de los atributos utilizados en semántica diferencial	156
4.4.4.5.5.	Valoración del protocolo	157
4.5.	Definición final de la metodología.....	157
4.5.1.	Procedimiento final de medida de un vehículo de alta velocidad para su caracterización psicoacústica	157
4.5.1.1.	Introducción	157

4.5.1.2.	Definición final de las condiciones de medida de los vehículos.	158
4.5.1.3.	Distribución final de los puntos de registro en el interior de los vehículos	159
4.5.2.	Metodología final de evaluación subjetiva del nivel de molestia	161
4.5.2.1.	Introducción.....	161
4.5.2.2.	Definición del proceso de medida principal. Nivel de molestia .	162
4.5.2.3.	Selección de los evaluadores	163
4.5.2.4.	Definición del test de semántica diferencial. Otros procesos de medida	163
4.5.3.	Procesado de la información.....	164
4.5.3.1.	Introducción.....	164
4.5.3.2.	Caracterización psicoacústica del sonido.....	165
4.5.3.3.	Estimador del nivel de molestia.....	165
4.5.3.4.	Comparativa entre vehículos	165
4.5.3.5.	Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia.....	166
4.5.4.	Conclusiones	166
4.6.	Definición del estudio completo	170
4.6.1.	Objetivos del estudio completo	170
4.6.2.	Estudio de campo para la caracterización de los vehículos de alta velocidad	170
4.6.2.1.	Vehículos analizados y recorridos	170
4.6.2.2.	Sonidos validados para la base de datos	172
4.6.3.	Estudio de evaluación subjetiva	172
4.6.3.1.	Evaluación subjetiva del nivel de molestia	172
4.6.3.2.	Evaluación mediante semántica diferencial	174
4.6.3.3.	Sujetos participantes	174
4.6.4.	Procesado de datos en el estudio completo.....	174
4.6.4.1.	Caracterización psicoacústica de los sonidos de la base de datos y validación	176
4.6.4.2.	Estimador del nivel de molestia de los sonidos de la base de datos..	176
4.6.4.3.	Evaluación del control de los factores de influencia en el ruido interior	177

4.6.4.4.	Validación de la medida del nivel de molestia	177
4.6.4.4.1.	Exploratorio de los atributos para su aplicación en semántica diferencial	178
4.6.4.5.	Comparativa entre vehículos	178
4.6.4.6.	Obtención de un modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia	179
4.6.4.6.1.	Aproximación a la validación del modelo	181
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	183
5.1.	Introducción.....	185
5.2.	Resultados del estudio piloto	185
5.2.1.	Introducción a los resultados del estudio piloto	185
5.2.2.	Validación de los sonidos registrados. Número de sonidos registrados ..	186
5.2.3.	Estimador del nivel de molestia de los sonidos validados y clasificación.....	187
5.2.4.	Resultados para la definición del procedimiento de medida de un vehículo.	189
5.2.4.1.	Exploratorio y validación de la caracterización psicoacústica del sonido.	189
5.2.4.2.	Influencia de la disminución de la velocidad comercial.....	191
5.2.4.2.1.	Elaboración de hipótesis para la distribución de los puntos de registro dentro del vehículo	195
5.2.5.	Resultados para la definición la metodología de la evaluación subjetiva	198
5.2.5.1.	Validación de la escala para la medida de nivel de molestia.....	198
5.2.5.2.	Evaluación de la fiabilidad del evaluador y repetibilidad de la evaluación intrasujeto.....	199
5.2.5.3.	Determinación del número necesario de evaluaciones de cada sonido. Calculo del tamaño de muestra	200
5.2.5.4.	Exploratorio de los atributos para su aplicación en semántica diferencial	201
5.2.5.4.1.	Análisis cuantitativo	201
5.2.5.4.2.	Análisis cualitativo	203
5.2.6.	Valoración del protocolo.....	204
5.3.	Resultados del estudio completo.....	206
5.3.1.	Introducción a los resultados del estudio completo.....	206

5.3.2. Exploratorio y validación de la caracterización psicoacústica del sonido	207
5.3.3. Validación de control de los factores de influencia en el ruido interior (distribución de las posiciones de medida dentro del vehículo)	209
5.3.4. Validación de la medida de nivel de molestia	210
5.3.4.1. Resultado del exploratorio de las escalas semánticas	212
5.3.5. Comparativa entre vehículos	213
5.3.6. Obtención de un modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia	219
5.3.6.1. Aproximación a la validación del modelo	227
5.4. Discusión	228
5.4.1. Procedimiento de medida para la caracterización psicoacústica de los vehículos y control de los factores que afectan al ruido interior	228
5.4.2. Metodología de evaluación subjetiva del nivel de molestia	233
5.4.3. Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia	236
5.4.4. Comparativa entre vehículos	239
6. CONCLUSIONES	243
6.1. Introducción	245
6.2. Conclusiones	245
6.3. Conclusiones sobre la metodología	245
6.4. Futuras líneas de trabajo	246
BIBLIOGRAFÍA	245
PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS	255

Índice de tablas

Tabla 2.1: Contribución de las fuentes de ruido en el ruido interior en porcentaje de nivel de presión sonora equivalente A ($L_{Aeq T}$) a 300km/h (izquierda) and 360km/h (derecha) (Poisson, Coste <i>et al.</i> ;2011).	54
Tabla 2.2: Eventos que provocan disconfort y su incremento respecto al valor promedio (sound/noise differential) y $L_{Aeq T}$ (Poisson, Dubois <i>et al.</i> , 2011)	57
Tabla 2.3: Recomendaciones del número de evaluadores	70
Tabla 2.4: Descripción de los estímulos sonoros utilizados por Choi <i>et al.</i> (2011)	87
Tabla 2.5: Coeficiente de correlación de los indicadores con el nivel de molestias y nivel de presión sonora ponderado A, n=6. (Choi <i>et al.</i> , 2011)	88
Tabla 2.6: Coeficiente de correlación con el nivel de ruido, n=8 (Choi, 2011)	88
Tabla 2.7: Correlación entre la valoración subjetiva y variables psicoacústicas, n=26 (Yang <i>et al.</i> , 2011)	92
Tabla 2.8: Variables analizadas para identificar el indicador primario de confort en vehículos de alta velocidad	94
Tabla 2.9: Variables analizadas para identificar el indicador secundario de confort en vehículos de alta velocidad	95
Tabla 4.1. Aspectos a definir y protocolizar en un <i>jury test</i> y comentarios (Rossi <i>et al.</i> , 2005)	112
Tabla 4.2: Vehículos de alta velocidad en España. Fuente RENFE (2015).	116
Tabla 4.3: Factores de influencia del ruido irradiado por la vía y valores incluidos en UNE-EN ISO 3381:2011	119
Tabla 4.4: Factores de influencia propios del vehículos	120
Tabla 4.5: Factores de influencia debido a las condiciones de circulación	121
Tabla 4.6: Factores de influencia debido a las fuentes de ruido interior	121
Tabla 4.7: Factores de influencia debido a la localización.....	122
Tabla 4.8: Control del efecto de los factores según las condiciones experimentales ...	123
Tabla 4.9: Escalas bipolares más utilizadas para la evaluación del sonido	137
Tabla 4.10: Estado de avance tras la definición inicial de la metodología de los aspectos de planteamiento metodológico	143
Tabla 4.11: Descripción de los puntos de medida objetivo.....	149

Tabla 4.12: Descripción de sonidos validados para ser valorados por los evaluadores y sonidos de referencia	150
Tabla 4.13: Hipótesis de los factores de influencia para la selección de los puntos de registro.....	159
Tabla 4.14: Localización de los puntos de registro en el interior de los vehículos.....	160
Tabla 4.15: Estado de avance tras la definición final de la metodología de los aspectos de planteamiento metodológico.....	167
Tabla 4.16: Características del vehículo TGV Duplex	171
Tabla 4.17: Vehículos caracterizados en el estudio de campo.....	171
Tabla 4.18: Sonidos validados de la base de datos (n=46)	172
Tabla 4.19: Caracterización psicoacústica de cada sonido	176
Tabla 4.20: Variables independientes potenciales para el modelo de regresión por pasos del nivel de molestia	179
Tabla 5.1: Estimación del nivel de molestia para cada sonido evaluado	187
Tabla 5.2: Descriptivo de las variables psicoacústicas de los sonidos validados.....	189
Tabla 5.3: Correlaciones entre variables psicoacústicas de los sonidos evaluados.....	190
Tabla 5.4: Correlación de las variables psicoacústicas con el nivel de molestias	191
Tabla 5.5: Caracterización psicoacústica de los sonidos evaluados.....	191
Tabla 5.6: Descriptivo de las variables psicoacústicas de los sonidos según la velocidad	192
Tabla 5.7: Media de la estimación de molestia de los sonidos según su velocidad	194
Tabla 5.8: Sonidos para explorar la influencia del factor ventana/pasillo	195
Tabla 5.9: Sonidos para explorar la influencia del factor bogie/centro	196
Tabla 5.10: Hipótesis de la influencia de la posición de medida	197
Tabla 5.11: Estadísticos descriptivos las valoraciones individuales del nivel de molestia	198
Tabla 5.12: Coef. correlación de Pearson de las valoraciones de cada evaluador en las diferentes sesiones consigo mismo y con la valoración promedio.....	199
Tabla 5.13: Tabla para el cálculo de la potencia ($\alpha=0,05$).....	201
Tabla 5.14: Coeficiente de correlación de Pearson entre las escalas semánticas y nivel de molestia (N=54)	202
Tabla 5.15: Matriz de comunalidades de las componentes principales	202
Tabla 5.16: Dificultades indicadas por los evaluadores en la comprensión de las escalas semánticas.....	203

Tabla 5.17: Descripción libre de cada sonido por parte de los evaluadores.....	204
Tabla 5.18: Descriptivo de la caracterización psicoacústica de los sonidos de la base de datos	207
Tabla 5.19: Correlaciones entre variables psicoacústicas de los sonidos de la base de datos (n=46)	208
Tabla 5.20: Correlaciones entre el nivel de molestia y las variables psicoacústicas	209
Tabla 5.21: Medias marginales de los niveles del factor LOCALIZACIÓN y diferencias	209
Tabla 5.22: Medias marginales de los niveles del factor COCHE	210
Tabla 5.23: Varianza explicada por los factores para cada una de las variables analizadas.....	210
Tabla 5.24: Estadísticos descriptivos de las valoraciones individuales del nivel de molestia	211
Tabla 5.25: Estadísticos descriptivos de las valoraciones medias por sonido del nivel de molestia	211
Tabla 5.26: Coeficiente de correlación de Pearson entre las escalas semánticas y nivel de molestia (N=176).....	212
Tabla 5.27: Matriz de comunalidades de las componentes principales	213
Tabla 5.28: Medias marginales y grupos homogéneos según el nivel de presión sonora ponderado A resultado del test post-hoc DHS Tukey-b.....	214
Tabla 5.29: Medias marginales y grupos homogéneos según el <i>loudness</i> resultado del test-post-hoc DHS Tukey-b.....	215
Tabla 5.30: Medias marginales y grupos homogéneos según el <i>sharpness</i> resultado del test post-hoc DHS Tukey-b	216
Tabla 5.31: Medias marginales y grupos homogéneos según el <i>roughness</i> resultado del test post-hoc DHS Tukey-b	217
Tabla 5.32: Medias marginales estimadas del nivel de molestia.....	218
Tabla 5.33: Descripción del modelo de regresión rechazado	219
Tabla 5.34: Descripción del modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia	221
Tabla 5.35: Resumen del modelo.....	221
Tabla 5.36: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov.....	225
Tabla 5.37: Comprobación de los indicios de colinealidad.....	226
Tabla 5.38: Valores de correlación con la calidad sonora percibida del nivel de presión sonora ponderado A y <i>loudness</i>	238

Índice de figuras

Figura 1.1: Mercado mundial de la industria ferroviaria por segmento de producto, billones de euros y tasa de crecimiento anual compuesto	32
Figura 2.1: Estructura del oído humano	40
Figura 2.2: Procedimiento de cálculo de la sonoridad basado en la norma ISO 532 B:1975.....	43
Figura 2.3: Curvas de isofónicas en phons.....	44
Figura 2.4: Curvas de ponderación en frecuencia (en abscisas escala logarítmica, en ordenadas en escala lineal).....	45
Figura 2.5: Ilustración del modelo de rugosidad (Fastl, 2005).....	47
Figura 2.6: Metodología del proceso de mejora de calidad acústica de un producto. Adaptación de (Genuit, 2004).....	49
Figura 2.7: Espectro típico de ruido interior en vehículos de alta velocidad. Gráfica adaptada de Patsouras <i>et al.</i> (2002).....	56
Figura 2.8: Relación entre <i>loudness</i> y el nivel de presión sonora ponderado A de dos vehículos. Gráfica adaptada de Choi <i>et al.</i> (2011)	56
Figura 2.9: Agrado y nivel de presión sonora ponderado A en las muestras evaluadas del estudio de Letourneaux <i>et al.</i> (2000).....	77
Figura 2.10: Representación de la preferencia frente a nivel de presión sonora ponderado A (Pariziet <i>et al.</i> , 2002).	79
Figura 2.11: Tendencia de la diferencia entre la preferencia de dos sonidos y su diferencia en el nivel de presión sonora ponderado A. Basado en los resultados de Pariziet <i>et al.</i> (2002).....	80
Figura 3.1: Relación entre los objetivos.....	102
Figura 3.2: Esquema del plan de trabajo y relación con los objetivos	104
Figura 4.1: Cabeza artificial HMS III	118
Figura 4.2: Propuesta de puntos de medida en un vehículo genérico.....	126
Figura 4.3: Sala de reproducción	131
Figura 4.4: Sistema de ecualizador PEQ V y auriculares dinámicos de Head Acoustics	132
Figura 4.5: Detalle de la escala visualizada	132
Figura 4.6: Visualización del cuestionario de evaluación semántica	138

Figura 4.7: Esquema de las fases del procesado de los datos resultado de la metodología	139
Figura 4.8: Colocación de la instrumentación durante la medida de un vehículo.....	148
Figura 4.9: Localización de los puntos de medida objetivo (Arriba: Coche de cabeza. Centro: Coche intermedio 1. Abajo: Coche intermedio 2)	148
Figura 4.10: Procesado de información del estudio piloto.....	152
Figura 4.11: Localización de los puntos de registro en el interior un vehículo.....	161
Figura 4.12: Visualización de los grupos según su nivel de <i>loudness</i> y <i>sharpness</i>	174
Figura 4.13: Procesado de información del estudio completo	175
Figura 5.1: Esquema de presentación de los resultados del estudio piloto	186
Figura 5.2: Clasificación de los sonidos según su nivel de molestia	188
Figura 5.3: P50 nivel de presión sonora en función de la velocidad.....	193
Figura 5.4: P50 <i>Loudness</i> en función de la velocidad.....	193
Figura 5.5: P50 <i>Roughness</i> en función de la velocidad	193
Figura 5.6: P50 <i>Sharpness</i> de los sonidos en función de la velocidad.....	194
Figura 5.7: Histograma de las valoraciones individuales del nivel de molestia (N=70)	198
Figura 5.8: Esquema de presentación de los resultados del estudio completo	206
Figura 5.9: Histograma del nivel de molestia (izq) valoraciones individuales N=352 (dcha) valoración media por sonido.....	211
Figura 5.10: Grupos de vehículos según su nivel de presión sonora ponderado A.....	214
Figura 5.11: Grupos de vehículos según su <i>loudness</i>	215
Figura 5.12: Grupos de vehículos según su <i>sharpness</i>	216
Figura 5.13: Grupos de vehículos según su <i>roughness</i>	217
Figura 5.14: Grupos de vehículos según su nivel de molestia	218
Figura 5.15: Valores de influencia de los sonidos del modelo rechazado	220
Figura 5.16: Diagrama de dispersión del percentil 5 <i>sharpness</i> frente al percentil 95 <i>sharpness</i>	220
Figura 5.17: Nivel de molestia observado frente al predicho	222
Figura 5.18: Valores de influencia de los sonidos del modelo	222
Figura 5.19: Diagrama de dispersión de los valores pronóstico tipificados y los valores tipificados del residuo de la regresión	223
Figura 5.20: Histograma de los residuos tipificados comparando con una distribución normal.....	224

Figura 5.21: Diagrama de probabilidad normal de los residuos tipificados	224
Figura 5.22: Diagramas de dispersión parcial entre el nivel de molestia y los residuos de las variables independientes del modelo.	225
Figura 5.23: Diagrama de dispersión del residuo eliminado y el residuo del modelo completo.....	227
Figura 5.24: Diagrama de dispersión de <i>loudness</i> frente al nivel de presión sonora ponderado A de los sonidos de la base de datos (n=46).....	231
Figura 5.25: Diagrama de dispersión de <i>loudness</i> frente al nivel de presión sonora ponderado A de los sonidos de la base de datos del presente trabajo y los sonidos incluidos en el trabajo de Choi <i>et al.</i> (2011)	232

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción. Antecedentes

1.1.1. Relevancia del confort acústico en vehículos ferroviarios

El sector ferroviario en Europa representa un importante segmento de la economía, no solo en cuanto a su papel en el transporte de pasajeros y mercancías, sino también en lo referente a los sectores productivos implicados.

Según datos de la CE, cada año se realizan más de 8.000 millones de trayectos de viajeros por ferrocarril y un 10 por ciento de todo el tráfico de mercancías en toda Europa, con unos ingresos estimados de unos 13.000 millones de euros. Por el corredor de mercancías Rotterdam-Génova, pasan unos 130.000 trenes al año, que equivale a casi 4 millones de camiones (Euroxpress, 2015).

A este hecho, hay que unir la importancia de la industria proveedora del sector ferroviario en Europa, representando un valor de producción total de alrededor de 40 billones de Euros en 2010, con un valor añadido bruto de un 30% del valor productivo.

Aunque las estimaciones del mercado presente y futuro varían en función de la fuente, dependiendo, sobre todo, de las definiciones empleadas y las diferentes evaluaciones de mercado, estudios consecutivos realizados desde UNIFE (Asociación de la industria ferroviaria Europea) en 2008 y 2010 estimaron que el total del mercado ferroviario creció de 122 a 136 billones de euros, comparado con las medias de los tres años 2005-07 y 2007-2009 (figura 1.1).

A nivel de producción, el material rodante y el mercado de las locomotoras es el más relevante, prácticamente igualado con el segmento de mercado de la infraestructura ferroviaria. El segmento de la señalización y electrificación lo sigue a distancia. En términos de negocio, el mercado del material rodante y las locomotoras es, de lejos, el mercado más globalizado. Adicionalmente, la UE está a la cabeza de las exportaciones, que representan el 21% del comercio total de ferrocarril (Ecorys, 2012). Estos datos nos sirven para cuantificar el impacto que puede tener cualquier medida orientada a mantener y mejorar la competencia de las empresas europeas dentro del sector del material rodante.

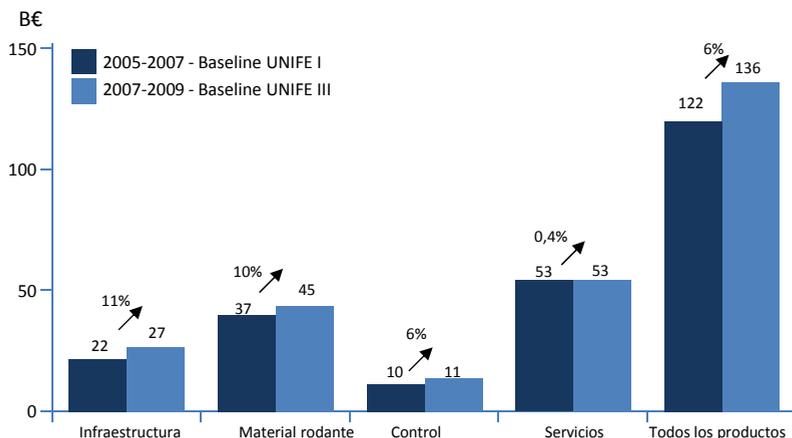


Figura 1.1: Mercado mundial de la industria ferroviaria por segmento de producto, billones de euros y tasa de crecimiento anual compuesto

Estrategia I+D de la industria del sector ferroviario SHIFT²RAIL

Siguiendo con la cooperación que se viene produciendo en las últimas décadas entre la EU y la I+D en el sector ferroviario, la figura de SHIFT²RAIL aparece en 2009, cuando los principales actores del ferrocarril en Europa, coordinados por UNIFE, comenzaron a investigar sobre instrumentos de política que pudieran facilitar un cambio en la velocidad de avance de los desarrollos para el sistema ferroviario Europeo. Los resultados de estas discusiones fueron expuestas ante la comisión europea (SHIFT²RAIL, 2014).

La materialización de esta voluntad por parte de las empresas y el apoyo de la EU es SHIFT²RAIL, la primera iniciativa Europea que tiene como finalidad la investigación y la innovación en soluciones orientadas al mercado, acelerando la integración de nuevas tecnologías avanzadas en soluciones para el sector ferroviario.

Los miembros fundadores de SHIFT²RAIL son empresas tales como ALSTOM, SIEMENS, THALES o BOMBARDIER e incluye gran número de miembros asociados y miembros de pleno derecho que representan distintos intereses y perspectivas del sector ferroviario europeo.

Desde un punto de vista técnico, SHIFT²RAIL tiene como finalidad acelerar la introducción de mejores trenes en el mercado (más confortables, más silenciosos, más fiables, etc.) operando en redes de infraestructura innovadoras y robustas desde su puesta en servicio, a menor coste de ciclo de vida y con más capacidad para cubrir la demanda creciente de movilidad de mercancías y de pasajeros.

Este desarrollo de material rodante más confortable y silencioso es una de las prioridades de la iniciativa SHIFT²RAIL y queda plasmado en uno de los cinco programas de innovación (IP) en los que ha estructurado su actividad. El IP1 *Cost-*

efficient and reliable trains, including high capacity trains and high speed trains incide en la necesidad de desarrollo de material rodante confortable como uno de los aspectos clave para mejorar el atractivo del transporte ferroviario de pasajeros, siendo clave para ello la mejora de las condiciones psicoacústicas del interior de los vehículos como componente clave en el confort.

La importancia del confort del pasajero para tener una oferta diferenciada ante otros medios de transporte y ante la liberalización del transporte de viajeros

El mercado internacional de transporte de pasajeros por ferrocarril se liberalizó en EU a partir de enero de 2010. Cualquier compañía ferroviaria certificada y licenciada establecida en EU puede, en principio, ofrecer estos servicios y haciendo esto, tiene el derecho a recoger y desembarcar pasajeros de cualquier estación a lo largo de una ruta internacional. Se plantea en la actualidad que a partir de diciembre de 2019 los ferrocarriles nacionales de viajeros se abran a nuevas empresas y servicios. Podrán ofrecer servicios comerciales competitivos, o se presentarán a licitaciones para obtener contratos de servicios públicos ferroviarios que representan más del 90 por ciento de los trayectos ferroviarios de la UE y estarán sujetos a concurso.

En la actualidad solo Suecia y Reino Unido han liberalizado completamente sus mercados, Alemania, Austria, Italia, Chequia y los Países Bajos lo han hecho de forma limitada aunque se prevé que el resto de países vayan sumándose progresivamente a esta iniciativa.

Este escenario dará más opciones a los pasajeros que podrán seleccionar qué vehículo ferroviario eligen para sus desplazamientos. Siendo el confort a bordo uno de los motivos principales de la elección (Campos, de Rus y Barrón, 2009), la mejora del mismo va a ser una de las claves para competir en este nuevo escenario.

Interiores de tren atractivos: minimizar el ruido y vibraciones del interior

El silencio se ha convertido en uno de los principales criterios de diseño para el desarrollo de nuevo material rodante. Este criterio aplica tanto al ruido emitido al exterior para reducir la contaminación acústica como el ruido interior del vehículo para garantizar el confort del pasajero (S. Leth, 2010). Este hecho se materializa en que, en cada uno de los nuevos contratos de adquisición, los operadores imponen unos requisitos sobre el ruido interior y exterior más exigentes que los requisitos legales (Leth y Stegemann, 2006).

Los pasajeros de los vehículos ferroviarios demandan viajes confortables. Un pasajero que desea trabajar, leer o descansar durante su viaje necesita ser capaz de concentrarse sin ser distraído por sonidos o vibraciones molestos que hagan difícil escribir o leer. Además de la molestia directa, estos sonidos y vibraciones afectan significativamente a la percepción que tienen los pasajeros de la calidad del producto o del servicio y por tanto, son factores importantes para atraer y mantener a los mismos frente a otros medios de transporte con menor efectividad energética. Desde esta perspectiva, el confort acústico y vibracional es un factor importante cuando se busca promover el viaje con consumos relativamente bajos de energía y menor impacto ambiental (Eurail, 2008; Carlsson, Orrenius y Gröna, 2013).

1.1.2. Origen de la investigación

Existen múltiples esfuerzos encaminados a mejorar el nivel de ruido interior en los vehículos de alta velocidad, aunque la mayoría de trabajos en esta dirección no poseen un enfoque donde se incluya al pasajero como fuente principal de información.

Uno de los principales impulsores de este enfoque centrado en el pasajero es ALSTOM Transport, cuyo departamento de I+D+i en su búsqueda de nuevas soluciones de material rodante posee una línea de investigación en acústica de donde surge la necesidad de realizar el estudio recogido en la presente tesis.

Desde el punto de vista de la orientación al pasajero, cabe destacar que las cuestiones referentes a la interacción entre los objetos que nos rodean y el ser humano es antiguo e intrincado. En concreto, el estudio de la percepción humana subjetiva de los sonidos, psicoacústica, hace que se requiera abordar el problema desde una perspectiva multidisciplinar. Por un lado, es necesario la medida de variables objetivas de caracterización del sonido medibles de manera convencional y, por otro, conocer la sensación subjetiva de escucha percibida (juicios subjetivos, molestia, confort...).

Por ello la biomecánica como ciencia interdisciplinar que utiliza los conocimientos de la mecánica y diferentes tecnologías para estudiar el comportamiento de la interacción de las personas con los productos y su entorno, proporciona el enfoque adecuado para apoyar, con las herramientas necesarias, la investigación de ALSTOM Transport en este campo.

El Instituto de Biomecánica de Valencia (IBV) posee una amplia experiencia, desde sus orígenes en 1976, en solucionar problemas que implican la interacción del individuo con su entorno. La proyección industrial de la biomecánica ha alcanzado a diversos sectores, creándose en 2003 una línea de investigación en IBV dedicada al sector de automoción y ferroviario, cuya principal misión es la mejora del confort y la usabilidad de estos medios de transporte.

La investigación llevada a cabo en el presente estudio se desarrolla gracias al trabajo colaborativo entre ALSTOM Transport y el IBV que comenzó en el año 2003. En este marco se han desarrollado numerosos proyectos de investigación cuyas aportaciones tienen como objetivo la mejora del diseño del material rodante desde el punto de vista del diseño ergonómico y el conocimiento de las claves del confort del pasajero.

El estudio de campo del presente trabajo ha sido posible gracias a RENFE OPERADORA que permitió el acceso al material rodante para la realización de las medidas en los vehículos.

1.2. Estructura del trabajo

La presente tesis consta, además de este capítulo introductorio, de cinco capítulos. En el primero de ellos se fundamenta teóricamente la investigación, en los dos siguientes se expone el plan de trabajo así como sus objetivos concretos y la forma en que se ha abordado el problema, seguidamente se presenta un capítulo con los resultados de la investigación y su discusión y en el último se recogen las principales conclusiones.

A continuación se resume brevemente el contenido de los mismos.

En el capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica donde se introduce el concepto de calidad sonora y se profundiza en los aspectos necesarios para la correcta definición de la medida del ruido interior en vehículos de alta velocidad así como en las técnicas existentes para la evaluación de sonidos por parte de usuarios evaluadores. Este capítulo finaliza con un análisis de los trabajos más relevantes en cuanto a calidad sonora de vehículos ferroviarios de alta velocidad realizados en los últimos 15 años.

Tomando como base la revisión efectuada, en el capítulo 3 se plantean los objetivos de la investigación que dan lugar a los pasos seguidos para su desarrollo.

En el capítulo 4 se inicia la parte empírica, describiendo en detalle el proceso de definición del procedimiento de medida de los vehículos así como de la metodología de evaluación subjetiva. Dentro de este capítulo se describen los materiales y métodos utilizados en las fases experimentales, el estudio piloto, cuyo objetivo era completar la definición de la metodología y el estudio completo, cuya finalidad era la obtención de datos experimentales para la consecución del objetivo del presente trabajo.

El análisis de los datos resultante de las fases experimentales se describe y discute en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se muestran las conclusiones obtenidas en la investigación y se plantean futuras investigaciones en este campo.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción

La presente revisión bibliográfica tiene como finalidad conocer cuál es el estado actual de conocimiento en psicoacústica en vehículos de alta velocidad para establecer los aspectos en los que es necesario profundizar, dando pie a definir los objetivos de este trabajo.

Este capítulo parte de la introducción al concepto de calidad sonora donde se definen algunos términos que, por su uso frecuente durante todo el documento, conviene presentar, tales como cuáles son los mecanismos de audición humana (2.2 *Introducción a la calidad sonora*) y cómo se intenta medir e interpretar el sonido a través de unos parámetros objetivos que representen cómo capta el sonido el ser humano (2.2.1 *Parámetros de medida del sonido*). Estas definiciones darán pie al concepto formal de calidad sonora (2.2.2 *Definición de calidad sonora*), esto es, cómo es percibido el sonido por los usuarios reales y cómo podemos medir dicha reacción de manera repetible y sistemática.

De este modo se establecen las bases que darán lugar a los objetivos parciales de la presente tesis, que se presentarán formalmente, en capítulos posteriores, pero que pueden resumirse en la necesidad de medir adecuadamente tanto el sonido de manera objetiva como la reacción subjetiva de los pasajeros.

Así, los siguientes apartados profundizan en ambos aspectos aunque especialmente aplicados a los vehículos ferroviarios de alta velocidad:

- En 2.3 *Caracterización sonora en el interior de los vehículos ferroviarios*, nos centraremos en los parámetros objetivos, describiendo la procedencia del sonido en el vehículo ferroviario (2.3.1 *Fuentes sonoras en los vehículos*), prestando especial atención al sonido proveniente de los elementos de interior (2.3.2 *Caracterización del ruido interior*), qué factores influyen en la emisión del sonido (2.3.3 *Condiciones de medida de los vehículos*), dónde se miden éstos dentro del vehículo (2.3.4 *Posición de las mediciones dentro del vehículo*) y qué instrumentos se emplean para su medición (2.3.5 *Instrumentación para registro de sonidos*).
- En 2.4 *Evaluación de la percepción subjetiva del sonido: jury test* describiremos en detalle cuáles son las formas en las que se lleva a cabo la evaluación de sonidos por parte de usuarios evaluadores (2.4.1 *Métodos utilizados en jury test*), haciendo especial énfasis en los tipos de valoración (directa, comparaciones por pares, ordenaciones en rango) y en qué cuestiones se realizan a los sujetos participantes (2.4.2 *Selección de los atributos a evaluar*), para finalizar con aspectos de relevancia práctica al plantear sesiones de evaluación tales como los perfiles de los participantes, el tamaño de muestra o el entorno de evaluación (2.4.3 *Selección de los evaluadores*).

Posteriormente (2.5 *Estado del arte en calidad sonora de vehículos ferroviarios de alta velocidad*), se expone un análisis de los trabajos más relevantes en cuanto a calidad sonora de vehículos ferroviarios de alta velocidad realizados en los últimos 15 años, en los que se abordan estudios de manera completa y se emplean las técnicas y

metodologías descritas en 2.3 y 2.4 (o variantes de las mismas). Se ha preferido, tal y como se comenta posteriormente, realizar un análisis trabajo por trabajo para finalizar con un apartado de conclusiones común para todos ellos (2.5.7 *Conclusiones sobre el estado del arte en modelos psicoacústicos para vehículos de alta velocidad*) en lugar de descomponerlos y agrupar por técnicas o metodologías por motivos de coherencia. Cada uno de ellos corresponde, en muchos casos, a una filosofía de abordaje del problema que conviene, desde nuestra perspectiva, ser observada en su conjunto.

El capítulo termina con un apartado de conclusiones (2.6 *Conclusiones*) que servirá de apoyo para definir los objetivo y plan de trabajo de la presente tesis con la finalidad de cubrir algunos de aquellos aspectos que no han sido abordados por el momento en este campo.

2.2. Introducción a la calidad sonora

El oído es un conjunto de órganos cuyas funciones principales son dotar de equilibrio y audición al cuerpo de los humanos o animales. Dentro del estudio de la medicina se le denomina también órgano vestibulococlear.

Las ondas sonoras que vienen del exterior, son captadas por el pabellón auditivo y conducto auditivo externo, chocan con el tímpano que vibra y las transmite a la cadena de huesecillos, que se mueven y vibran (figura 2.1). La vibración pasa a la ventana que contacta con el oído interno, en donde se encuentra la cóclea (o caracol) con un líquido interior. Este líquido se mueve y baña un conjunto de células que forman el órgano de Corti, que también está dentro del caracol. Estas células son de estructura nervosa y se enlazan con nervios que van a la superficie del cerebro, donde se van a percibir los sonidos.

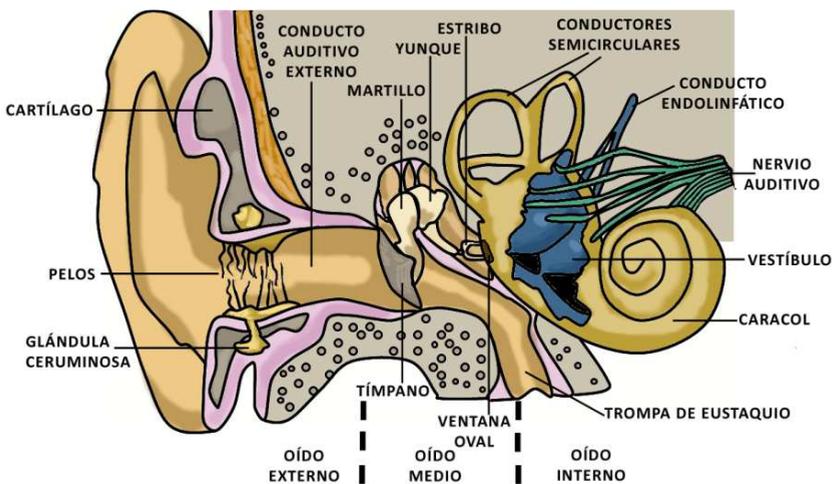


Figura 2.1: Estructura del oído humano

Para que un sonido sea percibido por el oído humano su frecuencia y amplitud tienen que estar comprendidos en los siguientes intervalos:

- Frecuencia de la onda sonora de 20 a 20.000 Hz.
- Nivel de presión acústica de 20×10^{-6} a 200 Pa.

El sistema nervioso produce una sensación sonora solo para el intervalo de frecuencias mostrado y esta discriminación la realiza de forma no lineal. Fuera de estos límites el sonido no es audible. La física de las ondas elásticas por encima de 20.000 Hz se denomina ultrasonidos y por debajo de 20 Hz se denominan infrasonidos. En el caso de la amplitud de la presión, por debajo del intervalo presentado anteriormente, el sonido no es percibido por falta de excitación suficiente (umbral de audición) y por encima del intervalo, produce sensación de dolor.

2.2.1. Parámetros de medida del sonido

En general, los sonidos están formados por la unión de componentes de distinta frecuencia. Físicamente, se representan mediante su espectro de frecuencia, sin embargo, la percepción subjetiva del sonido depende de múltiples factores.

Aparecen, pues, dos conceptos esencialmente distintos aunque íntimamente relacionados: por un lado, la onda sonora o ente físico capaz de producir la sensación de sonido; y por el otro, la percepción subjetiva producida por ciertas variaciones de presión en el oído.

Mientras que la acústica estudia el sonido como fenómeno físico, la psicoacústica estudia la percepción humana subjetiva de los sonidos. Esencialmente consiste en el análisis de las relaciones entre la caracterización objetiva de los sonidos y la sensación subjetiva de escucha percibida. Los parámetros psicoacústicos pueden definirse como medidas objetivas de las características de los sonidos que describen la percepción acústica percibida (González, Ferrer, De Diego, Pinero y Garcia-Bonito, 2003), proporcionando una manera de medir ciertos aspectos de la sensación subjetiva que los sonidos pueden producir a los oyentes (Fastl, 1997).

El ruido se define como un caso particular del sonido, aquel sonido no deseado y que interfiere en alguna actividad humana, provocando sensación de molestia (Romero Ibáñez, 2011)¹.

Existen multitud de indicadores para diferenciar unos sonidos de otros, a continuación se definen los más relevantes dentro del campo de la acústica (Nivel de presión sonora) y de la psicoacústica (Sonoridad, Ponderación en frecuencia, Nivel de presión sonora equivalente, Agudeza, Rugosidad, Fluctuación y Tonalidad).

¹ En literatura, los autores emplean ambos términos, ruido (*noise*) o sonido (*sound*), en función del tipo de estudio, aunque las herramientas y técnicas son las mismas en ambos casos. Respetaremos, en cualquier caso, la nomenclatura de cada autor.

Nivel de presión sonora² o acústica

El nivel de presión sonora es el parámetro que se utiliza para cuantificar la presión acústica. Como se ha comentado, las presiones acústicas a las cuales es sensible el oído humano, varían en un intervalo enorme. La manipulación de valores que cubren un campo tan extenso no resulta cómoda y además la respuesta del oído no es lineal, por lo que se recurre a la utilización de otra escala, logarítmica, y otra unidad, el decibelio.

Se define el nivel de presión sonora L por la expresión:

$$L(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_{ref}} \quad (2.1)$$

Donde p_{ref} es el valor de referencia de la presión acústica que representa la menor presión acústica audible por un oído humano normal, $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, y p la presión acústica eficaz. L se expresa en decibelios (dB).

Hasta en la década de 1950, el nivel de presión sonora era el único indicador considerado para analizar objetivamente el sonido (Otto, Amman, Eaton y Lake, 2001). Sin embargo, este indicador acústico tradicional ha sido gradualmente reemplazado a la hora de caracterizar, de mejor manera, la impresión acústica percibida de los sonidos.

Sonoridad (Loudness)

La sonoridad es la magnitud psicoacústica más básica, describe generalmente mejor el nivel de sonido percibido que el nivel de presión sonora. Hacia principios de los 60, ya existía un modelo de sonoridad, desarrollado por Stevens (1956). En este modelo, se establece la sonoridad expresada en sones, una unidad basada en una escala sensorial establecida a partir de valoraciones subjetivas donde se asignaba el valor de la sonoridad a los sonidos presentados. En la misma década, estaba en desarrollo el método de Zwicker (Fastl y Zwicker, 2007), basado en el concepto de bandas críticas. Una serie de revisiones de ambos modelos, concluirían en la publicación de la norma internacional ISO 532 B:1975, la cual contiene los únicos 2 modelos de sonoridad estandarizados (figura 2.2.).

Ambos modelos, así como otras propuestas desarrolladas más recientemente basan su análisis en la descomposición de señales en bandas de frecuencia y los conjugan con otras consideraciones, como son el enmascaramiento de señales.

² En inglés Sound Pressure Level (SPL)

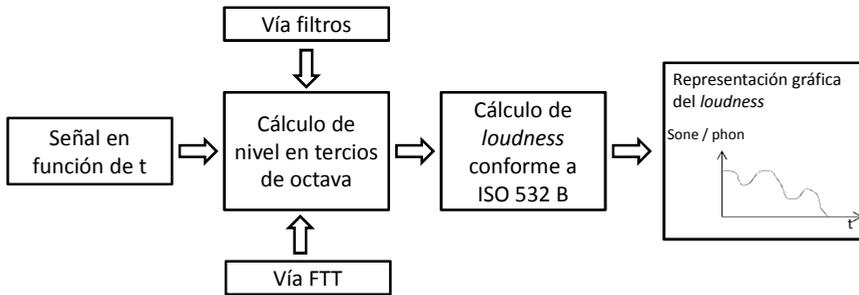


Figura 2.2: Procedimiento de cálculo de la sonoridad basado en la norma ISO 532 B:1975

La unidad de medida de la sonoridad es el son (o sonio) en escala lineal o el phon (o fonio) en escala logarítmica. Por convención, el valor de 1 son es la sonoridad de un tono puro de 1000Hz con una intensidad de 40 dB. Un sonido de 2 sones será percibido como 2 veces más fuerte que uno de 1 son.

Estudios realizados sobre un gran número de oyentes ha permitido tabular un conjunto de curvas de igual sonoridad (curvas isofónicas) que indican, para cada nivel de sonoridad, el nivel sonoro de los distintos tonos puros³ que producen la misma sensación sonora (se comprueba que la corrección de nivel⁴ entre dos frecuencias distintas para que ofrezcan la misma sonoridad depende del valor de la sonoridad). En la figura 2.3 se representan las curvas de igual sonoridad, según ISO 532 B:1975.

Cada curva indica los valores del nivel de presión sonora y de frecuencia que corresponden a una misma sonoridad.

Puede verse que para sonoridades bajas (menores de 40 phons), el oído necesita más presión acústica cuando la frecuencia es de 31.5 Hz⁵ que cuando es de 1000 Hz. Esta diferencia se va acortando para niveles altos de sonoridad, esto implica que para altos niveles de sonoridad, la relación nivel de presión-frecuencia se va haciendo más lineal.

³ El tono es la sensación auditiva o atributo psicológico de los sonidos que los caracteriza como más agudos o más graves, en función de la propiedad física llamada frecuencia. Un tono puro corresponde a una onda senoidal, es decir, una función del tipo $f(t) = A \sin(2 \pi f t)$, donde A es la amplitud, t es el tiempo y f la frecuencia.

⁴ La aplicación de correcciones de nivel puede encontrarse en UNE ISO 1996-1:2005

⁵ *Standard frequencies for acoustic measurements according to EN ISO 266*

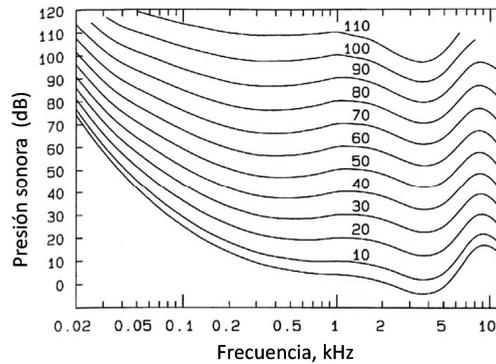


Figura 2.3: Curvas de isofónicas en phons

Curvas de ponderación en frecuencia

El oído humano no es sensible de la misma manera a las diferentes frecuencias y además varía considerablemente, con el nivel de presión sonora que escucha. Así, para un mismo nivel de presión sonora, un ruido será tanto más molesto cuanto mayor proporción de altas frecuencias contenga (Moore, 2004a). Para intentar aproximar los analizadores acústicos a la respuesta del oído, se crearon las curvas de ponderación en frecuencia. Se definieron basándose en las curvas isofónicas del oído humano, es decir, atenuando las frecuencias bajas, para poder reflejar un nivel sonoro representativo de la sensación de ruido realmente recibida.

Así, para niveles bajos de presión sonora se usa la ponderación A, que atenúa en gran medida los bajos (-50 dB a 20 Hz y casi -20 dB a 100 Hz) y en menor medida los agudos (casi -10 dB en 20 kHz). La ponderación A es adecuada para la medida de ruidos de fondo, ruido de tráfico, instalaciones, etc...que son, por definición, de nivel bajo o medio.

La ponderación B es adecuada para niveles intermedios y es similar a la curva A, excepto porque la reducción de bajos es mucho menor, aunque todavía significativa (-10 dB a 60 Hz). Estudios demuestran que es la mejor ponderación para usar en la medida de niveles de escucha musical. Actualmente, la ponderación B está en desuso.

La ponderación C es muy similar a la B en agudos, y apenas aporta atenuación de las frecuencias graves. Se planteó para la evaluación de ruidos de alto nivel de presión.

Las diferentes ponderaciones pueden compararse en la figura 2.4.

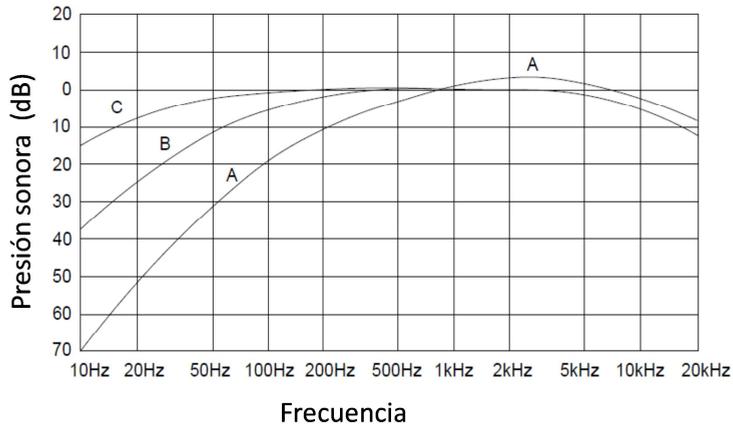


Figura 2.4: Curvas de ponderación en frecuencia (en abscisas escala logarítmica, en ordenadas en escala lineal)

Nivel de presión sonora continuo equivalente. $L_{eq T}$ y $L_{Aeq T}$

Es el índice más utilizado para medir el ruido. Expresa la media de la energía sonora en un intervalo de tiempo, es decir, representa el nivel de presión que habría sido producido por un ruido constante con la misma energía que el ruido realmente percibido, durante el mismo intervalo de tiempo. El nivel de presión sonora equivalente debe ir acompañado siempre de la indicación del periodo de tiempo al que se refiere.

El nivel de presión sonora continuo equivalente utilizado con la ponderación A es el índice más extendido para medir las molestias del ruido.

Su formulación matemática es:

$$L_{Aeq T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

Donde T es el intervalo de tiempo de medición en segundos; $P_A(t)$ es la presión sonora instantánea, ponderada en A, en Pa y P_0 es la presión sonora de referencia; $P_0=20 \mu\text{Pa}$.

En el pasado, todos los estudios estaban centrados en reducir el nivel de presión sonora ponderado en A para mejorar el confort acústico. Sin embargo estos estudios no han conseguido mejorar la calidad acústica debido a que sonidos con el mismo nivel $L_{Aeq T}$ son percibidos de forma distinta por los usuarios.

Otros parámetros psicoacústicos

Agudeza (*Sharpness*)

La agudeza representa un atributo para la evaluación del timbre⁶ que describe el color tonal del sonido (von Bismarck, 1974). Se define en función de la sensación de placer o de desagrado de un sonido referido a toda la envolvente del espectro. Se determina por medio del centroide de la distribución espacial en el espectro de Zwicker. Cuanto mayor es la parte de alta frecuencia dentro de un ruido, mayor es la impresión de la agudeza del sonido.

En la ecuación (2.3), el denominador obtiene el valor total de la sonoridad (N'), mientras que la integral superior es el centroide de la sonoridad ponderado. El factor de ponderación $g(z)$ tiene en cuenta el hecho de que los componentes por encima de 3 kHz ($Bark > 14$) contribuyen más al valor de agudeza que los de baja frecuencia (Zwicker, 2007).

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \text{ acum} \quad (2.3)^7$$

Donde:

Si $z < 14$, entonces $g'(z) = 1$

Si $z > 14$, entonces $g'(z) = 0.00012 \cdot z^4 - 0.0056 \cdot z^3 + 0.1 \cdot z^2 - 0.81 \cdot z + 3.5$

La agudeza es uno de los parámetros psicoacústicos más importantes debido a su influencia considerable en el desagrado “*unpleasantness*” de sonidos. Los sonidos con altos valores de agudeza son evaluados como más desagradables y molestos (Genuit, 2004). Su unidad de medida es el acum.

Rugosidad (*Roughness*)

El parámetro rugosidad describe la percepción humana de variaciones temporales en el sonido. Es la sensación causada por la rápida modulación de amplitud dentro de los filtros auditivos (Ferguson, Cabrera, Beilharz y Song, 2006)⁸.

⁶ De acuerdo a la definición de la ASA (American Standards Association) (1960), el timbre es la sensación auditiva en términos de la cual, un escuchante puede juzgar que dos sonidos presentados de un modo similar y teniendo la misma sonoridad y tono, son distintos. Las diferencias en timbre nos permiten diferenciar la misma nota ejecutada en un piano, un violín o una flauta (Moore, 2004b).

⁷ La escala Bark es una escala psicoacústica propuesta por Eberhard Zwicker en 1961. La escala va de 1 a 24 y corresponde a las primeras 24 bandas críticas de la audición. Se definen mediante una frecuencia central (Hz), una frecuencia de cut-off (Hz) y un ancho de banda (Hz) (Zwicker, E. 1961).

Su unidad de medida es el *asper*. Un *asper* se define como la rugosidad producida por un tono de 1000 Hz de 60dB que tiene el 100% de la amplitud modulada a 70 Hz, y alcanza su valor máximo para modulaciones en tonos con frecuencias alrededor de 70 Hz (Terhardt, Stoll y Seewann, 1982).

Una señal modulada contiene un alto valor de rugosidad y es considerablemente más desagradable independientemente del nivel de presión sonora ponderado en A (Genuit, 2004). Este parámetro es habitualmente utilizado en la calidad sonora de automoción, por ejemplo, para caracterizar la sensación de deportividad del sonido del motor de un vehículo (Fastl, 2005).

Se calcula como:

$$R = cal \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} f_{mod} \cdot \Delta L \cdot dz \quad (2.4)$$

Donde *cal* es el factor de calibración, f_{mod} es la frecuencia de modulación y ΔL es la profundidad de enmascaramiento percibida (*perceived masking depth*)⁹

En la figura 2.5 se ilustra el modelo de rugosidad.

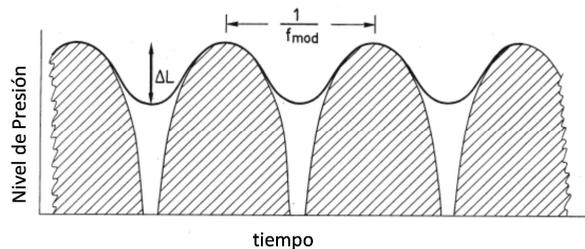


Figura 2.5: Ilustración del modelo de rugosidad (Fastl, 2005)

Fluctuación (*Fluctuation Strength*)

Las fluctuaciones periódicas con modulación a frecuencias menores de 20 Hz son reconocidas por el oído como cambios del volumen¹⁰ en el tiempo. La sensación causada por este hecho es definida como fluctuación. Hay que tener en cuenta que la fluctuación y la rugosidad son parámetros que caracterizan la percepción de dos fenómenos físicos similares.

⁸ Fletcher (1940), siguiendo a Helmholtz (1863), sugieren que el sistema periférico auditivo (el responsable de los procesos fisiológicos de audición) se comporta como si contuviera un banco de filtros pasa banda. Estos filtros se denominan en la actualidad “filtros auditivos” o “bandas críticas” (Moore, B.C., 2004b)

⁹ Debido a la dificultad de estimar adecuadamente ΔL , el cálculo del *roughness* no ha sido estandarizado y existen distintas propuestas para su cálculo.

¹⁰ Volumen es la percepción subjetiva que el ser humano tiene a la potencia de un determinado sonido. Es el nivel de potencia de la señal. Al subir el volumen de un emisor, se aumenta la potencia de los amplificadores para que la señal sea más fuerte en todas las frecuencias. Como dijimos anteriormente, el oído humano no es capaz de oír cada frecuencia en el mismo nivel, el volumen percibido es diferente en cada frecuencia.

Si la modulación es rápida (frecuencias entre 20 y 300 Hz), se percibe un cambio en la frecuencia fundamental con respecto al tiempo. Si la modulación es lenta (menor de 20Hz), la sensación percibida corresponde con un cambio en el nivel del sonido o fluctuación. Según menciona García, Iturbe y Planas (2000) en general las señales con mayor fluctuación son más molestas que las señales con mayor rugosidad.

La fluctuación se puede calcular a partir de la ecuación (Ec. 2.5).

$$F \approx \frac{\Delta L}{(f_{mod}/4Hz)+(4Hz/f_{mod})} \text{ vacil} \quad (2.5)$$

Donde ΔL es la profundidad de modulación y f_{mod} la modulación en frecuencia.

El parámetro fluctuación tiene como unidad de medida el vacil.

Tonalidad (Tonality)

La tonalidad de un sonido significa que éste contiene uno o más componentes prominentes tonales. Mide cuantos tonos puros pueden ser encontrados en el espectro del ruido. Este parámetro da información sobre la naturaleza armónica del sonido, por ejemplo un ruido aleatorio tiene una densidad espectral de potencia distribuida por todas las bandas, por lo que presenta una tonalidad baja.

Los sonidos tonales intensifican generalmente la impresión desagradable de un sonido. Por esta razón en pautas y regulaciones estos sonidos conllevan una penalización de 3 hasta 6 dB(A). Uno de los métodos más precisos de calcular la tonalidad se encuentra en la norma alemana DIN 45681:2005.

2.2.2. Definición de calidad sonora

La calidad sonora puede ser definida como la reacción perceptual que refleja la aceptabilidad del consumidor o usuario de un producto emisor de sonido. La esencia del análisis de la calidad sonora es evaluar subjetivamente un sonido y correlacionarlo con las medidas objetivas.

Hace tiempo que se trabaja activamente en la mejora de la calidad sonora de diversos equipos, máquinas, vehículos, etc., de uso doméstico, tales como electrodomésticos, juguetes y automóviles (Accolti y Miyara, 2009) pero es en la industria de la automoción donde más se aplica y en el campo donde más investigaciones se han realizado. Una razón es la dura competencia entre fabricantes de coches y el hecho de que muchos de ellos son similares en cuanto a calidad de componentes y aspecto, por lo que la calidad sonora puede ser un elemento diferenciador (Gade, 2007).

En los últimos años, el concepto de calidad sonora está siendo aplicado por casi todas las industrias que fabrican productos que generan ruido. Tanto en Estados Unidos como en Japón o Europa la calidad sonora de sus productos es un aspecto que se tiene en cuenta. En otros países también se considera desde hace tiempo la necesidad de que este concepto se desarrolle rápidamente ya que si se realiza el diseño del producto sin tener en cuenta el sonido que genera, será difícil vender productos con escasa calidad sonora (Kuwano, Namba y Okamoto, 2004).

El objetivo en el desarrollo de un producto es utilizar las actitudes, expectativas y preferencias de futuros consumidores para que el sonido de un producto llegue a ser un atributo positivo para el usuario (Blauert y Jekosch, 1997). Como todas las personas pueden percibir la calidad acústica y comunicarla a los expertos, surge la necesidad del diseño y desarrollo del producto desde el punto de vista acústico. Por lo tanto, esto representa una oportunidad de asegurar que el producto será un éxito por parte de los usuarios (García, Iturbe y Planas, 2000).

La figura 2.6 describe el proceso fundamental de optimización de la calidad sonora del producto. En primer lugar, se seleccionan los sonidos a evaluar y éstos pueden ser sonidos alternativos de un producto, sonidos simulados o sonidos de similares productos. Estos sonidos son analizados mediante software de parámetros objetivos que los definen. Estos parámetros pueden ser físicos y/o psicoacústicos (sonoridad, agudeza, rugosidad, fluctuación, etc.). Posteriormente, se realiza un test de valoración con usuarios o *jury test*¹¹. Estos sujetos evalúan la calidad acústica del producto constituyendo la evaluación subjetiva del sonido (Klemenz y Vorländer, 2005).

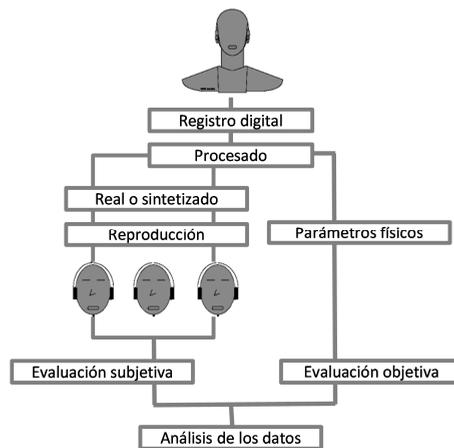


Figura 2.6: Metodología del proceso de mejora de calidad acústica de un producto. Adaptación de (Genuit, 2004)

Mediante tratamiento estadístico, se estudia la relación entre los parámetros objetivos obtenidos y la evaluación subjetiva obtenida en el *jury test*. Con ello, es posible conocer la calidad acústica de un sonido mediante un modelo en donde se recojan los parámetros psicoacústicos y se ajuste a la escala subjetiva dada por los sujetos de ensayo (Klemenz y Vorländer, 2005).

Cuando el sonido correcto ha sido identificado y verificado en el *jury test*, el producto debe ser rediseñado teniendo en cuenta las especificaciones acústicas elegidas. El

¹¹ El juicio último de un producto es llevado a cabo por personas, de este modo, en el desarrollo de nuevos productos, cierta cantidad (o quizá incluso una cantidad considerable) de ensayos han de llevarse a cabo con la participación de sujetos. Esto es conocido como un *jury test*.

siguiente paso es identificar qué elementos que conforman el producto son los responsables del empeoramiento de la evaluación acústica del producto y realizar las mejoras oportunas (Kuwano *et al.*, 2004).

Los *jury test* son costosos en tiempo y dinero, necesitan de un equipamiento e infraestructura específica, además de la logística necesaria para la participación de evaluadores. Por tanto, uno de los múltiples objetivos de la calidad sonora es poder remplazar los test de valoración como el *jury test* por caracterizaciones objetivas del sonido mediante la obtención de modelos psicoacústicos.

Los modelos psicoacústicos tratan de relacionar los parámetros psicoacústicos (sonoridad, agudeza, etc.) con las sensaciones sonoras percibidas. Normalmente la sensación sonora corresponde al nivel de molestia o agrado del sonido, aunque podría tratarse de cualquier atributo del sonido.

Fastl y Zwicker (2007) elaboraron modelos psicoacústicos generales para estimar el confort acústico. El modelo “*sensory pleasantness*” y el modelo de “*psychoacoustic annoyance*” pueden cuantitativamente describir el confort acústico a partir de parámetros psicoacústicos.

Otros estudios tratan de obtener una estimación de la sensación de agrado o molestia centrándose en los sonidos específicos a evaluar. De esta manera, se obtiene un modelo específico para cada producto, de forma que se obtenga un mejor ajuste como pueden ser el caso de un modelo para sonido del motor (Ingham, Otto y McCollum, 1999) o para sonido de cierre de puertas (Parizet, Guyader y Nosulenko, 2008).

Para el análisis de las relaciones entre los parámetros psicoacústicos con las sensaciones sonoras percibidas, las herramientas más extendidas vienen del campo de la estadística: correlaciones, regresiones lineales y no lineales etc... Otro método empleado en ocasiones es el de las redes neuronales, técnicas que en las que el procesado de la información está inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso. El mayor inconveniente del uso de estas técnicas es que actúan como una caja negra sin describir la secuencia y lógica que relaciona la entrada y la salida (Otto, Amman, Eaton, y Lake, 2001) además del gran número de datos de entrada y salida necesarios para obtener buenos resultados.

2.3. Caracterización sonora en el interior de los vehículos ferroviarios

2.3.1. Fuentes sonoras en los vehículos

El sonido en el interior de los vehículos ferroviarios, excluyendo el ruido provocado por los propios pasajeros, puede ser producido por fuentes situadas en el exterior del vehículo, como son aquellas ligadas a la rodadura del vehículo, a los sistemas de tracción, al equipamiento auxiliar y al ruido aerodinámico o por fuentes que se encuentran en el interior del propio vehículo.

En el caso de estas últimas, las principales fuentes de ruido interiores son:

- Equipos auxiliares, tales como sistemas de equipamiento de ventilación, aire acondicionado o convertidores eléctricos.
- Apertura y cierre de puertas.
- Elementos constructivos del interior del vehículo que vibran emitiendo ruido cuando el vehículo está en circulación.

Mientras que la contribución al sonido interior del vehículo de las fuentes de ruido interior es baja y se trata de fuentes sonoras muy localizadas o defectos constructivos en el montaje o por su deterioro, las fuentes de ruido exterior requieren de un mayor detalle. Esto es debido a la gran diversidad de fuentes sonoras y factores de influencia en las mismas, así como a su mayor contribución al ruido interior.

Para la descripción de las fuentes de ruido exteriores del vehículo ferroviario se ha utilizado fundamentalmente información recopilada en trabajo de Romero-Ibáñez (2011), basado a su vez en los trabajos de Harris (1995), Krylov (2001) y Thompson (2008). En ese trabajo encontramos la siguiente clasificación de las fuentes exteriores:

- Fuentes ligadas a la rodadura.
 - Conjunto rueda – carril.
 - Las vías (traviesas y soportes) y su conjunto de aparatos de vía.
 - Bogies o rodales¹² y carrocería.
 - Obras civiles.
- Fuentes ligadas al sistema de propulsión de coches y locomotoras.
- Fuentes ligadas al equipamiento auxiliar.
- En el caso de vehículos de Alta Velocidad, el ruido aerodinámico.

A continuación se describen cada uno de ellos, indicando los factores que más afectan a la emisión de ruido.

¹² Sistema de rodadura que sustituye al bogie específico de los coches de suspensión pendular.

Fuentes ligadas a la rodadura

Dentro de las fuentes sonoras ligadas a la rodadura encontramos cuatro grupos diferenciados según su naturaleza; el ruido emitido directamente según las características del conjunto rueda-carril; el ruido emitido según el tipo de vía por el que circula el vehículo; el ruido emitido según los sistema de propulsión; y el ruido emitido según el tipo de bogie (o rodal) y la carrocería de los vehículos.

En el ruido emitido según el conjunto rueda – carril destacan tres fenómenos, el desgaste de carril y rueda, los impulsos verticales, debidos a las juntas entre carriles y, finalmente, los deslizamientos entre carril y rueda que a baja velocidad, pueden provocar chirridos de alta frecuencia en curvas de radio de curvatura pequeño.

El tipo de vía también influye en la emisión de ruido del vehículo. Las vías de tren son sistemas montados sobre balasto o soportados. Los tipos más habituales son:

- Sistema clásico, vías fijadas sobre traviesas de madera u hormigón mediante grapas, y colocadas sobre un lecho de balasto; en general, este conjunto constituye una elevación sobre el nivel del suelo.
- Sistema con carriles fijados, directamente o mediante sujeciones especiales, sobre una placa rígida de hormigón, que a su vez reposa sobre una plataforma a través de soportes absorbentes.
- Vías tendidas directamente sobre una placa metálica, utilizado en puentes y viaductos.

Las vibraciones de la rueda se propagan directamente al conjunto del bogie, que se transmite al resto de elementos del vehículo, por tanto, el diseño del bogie influye en gran medida en el nivel de ruido emitido por el vehículo. Esta transmisión de vibración al resto de elementos es especialmente importante cuando se trata de la carrocería, que, sobre todo en el caso de vagones de mercancías sin carga completa, puede ser una fuente muy importante de ruido.

En lo que respecta al ruido suplementario que producen las obras civiles podemos encontrar dos grupos muy diferenciados, por un lado puentes y viaductos y, por otro lado, los túneles. Si nos centramos en el sonido transmitido al interior, cobran especial relevancia los túneles. Las bocas de un túnel son fuentes de ruido y han sido tema de análisis para distintos autores (Ayala Botto, Sousa y da Costa, 2005; Choi, Park, Park, Park y Paik, 2011)

En efecto, la salida de un tren de un túnel provoca aumentos entre 3 y 5 dB(A) por la reverberación en el interior del túnel, si las bocas no están tratadas acústicamente. Aparecen asimismo niveles de ruido a frecuencias infrasónicas (que se aprecian también en el interior de los vehículos) debido a que el aire que desplaza el vehículo no puede expandirse como al aire libre.

Sistema de propulsión de coches y locomotoras

Son las fuentes de ruido ligadas a la unidad tractora del vehículo, que constituye una fuente de ruido más o menos preponderante según el tipo y velocidad de marcha. En los tipos principales de tracción, la tracción eléctrica y la tracción diésel, podemos

encontrar diferencias en cuanto al ruido emitido. Cuando la tracción del vehículo es eléctrica el ruido queda enmascarado por el ruido de rodadura a menor velocidad que si la tracción es de tipo diésel.

Fuentes ligadas al equipamiento auxiliar

Entre otros elementos del equipamiento auxiliar se pueden citar como más relevantes el sistema de ventilación forzada o de aire acondicionado. Otra fuente de ruidos es el silbato de señales. En ocasiones también se aprecia el ruido de contacto entre el pantógrafo y la catenaria.

El ruido aerodinámico

El ruido aerodinámico emitido por un tren es el resultado de presiones, que fluctúan rápidamente, en las turbulencias de aire situadas sobre o cerca de la superficie del tren en movimiento (Thompson, 2008).

El flujo de aire sobre esta superficie en movimiento se convierte en turbulento a medida que va encontrando protuberancias, superficies rugosas o bordes ásperos. El ruido surge por una combinación de efectos de capas adyacentes turbulentas y separaciones de flujo. Entre las causas del ruido aerodinámico se encuentran los remolinos causado por los perfiles de las ruedas, por algunas partes de los sistemas de suspensión y de los bogies que interfieren en la corriente de aire, y por objetos de la superficie del vehículo como los limpiaparabrisas y los pantógrafos (Ikeda, 2002).

Cerca de la cabeza motora el flujo es laminar, pero debido a la viscosidad, este flujo laminar, rápidamente se convierte en flujo turbulento.

Sin embargo, para el ruido del ferrocarril no es la turbulencia libre la principal fuente de ruido aerodinámico, siendo las fuentes dominantes el flujo sobre objetos sólidos cilíndricos, como el pantógrafo, otros equipamientos sobre el techo y pasamanos; el flujo sobre discontinuidades, por ejemplo los huecos entre coches o en la región del bogie y el flujo sobre cavidades y ventanas. También tiene una especial contribución la capa de flujo turbulento sobre superficies en curva o rugosas particularmente donde ocurre la separación del flujo, por ejemplo en la cabeza o en la cola del tren.

Por tanto, las fuentes de ruido aerodinámico más importantes, aunque varían de un vehículo a otro, son:

- Los bogies, particularmente el bogie de cabeza.
- El pantógrafo, su hueco en el techo y otras instalaciones montadas sobre el techo.
- La cabeza del vehículo.
- Los huecos entre coches.
- Las rejillas de ventilación.
- Protuberancias como manillas y escaleras en las puertas.
- Cavidades resonadoras.

- La propia capa turbulenta sobre la superficie del vehículo, la cual tiene muy baja potencia pero está distribuida en una gran área.

De todas estas destaca la región del bogie como una de las más importantes. El pantógrafo, por el contrario, tiene una pequeña contribución.

2.3.2. Caracterización del ruido interior

El sonido producido por las fuentes exteriores que hemos descrito puede transmitirse al interior del coche por dos medios: a través del aire o por la estructura del vehículo. En el aire, el sonido es radiado directamente desde la fuente al aire envolvente. Este sonido es entonces transmitido a través de los paneles del coche. La transmisión del sonido en la estructura se origina por la vibración producida en la estructura del coche (Ayala Botto *et al.*, 2005).

En el estudio de Poisson, Coste, Bouvet y Vincent (2011) se analiza la propagación del ruido y se crea un modelo para un vehículo de alta velocidad (TGV Dúplex) con dos salones, inferior y superior, circulando a velocidades desde 150 km/h a 360 km/h.

El modelo de Poisson, Coste *et al.* (2011) se utiliza para cuantificar la importancia relativa del ruido transmitido por la estructura y el ruido transmitido a través del aire. El estudio concluye que, excluyendo posiciones específicas cercanas a la zona de bogie, la contribución del ruido transmitido por la estructura es baja dentro de los salones – inferior del 20% de nivel general - y es importante, pero no predominante en la plataforma - de 25 a 50% de los niveles generales.

En este estudio, se definen como las principales fuentes de ruido del vehículo que se transmiten por el aire, el ruido de interacción rueda/rail o ruido de rodadura, la fuente de ruido aerodinámico proveniente del bogie y de los espacios entre coches y la capa límite turbulenta (TBL) que se forma alrededor del vehículo.

En este mismo estudio se calcula el peso respectivo de las tres principales fuentes de ruido transmitidas al interior en las diferentes zonas del vehículo utilizando un modelo de transmisión. La tabla 2.1 resume los resultados obtenidos en las salas de pasajeros.

Tabla 2.1: Contribución de las fuentes de ruido en el ruido interior en porcentaje de nivel de presión sonora equivalente A ($L_{Aeq T}$) a 300km/h (izquierda) and 360km/h (derecha) (Poisson, Coste *et al.* ;2011)

	Rueda/Carril	Aerodinámico	TBL
Sala inferior	30% - 20 %	38% - 57 %	32% - 23 %
Sala superior	26% - 19 %	27% - 44 %	47% - 37 %

Según los resultados de Poisson, Coste *et al.* (2011), en los diferentes salones las contribuciones varían con la velocidad. En términos de amplitud, la contribución de la fuente de rueda / carril es la contribución más débil en el salón superior. En el salón inferior, la contribución principal es la fuente de ruido aerodinámico en la zona de

bogie. En todas las zonas, cuando aumenta la velocidad, menor es el peso de la fuente rueda / carril y mayor el componente aerodinámico.

El estudio también concluye que a velocidades inferiores a los 200 km/h, el componente de rueda / carril es predominante en todas las zonas del vehículo.

En términos de frecuencia, para el ruido de la fuente rueda / carril predomina un rango medio-alto de frecuencia, por encima de unos 800 Hz, mientras que el componente aerodinámico del bogie es la principal componente para bajas frecuencias por debajo de unos 400 Hz.

El ruido de fondo de un vehículo de alta velocidad según la definición de Poisson, Dubois, Gallais y Tallote, (2011) corresponde al sonido en el interior de los coches circulando a velocidad constante, sin pasar por túneles, cruces y puentes. Las principales contribuciones al ruido de fondo son las que acabamos de describir, identificadas en el caso del TGV Dúplex (Poisson, Coste *et al.*, 2011).

Sin embargo, el ruido interior del vehículo está compuesto por el ruido de fondo y otros sonidos emergentes que se superponen al mismo (Boullet, Rabau, Meunier y Poisson, 2007).

Los equipos auxiliares situados en el exterior o interior del vehículo cerca del pasajero, como el equipo de aire acondicionado, convertidores eléctricos o máquinas rotativas, como compresores o ventiladores, pueden generar tonos puros y sus armónicos (Boullet *et al.*, 2007). Además, en el interior del vehículo se pueden producir otras señales emergentes como tonos puros originados por la excitación paramétrica del paso del vehículo por encima de las traviesas y otros sonidos emergentes por la apertura-cierre de la puertas que conectan las salas y la plataforma (Boullet *et al.*, 2007). Estas componentes tonales son relevantes ya que, como se comentó previamente, los sonidos que contienen componentes tonales son percibidos como más molestos que los sonidos sin componentes tonales (Beckenbauer, Stemplinger y Seiter, 1996).

Un espectro típico de ruido de fondo en interior en vehículos de alta velocidad se muestra en la figura 2.7. Este espectro es el que se utiliza como patrón de diseño en las especificaciones de este tipo de vehículo.

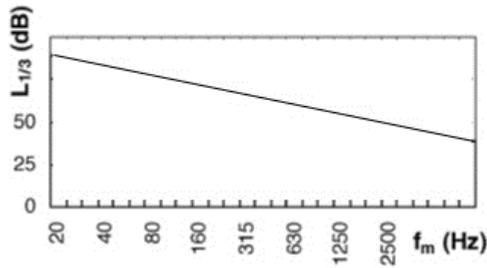


Figura 2.7: Espectro típico de ruido interior en vehículos de alta velocidad. Gráfica adaptada de Patsouras *et al.* (2002)

Desviaciones a este espectro se producirán debido al propio proceso de construcción del vehículo o por las condiciones reales de circulación (Patsouras, Fastl, Widmann y Hölzl, 2002)

Choi *et al.* (2011) analizó el espectro de interior de varios vehículos de alta velocidad circulando a diferentes velocidades. Calculó la relación del *loudness* y el nivel de presión sonora ponderado A de los vehículos y concluyó que el *loudness* del sonido interior aumenta más rápidamente con el aumento de velocidad que el nivel de presión sonora ponderado A, como muestra la figura 2.8. Este hecho puede ser explicado por el incremento en bandas altas de frecuencia, por encima de 500Hz que afectan de diferente manera al *loudness* y al nivel presión sonora ponderado A.

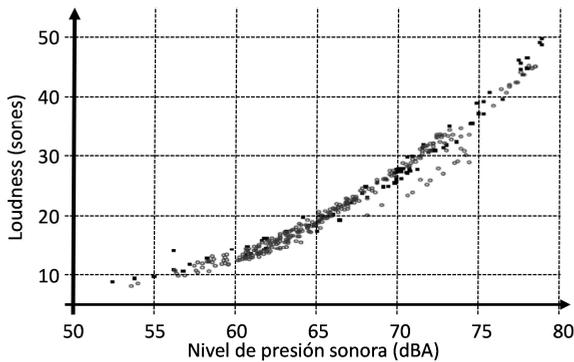


Figura 2.8: Relación entre *loudness* y el nivel de presión sonora ponderado A de dos vehículos. Gráfica adaptada de Choi *et al.* (2011)

Choi *et al.* (2011) encontró diferencias en las variables psicoacústicas comparando el contenido en frecuencia de varios vehículos de alta velocidad a diferentes velocidades. En uno de los vehículos la presión sonora aumentaba con la velocidad en todo el rango de frecuencias. Sin embargo en otro de los vehículos, había un rápido incremento de la componente a altas frecuencias cuando el vehículo alcanzaba los 300 km/h. Este aumento de presión en las altas frecuencias hace que el *loudness* y el *sharpness*

calculado a altas velocidades aumenten en este vehículo más y que el nivel de presión sonora ponderado A se mantenga más bajo.

Desde el punto de vista del pasajero, en un estudio de Poisson, Dubois *et al.*, (2011) con la colaboración de veinte pasajeros que identificaron eventos que provocaban disconfort acústico, se clasificaron y caracterizaron dichos eventos según la descripción propia que realizaba el pasajero y las medidas acústicas del sonido. En la tabla 2.2 se muestran los datos recogidos en dicho estudio.

Tabla 2.2: Eventos que provocan disconfort y su incremento respecto al valor promedio (sound/noise differential) y $L_{AEQ T}$ (Poisson, Dubois *et al.*, 2011)

Eventos que provocan disconfort según los pasajeros	Incremento respecto al promedio en sones	Incremento respecto al promedio en LAEQ ((dB(A))
Sonidos sordos, rail, rueda	+5,2	+4,2
Sonido de la puerta cerrándose	+7,2	+8,2
Cruce repentino	+8,2	No hay emergencia
Mayor sonido dentro de un túnel	-3	No hay emergencia
Ruido muy molesto	+2	No hay emergencia

Hardy (2000), realizó una serie de recomendaciones para mejorar el confort acústico en el interior de los vehículos:

- Mejorar el sellado de puertas y pasillos.
- Optimizar el aislamiento del suelo.
- Reducir la transmisión de ruido por la estructura.
- Conseguir que no se produzcan picos en el espectro del sonido proveniente de la estructura.

Hardy (2000) afirma que estas mejoras deberían ser tenidas en cuenta en el proceso de diseño del vehículo y no cuando ya se ha construido, ya que alcanzar estas mejoras sería a costa de un gasto considerable.

2.3.3. Condiciones de medida de los vehículos

Como acabamos de describir, existen numerosas fuentes sonoras que afectan al ruido interior de los vehículos. El sonido emitido por cada una estas fuentes sonoras depende de numerosos factores que se deben tener en cuenta para definir las condiciones en que se debe medir el vehículo en función del objetivo de la medida.

En los trabajos de calidad sonora revisados, para la medida en el interior vehículos ferroviarios se han controlado principalmente los siguientes aspectos: la vía, la velocidad de circulación, eventos discretos del trayecto y las fuentes de ruido interior.

El control de la vía por la que circulan los vehículos es importante, ya que como hemos visto, una de las fuentes sonoras más relevantes es el ruido de la rodadura con la interacción rueda-carril. Las mediciones en los vehículos deben realizarse en la vía que normalmente utilice el vehículo (UNE-EN ISO 3381:2011). El tipo de vía y su estado de mantenimiento condiciona el sonido interior del vehículo (Parizet, Hamzaoui y Jacquemoud, 2002). Por ese motivo, la norma UNE-EN ISO 3381:2011 recomienda documentar el tipo y estado de la vía utilizada cuando se realicen registros de sonido en el vehículo.

La velocidad de circulación del vehículo es otro de los factores relevantes a tener en cuenta en la medición. Parizet *et al.* (2002) realizó mediciones en un vehículo de alta velocidad a diferentes velocidades (160, 220 y 300 km/h), en diferentes vías y en diferentes posiciones del vehículo. Posteriormente, mediante un *jury test* se obtuvo que la velocidad del vehículo era el factor que más afectaba a la percepción del sonido por parte de los sujetos. Si el objetivo de la medida es registrar el ruido de fondo, la velocidad se debe mantener constante, siguiendo la definición de Poisson, Dubois *et al.*, (2011).

En cuanto a los eventos discretos que ocurren durante la circulación, los túneles tienen un gran efecto sobre el ruido emitido y en el ruido interior del vehículo (Choi *et al.*, 2011), por tanto, las medidas del vehículo que se realizan en estas condiciones no serán representativas del trayecto. El lugar de ensayo para vehículos que circulen principalmente en campo abierto debe ser tal que el sonido radiado por el vehículo hacia el exterior contribuya al ruido interior solamente por las reflexiones desde la vía y no por las reflexiones desde edificios, paredes u objetos similares de gran tamaño fuera de la vía (UNE-EN ISO 3381:2011).

Finalmente, en cuanto a otros factores de interés, UNE-EN ISO 3381:2011 indica que el equipo auxiliar que funcione de forma permanente debe estar en funcionamiento mientras se realizan las mediciones y las puertas y ventanas de los coches deben de estar cerradas, a no ser que el objeto de estudio sea la influencia directa del estado de estos factores.

2.3.4. Posición de las mediciones dentro del vehículo

La posición del pasajero en el vehículo influye en su percepción sonora (Poisson, 1999), ya que el sonido medido en el interior de un vehículo puede variar considerablemente con la localización del punto de medición.

La UNE-EN ISO 3381:2011 indica que el número de puntos seleccionados debe ser tal que la distribución de nivel de sonido en el vehículo esté adecuadamente representada. Dicha norma propone de cinco a siete puntos de medición en cada uno de los coches.

Para la toma de medidas, no solo la posición en planta en el coche es importante. Según la posición del pasajero, la norma UNE-EN ISO 3381:2011 indica la altura y situación del micrófono dentro del coche:

- Posición de pie: Micrófono colocado a una altura de 1,6 metros por encima del suelo, en el centro de las zonas accesibles a los viajeros que estén de pie.
- Posición sentada: Micrófono colocado a una altura de 1,2 metros por encima del suelo del vehículo, en el centro de un compartimento cerrado y en el eje central del coche sin compartimentos y entre dos filas de asientos.

La norma UNE-EN ISO 3381:2011 también propone la situación del micrófono para la medición del ruido que percibe el maquinista. Concluye que la medida se debería realizar a nivel del oído, a una distancia de 0,1 metros del oído más expuesto del maquinista.

En el caso de que el vehículo estuviera compuesto por dos pisos, es necesario realizar la medición en cada piso. En el trabajo de Boulet *et al.* (2007) se realizaron las mediciones en ambos pisos en un dúplex TGV encontrado diferencias en el ruido interior de los diferentes pisos.

2.3.5. Instrumentación para registro de sonidos

En los estudios revisados, los instrumentos de registro de las señales sonoras que se han utilizado en el interior de los vehículos ferroviarios han sido los micrófonos y el maniquí acústico.

Aunque el uso de micrófonos y las grabadoras digitales (DAT) junto con técnicas para crear la imagen estéreo se han utilizado alguno de los estudios (Ayala Botto *et al.*, 2005; Boulet *et al.*, 2007), el maniquí acústico ha sido utilizado en un mayor número de ocasiones para el registro de señales binaurales en los estudios revisados (Parizet *et al.*, 2002; Letourneaux, Guerrand y Poisson, 2000; (Zhang, Liu, y Zhang, 2012) Yang *et al.* 2014).

El uso de micrófonos convencionales para el registro de sonido no es adecuado para una posterior reproducción y evaluación fiel del mismo. El motivo es que la información sobre el carácter tridimensional de la localización de la fuente de sonido respecto a la persona que lo escucha, así como la influencia de la señal en el aparato auditivo, son fundamentales en la percepción auricular normal del sonido y con el uso de micrófonos convencionales, estas condiciones son imposibles de captar.

Los seres humanos son capaces de localizar una fuente de sonido en tres dimensiones. La localización se produce de forma automática gracias a las diferencias entre ambos oídos del nivel y fase de la señal acústica porque el oído externo ejerce un filtrado de la señal acústica dependiente de la dirección de la fuente. El impacto de dicho filtro es consecuencia de una modificación de la difusión de las ondas sonoras mediante efectos de atenuación, desviación, reflexión y resonancia de las mismas. La geometría y anatomía de la cabeza, los hombros así como la influencia del pabellón auricular son de gran influencia en este fenómeno. Basado en esta capacidad de localización del oído

humano es posible que podamos discriminar fuentes sonoras concretas dentro de un sonido de fondo.

Por tanto, la escucha binaural no puede simularse simplemente sustituyendo los oídos con dos micrófonos, y solo consiguiendo las características del filtrado similares a las que ejercen la cabeza, hombros y oído es posible obtener un registro fiel del sonido. Por tanto, la forma más habitual de captar el sonido binaural es mediante un busto de un maniquí que tiene alojados unos micrófonos, en una reproducción lo más fiel posible de la forma del oído. Esto permite conseguir la captación de sonido de la misma manera que lo realiza el oído humano, con una distancia similar entre los puntos de recepción y a través de las cavidades y canales que forman el oído.

2.4. Evaluación de la percepción subjetiva del sonido: *jury test*

2.4.1. Métodos utilizados en *jury test*

Existen numerosos tipos de métodos para la evaluación de la percepción de sonidos, además de numerosas variaciones y modos de aplicación de dichos métodos. El objetivo de este apartado es describir los métodos más frecuentemente utilizados en *jury test* y que ofrecen los resultados más satisfactorios según los diferentes autores, clasificándolos en diferentes grupos para definir un marco de referencia. Mediante dichos métodos, los criterios a evaluar pueden ser cualquier atributo de sonido o la preferencia. Cuando los sonidos son molestos, como es el caso del ruido, la evaluación de la preferencia no es apropiada, en este caso, se recomienda utilizar la molestia como atributo a evaluar (Otto *et al.*, 2001).

En la descripción de los métodos se incluirán las características propias de cada uno, sus ventajas e inconvenientes así como el propósito de su aplicación. Dicha descripción se basa principalmente en la recopilación realizada por Otto *et al.* (2001), Nordtest (2002) y la información incluida en la especificación técnica ISO/TS 15666:2003 que trata sobre la valoración subjetiva de la molestia acústica.

Los métodos, según Nordtest (2002), se pueden clasificar, atendiendo a su frecuencia de utilización en los estudios publicados, en dos grupos: los métodos de evaluación directa y los métodos de comparaciones por pares. En los métodos de evaluación directa, se evalúa directamente la percepción de un sonido de manera independiente en una escala de valoración. En los métodos de comparaciones por pares, se evalúan el conjunto de los sonidos realizando comparaciones secuenciales por parejas de sonidos hasta tener evaluados todos los sonidos. También se han incluido en este apartado otras metodologías que no se englobarían dentro de estos grandes grupos pero que por su frecuente utilización se consideran de interés a la hora de establecer un marco de referencia metodológico.

2.4.1.1. Métodos de evaluación directa

De manera general, los métodos de evaluación directa están diseñados para dar una valoración de un sonido sin compararlo directamente con otros. La aplicación de los métodos de evaluación directa es muy frecuente en la evaluación de la percepción de sonidos en el ámbito ferroviario y de medios de transporte.

Estos métodos pueden utilizar escalas de diferentes tipos, los principales tipos de escalas utilizadas son:

- Continuas o discretas: En las escalas continuas no se restringe a la persona a dar un valor numérico concreto de su evaluación. En las escalas discretas, la persona debe seleccionar un nivel concreto dentro de los niveles propuestos.
- Numéricas o semánticas: Dentro de estas escalas, los niveles propuestos se describen bien con un valor numérico o bien con una categoría ordinal expresada de manera verbal.

- Unipolares o Bipolares: En las escalas unipolares, la escala muestra la intensidad de una característica y en las escalas bipolares, cada extremo de la escala muestra adjetivos opuestos. Como ejemplo de escala unipolar asociada a un sonido, tendríamos el nivel de molestias y como ejemplo de escala bipolar tendríamos parejas de adjetivos opuestos como, por ejemplo, débil en un extremo de la escala y fuerte en el otro extremo. En la evaluación del nivel de molestias en medios de transporte se recomienda el uso de escalas unipolares, ya que en numerosos estudios con escalas bipolares las evaluaciones se distribuyen entre el polo negativo (Muy molesto) y el neutro (Nada molesto), dejando inutilizado el tramo positivo de la escala (ISO/TS 15666:2003).

Existen multitud de métodos de evaluación directa, para proceder a su descripción se han separado según si se utiliza una escala numérica (Métodos de valoración escalada), si cada evaluador crea su propia escala (Métodos de *free magnitude estimation*) o si se utiliza una escala semántica (Métodos de escalas semánticas). Por último, se ha incluido en un apartado independiente la descripción de los métodos de semántica diferencial por su extensiva utilización en la evaluación subjetiva de la percepción.

2.4.1.1.1. *Métodos de valoración escalada (response (rating) scales)*

Dentro de estos métodos se engloban aquellos en los que la evaluación de uno o varios atributos del sonido se realiza a través de una escala numérica.

Generalmente, en la aplicación de éstos, los participantes evalúan cada sonido para un atributo determinado asignándoles un valor dentro de una escala. Son métodos de evaluación rápidos y de sencilla implementación. Generalmente, los sonidos son presentados al evaluador de manera secuencial, sin posibilidad de repetición.

Las escalas utilizadas para este tipo de test pueden ser continuas o discretas. Dentro de este tipo de métodos, Nordtest (2002) recomienda el uso de las escalas continuas presentadas al evaluador marcando solo los extremos de la escala sobre una recta y sin representar los niveles intermedios, evitando así la tendencia del evaluador a marcar números específicos de la escala propuesta. Además, estas escalas pueden presentarse con los extremos abiertos de manera que se permita la evaluación de sonido por arriba o por debajo de los extremos marcados.

Las escalas numéricas discretas pueden ser utilizadas con diferentes niveles. Los niveles más comunes son 5, 7, 9 y 11. Las evaluaciones en una escala de 0 a 10, escala con 11 niveles, es la forma común de evaluar frente al uso de escalas más cortas de 7, 9 ó 10 niveles, según ISO/TS 15666:2003.

La aplicación de estas escalas tiene la ventaja que son más rápidas y sencillas (Otto *et al.*; 2001) que la utilización de escalas continuas durante la evaluación y también más rápidas de tratar tras el test, pero no permiten que el evaluador puntúe con valores entre los niveles definidos.

Las evaluaciones en una escala de 0 a 10 son una forma familiar de evaluar según ISO/TS 15666:2003. Adicionalmente, este tipo de métodos evita sesgos debidos a la interpretación, al limitar al máximo el número de palabras. Según Nordtest (2002) otra

ventaja de estos métodos es que si se utilizan escalas continuas y con extremos abiertos, no limitan al usuario en sus puntuaciones.

Sin embargo, para este tipo de métodos, Otto *et al.* (2001) identifica inconvenientes ligados a la dificultad de utilización de los mismos con evaluadores inexpertos debido a los siguientes motivos:

- La respuesta numérica no es una forma natural de reflejar la impresión que tiene un evaluador de un sonido. Por ejemplo, de manera natural cuando una persona escucha un sonido de un motor lo describiría como fuerte, que ruge, potente pero no lo describiría naturalmente si su nivel de molestias es un 3 o un 6 en una escala del 1 al 10.
- Cada sujeto interpreta las escalas de manera diferente. Mientras unos sujetos se limitan a utilizar solo una zona de la escala otros utilizan la escala completa para valorar sonidos.
- Los extremos de la escala normalmente no son utilizados por los evaluadores. Si la evaluación de los sonidos es secuencial, los evaluadores evitan valorar sonidos cerca de los extremos en previsión de que sonidos aun por evaluar sean más extremos que los sonidos evaluados hasta el momento.
- No hay ninguna razón para pensar que valoraciones en un intervalo arbitrario puedan correlacionarse con medidas objetivas. Mientras la tendencia puede ser común entre medidas objetivas y subjetivas, se necesita que las evaluaciones subjetivas sean proporcionales a la medida objetiva. Esto raramente se consigue con escalas de evaluación directa.

El uso de los métodos de evaluación directa se encuentra en multitud de los trabajos revisados, por ejemplo:

El tipo de escala de 0 a 10, tal y como indica la especificación técnica ISO/TS 15666:2003, fue utilizada para el estudio de la relación del *loudness* con la Molestia sonora en tranvías, camiones y autobuses (Kaczmarek *et al.*, 2006).

Boullet *et al.*, (2007) utilizó este tipo de métodos para estudiar el confort acústico dentro de un vehículo, utilizando una escala de 0 a 7, donde 0 representa molestia nula y 7 molestia extrema.

Para estudiar el sonido ambiental en un vehículo de alta velocidad japonés se utilizó un método similar con escala de 0 a 7, donde 0 es muy suave y 7 muy molesto (Kuwano *et al.*, 2004). En este mismo estudio, también se evaluó el alboroto de las conversaciones (dentro del vehículo) mediante una escala de 0 a 5, donde 0 era ningún alboroto y 5 mucho alboroto.

2.4.1.1.2. *Métodos de free magnitude estimation*

En estos métodos los evaluadores asignan a cada sonido un número del atributo a evaluar. Generalmente no hay límite en el rango de números que el evaluador puede utilizar. Se podría decir que este método es un método de valoración escalada, con la diferencia que no hay referencias en la escala.

Ejemplos de aplicación de este método en el ámbito de acústica ferroviaria de alta velocidad son el trabajo de Patsouras *et al.*, (2002) para medir la tonalidad percibida por los evaluadores y el de Bouillet *et al.* (2007) para la evaluación del ruido de fondo y señales emergentes.

El principal inconveniente de este método es que cada evaluador podría estimar una magnitud muy diferente si no son evaluadores muy entrenados (Otto *et al.*, 2001). Esta variabilidad entre evaluadores en ocasiones es controlada mediante un sonido de referencia al que se le asigna una magnitud fija, por ejemplo, 100 y se referencia respecto a esa magnitud el resto de evaluaciones. En otros trabajos (Yost, 1996; Shrivastav, Eddins y Anand, 2012), se emplean dos sonidos de referencia, uno al que se le asigna el valor 0 de la escala y otro al que se le asigna el máximo valor de la escala.

Otra forma de controlar la variabilidad es tener un sonido de referencia pero sin magnitud fija y realizar las comparaciones de resto de sonidos respecto a éste, convirtiéndose así en una variante dentro de los métodos de comparaciones por pares.

2.4.1.1.3. Métodos de escalas semánticas

Dentro de estos métodos se engloban aquellos en los que la evaluación de uno o varios atributos del sonido se realiza a través de una escala semántica o verbal. Las escalas semánticas son escalas discretas pero, a diferencia de las escalas numéricas discretas, en estas escalas el evaluador ubica su respuesta en el lugar que corresponde a una de las categorías de la escala. El usuario conoce el sentido atribuido a cada una de las categorías, ordenadas de manera progresiva según la intensidad del atributo. Las respuestas en estas categorías ordenadas de manera progresiva, son, generalmente, convertidas de manera posterior en escalas numéricas asignando a cada categoría un valor numérico para el análisis de las respuestas. Por ejemplo, para valorar si un sonido es molesto una escala de este tipo sería *Nada en absoluto* (1), *nada* (2), *algo* (3), *muy* (4), *extremadamente* (5), asociando a cada respuesta el número entre paréntesis para su tratamiento posterior.

Al ser escalas discretas, estos métodos tienen la ventaja de la rapidez junto a la facilidad de interpretación de la escala al estar acompañada de descriptores de cada nivel (ISO/TS 15666:2003). Los inconvenientes principales son que no permiten que el evaluador puntúe con valores entre los niveles definidos y la alta dependencia de las diferencias culturales de los evaluadores que pueden realizar una interpretación diferente de la escala y dificultar la aplicación del método en otros países (ISO/TS 15666:2003).

Como ejemplo de utilización de una escala semántica bipolar en el sonido de vehículos de alta velocidad en el trabajo de Yang *et al.* (2012) se utiliza la escala de calidad sonora “*Very Terrible*”, “*Terrible*”, “*Very Bad*”, “*Bad*”, “*Not Bad*”, “*Acceptable*”, “*Satisfied*”, “*Better*”, “*Good*”, “*Very Good*” y “*Extremely Good*”. Un ejemplo de escala unipolar semántica lo encontramos en el estudio comparativo de las molestias creadas por el tráfico de carretera frente a las molestias creadas por el tráfico ferroviario. En este trabajo se evaluó la molestia mediante una escala verbal unipolar de 5 puntos, “*not at all*”, “*slightly*”, “*moderately*”, “*very*” y “*extremely*”, (Ma y Yano, 2005). En la misma línea, pero sin ser un estudio donde la fuente sonora es un vehículo sino “conversaciones irrelevantes”, se ha estudiado la molestia, mediante una tarea de

escucha, con preguntas del tipo “*How difficult was the performance of this test? How demanding was the test? How disturbing were the background sounds? How annoying were the background sounds? How good could you concentrate on the task?*” y con un rango de respuestas escaladas de 4 puntos, *extraordinary* = 4, *fairly* = 3, *moderate* = 2, *hardly*=1, *not at all* = 0 (Vorländer, 2006).

Las escalas discretas, tanto la verbal como la numérica, como se ha comentado anteriormente, limitan en mayor o menor medida la respuesta del usuario ya que el rango de respuestas está acotado. Para evitar este efecto, Kasper *et al.* (2005) propone la combinación de ambos métodos mediante escala de categorías. Este método fue utilizado para estudiar la calidad del ruido creado por maquinas eléctricas. Se dividió una escala numérica que iba del 0 al 50 en cinco niveles: *very pleasant* (de 0 a 10), *pleasant* (de 10 a 20), *medium* (de 20 a 30), *unpleasant* (de 30 a 40) y *very unpleasant* (de 40 a 50). El sujeto debía indicar en qué grado el adjetivo se adaptaba más al sonido y después puntuarlo de 0 a 10.

2.4.1.1.4. Métodos de semántica diferencial

Estos métodos permiten la evaluación rápida de múltiples atributos de los sonidos (Otto *et al.* 2001). Los sujetos evalúan sonidos según diferentes descriptivos de los mismos, generalmente utilizando escalas bipolares de un adjetivo y su antónimo. Los descriptores generalmente utilizados son atributos del sonido (bajo/alto, suave/rugoso) o impresiones sobre el producto o fuente que emite el sonido (caro/barato, potente/débil).

La selección de los descriptores debe ser acorde a la aplicación evaluada. Esta selección puede realizarse de diferentes formas. Una muy común para bienes de consumo es la búsqueda de descriptores en periódicos, revistas o catálogos publicitarios. Otra forma es a través de técnicas tipo “*focus groups*” o grupos de discusión de usuarios de ese producto. Es importante evitar los descriptores utilizados por los diseñadores, ingenieros o expertos de ese producto ya que los usuarios del producto no estarán familiarizados con esos términos. Además, en la selección de descriptores hay que tener en cuenta las diferencias culturales entre las diferentes localizaciones geográficas de los evaluadores.

A la hora de optimizar la evaluación y evitar medir dos veces el mismo fenómeno es importante seleccionar parejas de descriptores no correlacionadas entre sí, como por ejemplo silencioso/ruidoso y bajo/alto. Este hecho es importante ya que se recomienda un número de descriptores entre 8 y 12.

Generalmente, la semántica diferencial utiliza una escala discreta. Una de las escalas más relevantes y que se utiliza con más frecuencia en semántica diferencial es la escala de Likert. Esta escala desarrollada por Rensis Likert y consiste en un conjunto de juicios relativos al objeto a evaluar (se entiende por juicio la expresión de creencias, sentimientos y/u opiniones positivos o negativos del usuario). Los juicios se presentan en forma de afirmaciones para medir la reacción del encuestado en 4, 5, 7 o 9 categorías. Las categorías se ordenan yendo de la más favorable a la más desfavorable, siendo el valor medio el neutral (Likert, 1932).

Este método, con una adecuada selección de descriptores, permite caracterizar de manera completa y rápida una muestra de sonidos. Como principal inconveniente, destacar su alta dependencia de las diferencias culturales de los evaluadores que pueden realizar una interpretación diferente de la escala y dificultar la aplicación del método en otros países.

Ejemplo de semántica diferencial es el estudio de confort acústico ferroviario en el que se valoraban varios atributos utilizando una escala de intensidad que medía sensaciones tales como: *annoying, intrusive, relaxing, pleasant*, mediante siete preguntas del tipo: *How annoying did you perceive the sound?* (Möller y Wahlström, 1997).

2.4.1.2. Métodos de comparaciones por pares

En los métodos de comparaciones por pares, los sonidos son presentados por parejas para la evaluación de atributos del sonido, la preferencia o la molestia. En estos métodos cada sonido es comparado de manera sucesiva con todo el resto de sonidos, por tanto el número de evaluaciones a realizar es de $n \cdot (n-1) / 2$ siendo n el número de sonidos a evaluar. Debido al alto número de evaluaciones necesarias, generalmente, este método se utiliza para la evaluación de un único atributo en cada test.

El resultado de la comparativa de cada pareja puede ser elegir uno de los sonidos frente al otro en función del atributo a evaluar o indicar, mediante una escala, la diferencia entre los dos sonidos también en función de dicho atributo. Una vez realizadas todas las comparaciones, la utilización de cuestionarios de comparaciones por pares permite representar la percepción de la evaluación de los sonidos en una escala ordinal sin que se obtenga información de la ubicación de los sonidos de manera directa en una escala determinada. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, a partir de una comparación pareada, puede inferirse una escala de intervalos bajo ciertas hipótesis probabilísticas (Rossi, Crenna y Panero, 2005).

Estos métodos permiten dar a los participantes la habilidad de detectar pequeñas diferencias entre sonidos para el atributo evaluado (Nordtest, 2002). Hay que destacar que numerosos estudios avalan el éxito de las comparaciones pareadas (Otto *et al.*, 2001).

Otra de las ventajas de este método, identificadas por Otto *et al.* (2001), es que se considera una forma fácil de juzgar para sujetos no entrenados, ya que las comparaciones son la forma más natural de realizar una evaluación. Como las evaluaciones son siempre entre dos sonidos, el evaluador no toma decisiones en base a los sonidos que quedan por evaluar, evitando los problemas de la falta de uso de la escala que presentan los métodos de evaluación directa.

Por el contrario, el principal inconveniente de los métodos de comparaciones por pares es que la duración del test se incrementa considerablemente con el número de sonidos a evaluar. Este hecho hace que la evaluación pueda ser tediosa si el número de sonidos es elevado o si la duración de los estímulos sonoros es larga. Este inconveniente puede ser mejorado si se utiliza un diseño incompleto de bloques. Esta técnica puede funcionar adecuadamente solo en el caso que se seleccionen las parejas de manera apropiada. La mejor manera de hacerlo es de manera adaptativa, seleccionado la siguiente pareja a evaluar en función de los resultados existentes (Otto *et al.*, 2001).

Los métodos de comparaciones por pares se pueden utilizar con otros objetivos diferentes a la evaluación de ciertos atributos de los sonidos. Los dos ejemplos más frecuentes de dichas aplicaciones diferentes son:

- **Similitud mediante comparaciones pareadas:** Los sonidos son también presentados en parejas, pero en vez de elegir uno de los sonidos, se estima la similitud de éstos. Se realiza marcando en una línea sin escala, en donde los extremos son “muy similar” y “nada similar” (Otto *et al.*, 2001). Todas las posibles parejas son evaluadas de esta manera, después de la evaluación se transforman las valoraciones a una escala, generalmente de 0 a 10, mediante una rejilla situada sobre la línea. Este test suele utilizarse para determinar cómo de bien discriminan los sonidos los evaluadores. Este método combinado con técnicas de escalado multidimensional y clusterización puede ayudar a determinar las dimensiones perceptuales que subyacen a la evaluación de los sonidos por parte de los evaluadores (Otto *et al.*, 2001).
- **Detección mediante comparaciones pareadas:** Es una implementación particular de las comparaciones por pares donde el evaluador tiene que indicar cuál es el sonido que contiene una determinada señal. Este tipo de test, se utiliza generalmente para el cálculo de umbrales de detección de ciertos fenómenos (Otto *et al.*, 2001).

Los métodos de comparaciones por pares son ampliamente utilizados en el ámbito de acústica de vehículos ferroviarios. Podemos encontrar varias aplicaciones de los métodos de comparación por pares en un estudio psicoacústico que llevó a cabo Patsouras *et al.* (2002) para evaluar los sonidos típicos de los vehículos de alta-velocidad. El método se utilizó para medir la calidad sonora, comparando entre pares de sonidos. Los sujetos tenían que valorar la calidad acústica: “la calidad sonora de B es mucho mejor (+++), mejor (++),...que la de A”. En el mismo estudio se aplica el método de similitud mediante comparaciones pareadas para medir el nivel de discriminación entre sonidos. En este, se preguntó a los participantes si encontraban diferencias entre ambos sonidos y, en caso afirmativo si era grande la diferencia.

Otra aplicación del método de comparación por pares que sigue la misma línea, aunque con ciertas diferencias, es el que utilizó Parizet *et al.* (2002) para evaluar la percepción de agrado en función de cambios en los valores de los parámetros psicoacústicos de sonidos de vehículos. El método contaba con una escala de 5 niveles comparativos (desde A mucho más que B hasta A mucho menos que B).

Este método también se ha utilizado para el estudio del confort acústico en vehículos de alta velocidad de SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français), donde se preguntaba únicamente por el sonido más agradable del par comparado (Letourneaux *et al.*, 2000). Otro autor, Hogstrom (2002), estudió con esta misma metodología, la molestia percibida originada por los sistemas de aire acondicionado en vehículos ferroviarios.

Para la detección de umbrales, Patsouras *et al.* (2002) utilizó el método de comparaciones pareadas con el objetivo de cuantificar cuánto tiene que sobresalir una componente tonal para ser percibida en un sonido típico de vehículo de alta velocidad.

Fuera del ámbito ferroviario, González *et al.* (2003) llevó a cabo un estudio que se centró en la utilización de sistemas de Control Activo del Ruido (ANC) para la mejora de la psicoacústica en general. Para comprobar que esta técnica era útil se hizo un estudio comparativo del “Confort y Tranquilidad” donde se comparaba un sonido sin aplicar ANC con el mismo sonido aplicando ANC. Si el segundo era percibido mejor que el primero se evaluaba la diferencia con escala de 1 a 5, si por el contrario era peor se evaluaba de -1 a -5.

2.4.1.3. Método de ordenación en rango

A los evaluadores se les solicita ordenar sonidos de 1 a N basándose en algún criterio de evaluación (preferencia, molestia, magnitud, etc.). Con este método, los sujetos tienen la opción de escuchar un sonido las veces que ellos quieran. Sin embargo, debido a que la complejidad crece con el número de combinaciones posibles, este método suele utilizarse con pocos sonidos, generalmente 6 o menos. La mayor desventaja del método es que no recoge información escalada (Otto *et al.*, 2001).

2.4.2. Selección de los atributos a evaluar

Los adjetivos más utilizados en el campo de la calidad sonora en vehículos ferroviarios, son Molestia / “*Annoyance*” (Boullet *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2011; Kaczmarek *et al.*, 2006), el Agrado / “*Pleasant*” y el Desagrado / “*Unpleasant*” (Letourneax *et al.*, 2000; Klemenz y Vorländer, 2005; Vorländer, 2006). También es habitual evaluar la preferencia (Pariziet *et al.*, 2002) y el nivel de ruido (Choi *et al.*, 2011).

Asimismo encontramos trabajos donde se evalúa la calidad sonora directamente de vehículos de alta velocidad mediante comparaciones por pares utilizando los términos mejor o peor (Zhang *et al.*, 2012) o por escalas semánticas donde cada sonido se evalúa a través de una escala semántica “*Very Terrible*”, “*Terrible*”, “*Very Bad*”, “*Bad*”, “*Not Bad*”, “*Acceptable*”, “*Satisfied*”, “*Better*”, “*Good*”, “*Very Good*” y “*Extremely Good*” (Yang *et al.*; 2012).

Ejemplos, de otros atributos utilizados son suave (Kuwano *et al.*, 2004) y *annoying*, *intrusive*, *relaxing* y *pleasant* (Möller y Wahlström, 1997).

Mzali *et al.* (2000) llevó a cabo un estudio para analizar el confort acústico en el transporte ferroviario y averiguar la semántica que utilizaban los pasajeros para referirse al mismo analizando cuestionarios abiertos y distribuyendo las respuestas por la procedencia del sonido (de otros pasajeros o propios del tren) en: “*pleasant*”, “*unpleasant*”, “*annoying*” o “*indifferent*” noise. Las preguntas realizadas en dicho estudio eran del tipo: *What is important for the comfort of a train?* Las respuestas obtenidas mostraron que la palabra “*annoying*” o molesto, es el término más utilizado para ruidos causados por otros pasajeros, mientras que el término desagradable o “*disagreeable*” se aplica más para términos relacionados con sonidos procedentes del tren. Zeitler y Hellbrück (2001) realizaron un estudio semántico de la percepción del sonido en general mediante semántica diferencial, obteniendo un conjunto de factores que agrupan los atributos del sonido que definen sus características principales. Los resultados obtenidos fueron:

- Factor "*evaluation*": *ugly-beautiful, pleasant-unpleasant, calming-agitating, boring, exciting, gentle-harsh, pure-impure, soft-hard.*
- Factor "*timbre*": *dark-light, low-high, muffled-shrill, light-heavy.*
- Factor "*power*": *weak-strong, soft-loud, flat-rumbling.*
- Factor "*temporal change*": *steady-unsteady, smooth-rough.*

2.4.3. Selección de los evaluadores

A partir de los artículos revisados se han resumido las principales recomendaciones generales para una selección adecuada de los evaluadores, en cuanto a sus características, número y entrenamiento necesarios.

2.4.3.1. Perfil de los evaluadores participantes en jury test

Nordtest (2002) y Otto *et al.* (2001) identifican dos grupos diferentes de evaluadores según su experiencia, los evaluadores expertos y los no expertos. Un evaluador experto suelen ser parte del equipo de trabajo que diseña, fabrica o testea el producto fuente de este sonido y es capaz de evaluar atributos de los sonidos que evaluadores no expertos no serían capaces.

Los evaluadores no expertos son seleccionados, normalmente, por ser un grupo representativo de compradores o usuarios potenciales del producto a evaluar. La población de los sujetos escogidos debería ser representativa de esa determinada población teniendo en cuenta características como la edad, género, estatus económico, etc...(Nordtest, 2002).

Por otra parte, los sujetos que participan en el *jury test* no deberían tener ningún problema auditivo (Otto *et al.*, 2001). Kaczmarek *et al.* (2006) indica que se tiene una audición normal siempre que se cumpla un umbral de audición de 20 dB para un rango de frecuencia comprendida entre 250 y 8000 Hz, de acuerdo con ANSI S3.6:1996.

Según Nordtest (2002), las personas que están relacionadas con el producto tales como técnicos o diseñadores no deberían participar en el test, si se desea evaluadores no expertos. En caso de que participaran como sujetos, sus respuestas deberían ser comparadas con resultados de otra población para evaluar si las preferencias de estos sujetos pueden ser consideradas como representativas de un grupo de sujetos no sesgados. En otros casos, puede ser más conveniente elegir un conjunto de sujetos expertos, ya que ellos serán probablemente más sensibles a la hora de apreciar más en detalle las diferencias entre los sonidos (Lyon, 2003).

En general, en los estudios revisados, la edad de los sujetos estaba comprendida entre 20 y 45 años, con una media de edad inferior a 30 años (Patsouras *et al.*, 2002). Aunque la edad de los sujetos de ensayo queda condicionada por la edad característica de los usuarios de producto (Otto *et al.*, 2001), se ha observado que en algunos estudios de calidad sonora en vehículos de alta velocidad la muestra de evaluadores no es representativa, ya que se utiliza población muy joven o estudiantes por la facilidad de reclutarlos para la evaluación (Pariziet *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2014).

En general, el número de participantes según el género está equilibrado (Kuwano *et al.*; 2004; Ma y Yano; 2005). En algunos de los estudios examinados hay una tendencia a utilizar más hombres que mujeres (Gonzalez *et al.*, 2003) y otros ni siquiera especifican la distinción de géneros (Boullet *et al.*, 2007; (Patsouras *et al.*, 2002); (Kasper *et al.*, 2005) Klemenz y Vorländer, 2005).

2.4.3.2. Número de evaluadores participantes

El número de evaluadores por sonido es un factor muy importante, por ello la muestra tiene que ser lo suficientemente grande como para asegurar la estabilidad estadística¹³ según los objetivos del estudio. En la tabla 2.3 se incluye el número de evaluadores que deberían participar según las recomendaciones de los estudios que sirven de guía para la realización de *jury test*.

Tabla 2.3: Recomendaciones del número de evaluadores

Fuente	Número de evaluadores
Nordtest, 2002	16 a 32
Lyon, 2003	25 a 30
Otto <i>et al.</i>, 2001	25 a 50

Por último, hay que tener en cuenta que no todos los sujetos que participan en la evaluación tienen la misma capacidad para identificar los atributos de los sonidos con la misma precisión.

Otto *et al.* (2001) afirma que alrededor del 10 % de los evaluadores previsiblemente tendrán baja fiabilidad. En el trabajo Zhang *et al.*, (2012), para garantizar la fiabilidad de los resultados se eliminaron las evaluaciones de tres evaluadores de los veinte que participaron en el estudio ya que tenían menos consistencia en sus evaluaciones. Para identificarlos, se utilizó el coeficiente de concordancia de Kendall (W)¹⁴ para el método de comparaciones por pares y se eliminó a los evaluadores que tuviesen un coeficiente inferior a 0,7.

2.4.4. Recomendaciones sobre la duración del test, número y presentación de estímulos

La duración de un test dependerá principalmente el método de evaluación subjetiva utilizado, del número de sonidos a evaluar y del tiempo de escucha de los sonidos.

¹³ Confiabilidad de la estimación. Para un mismo tamaño de muestra, el valor de la valoración del sonido obtenido no debe variar dependiendo de la muestra de sujetos elegida, esto es, que el tamaño del intervalo de confianza de la media sea aceptable para el objeto de la experimentación.

¹⁴ El coeficiente de concordancia de Kendall (W de Kendall) es una medida del acuerdo entre diferentes evaluadores. Si el estadístico W es igual a 1, entonces, todos los evaluadores han sido unánimes. En caso de de W sea 0, no existe una tendencia general o acuerdo entre los mismos.

En el caso que el método exija que un mismo evaluador evalúe la muestra completa de sonidos, el número de sonidos empleados en cada sesión de evaluación dependerá del número de sonidos que compongan la muestra considerada representativa de ese producto o proceso (Otto *et al.*, 2001).

Según Nordtest (2002) el máximo tiempo para cada sesión es función de la complejidad de las características del test, pero debería ser menor de 20 minutos. Otto *et al.* (2001) recomienda que la duración del test esté comprendida entre 30 a 45 minutos.

Nordtest (2002) recomienda que, en caso de realizarse varias sesiones en el mismo día, la duración total de las sesiones de escucha no debería exceder de 2 horas. Cuando se efectúen varias sesiones diarias, al finalizar cada sesión debería realizarse una pausa de, aproximadamente, la misma duración que la sesión.

En cuanto a la duración de los estímulos, Nordtest (2002) recomienda que ésta sea suficiente para dar una impresión estable del producto o proceso cuyo sonido está siendo evaluado, pudiendo ir desde unos pocos segundos a uno o dos minutos de duración. Sin embargo, indica que una duración del sonido mayor de dos minutos es raramente necesaria para la correcta evaluación. Otto *et al.* (2001) recomienda una duración de los estímulos de 3 a 5 segundos si el sonido es de carácter estable. En los artículos examinados, la duración de la mayoría de muestras es inferior a 14 segundos.

En los *jury test* correspondientes al sonido en el interior de vehículos ferroviarios se han utilizado entre 15 a 30 registros, cuya duración ha sido de 4 y 10 segundos respectivamente (Boullet *et al.*, 2007; Parizet *et al.*, 2002). Otros *jury test*, como son los correspondientes a sonidos en automóvil o maquinaria, el número de sonido no ha sido superior a 22 (González *et al.*, 2003), mientras que han tenido una duración entre 4 y 14 segundos (Kasper *et al.*, 2005; González *et al.*, 2003). No se observó ninguna relación entre el número de registros utilizados y la duración de cada uno de ellos.

Según Nordtest (2002), la duración de las pausas entre muestras para la evaluación del sonido será inferior a un segundo en el caso de comparación entre pares mientras que las pausas entre muestras mediante la utilización test de semántica diferencial, donde se evalúa un sonido según una serie de atributos, serán de al menos 10 segundos. Estos tiempos son orientativos puesto que varios autores han utilizado distintas duraciones en las pausas. Patsouras *et al.*, (2002) utilizó pausas con una duración de 2 segundos con el método de comparación de pares, y Möller y Wahlström (1997) utilizaron 30 segundos en un *jury test* con escala semántica.

2.4.5. Entornos y equipos de escucha

Según Otto *et al.* (2001), la habitación en donde se realizan los test debería ser confortable para el evaluador. La apariencia de la habitación debería ser natural: cuanto mayor sea la sensación de frialdad en la habitación, los evaluadores experimentarán mayor aprensión y ansiedad. Por este motivo, el mobiliario y las paredes deberían tener colores neutros.

Otto *et al.* (2001) y Rossi *et al.* (2005) recomiendan recrear un ambiente similar al entorno en que se realizaron el registro de los sonidos.

Hay que tener especial precaución con el ruido ambiental, evitando fuentes de ruido tales como aire acondicionado, ventiladores de los equipos informáticos y luminarias (Otto *et al.*, 2001) especialmente cuando la escucha se realiza mediante altavoces.

La luz en la habitación debe de ser la adecuada. Una luz demasiado tenue podría reducir la atención del evaluador de la tarea deseada, especialmente durante sesiones de larga duración o monótonas (Otto *et al.*, 2001). De acuerdo con Otto *et al.*, (2001) y con lo establecido en la norma UNE-EN 13725:2004, es preferible la luz artificial que la luz natural.

Respecto a las condiciones térmicas requeridas, la habitación tiene que estar a una temperatura de confort alrededor de 23°C y entre 45% y 55% de humedad relativa (Otto *et al.*, 2001). Además, no deben producirse olores persistentes que puedan afectar a los sujetos (Otto *et al.*, 2001; UNE-EN 13725:2004).

La silla que utilicen los evaluadores debería ser confortable y no debería haber ningún tipo de objeto o situación que pudiera provocar posibles distracciones (Rossi *et al.*, 2005).

En cuanto a cómo obtener/reproducir el sonido, en los estudios analizados las grabaciones se realizan normalmente de forma binaural para asemejarse más a la realidad, aunque algunos autores han utilizado grabaciones monoaurales (Hardy, 2000). El método de reproducción de sonidos puede ser mediante altavoces o auriculares.

En este sentido, los auriculares son el sistema que más se utiliza. El uso de auriculares asegura que cada evaluador oye el mismo estímulo bajo las mismas condiciones que el resto. Los auriculares pueden ser calibrados y ecualizados para que su respuesta sea equivalente. Además, no son influenciados por las propiedades acústicas de la sala o por la posición del sujeto (Otto *et al.*, 2001), por tanto la infraestructura necesaria para la realización de un *jury test* se simplifica, debiendo tener en cuenta solo los requisitos anteriormente recomendados del entorno de escucha.

No obstante, surge un inconveniente con el uso de auriculares debido a un fenómeno relacionado con baja frecuencia. La percepción del cuerpo cobra importancia en las muy bajas frecuencias, provocando que los sujetos aprecien diferencias entre el sonido real y el registrado. El uso de auriculares no permite esta evaluación tal y como indica de Pariziet y Mouret (2002) según las conclusiones extraídas de un estudio de ruido interior de camiones. Una forma de atenuar este fenómeno sería la utilización de subwoofer (Otto *et al.*, 2001).

Sin embargo, para los sonidos de vehículos ferroviarios de alta velocidad, según las conclusiones de propio Pariziet *et al.* (2002) no parece necesario la utilización de un subwoofer. En este trabajo, los estímulos a evaluar eran sonidos de vehículos de alta velocidad, y los resultados de la preferencia fueron muy similares entre realizar la escucha con la utilización de solo auriculares o realizarla con auriculares y subwoofer. El mismo autor, en su estudio anterior de sonidos en el interior de camiones (Pariziet y Mouret, 2002), afirmaba que el uso del subwoofer aumentaba el realismo. La diferencia entre el estudio realizado con vehículos y el realizado con camiones por el mismo autor puede ser debida a que, en este último estudio, el *loudness* de los sonidos era mucho mayor.

Otro problema del uso de auriculares es la posible percepción de disconfort en aquellos sujetos que no están acostumbrados a su utilización (Rossi *et al*, 2005). Por ello, los auriculares tienen que ser confortables para no restar concentración durante la prueba.

El uso de altavoces presenta otras desventajas que no aparecen con la utilización de los auriculares. La presentación del mismo estímulo a todos los sujetos es difícil debido a que el tipo de altavoz, las características de la sala, el ruido de fondo y la posición del sujeto en su interior influyen en la percepción del sonido. Para una adecuada reproducción, la sala debería cumplir con lo especificado en la norma ISO 3745:2003, por tanto el control de las características de sala y de los parámetros de reproducción complica el acondicionamiento de un espacio para la evaluación.

Un ejemplo es el trabajo de Ma y Yano (2005) que realizó el *jury test* mediante altavoces en una sala anecoica. El registro sonoro era el ruido procedente de vehículos ligeros en el exterior. En el ensayo, para cada sesión, tres sujetos realizaban al mismo tiempo el test situados a una distancia de 3 metros del altavoz y a 0,8 metros entre ellos. La posición de los sujetos dentro de la habitación y la posición relativa entre el sujeto y los altavoces fueron optimizadas después de la monitorización de la habitación con un maniquí acústico capaz de registrar señales binaurales. Otto *et al.* (2001) recomienda utilizar esta técnica cuando los registros se hayan realizado en un campo libre de reflexión cuya fuente sonora no esté espacialmente distribuida.

2.5. Estado del arte en calidad sonora de vehículos ferroviarios de alta velocidad

A finales de los años noventa comienzan a aparecer los primeros estudios relevantes sobre confort acústico, tanto en la caracterización física como en la psicoacústica de vehículos de alta velocidad (Widmann y Holzl, 1997; Letourneaux, Guerrand y Poisson, 1998). Es al comienzo de los años 2000 cuando comienzan a aparecer las primeras publicaciones científicas relevantes de calidad sonora en el ámbito de los vehículos ferroviarios (Hardy, 2000; Letourneaux *et al.*, 2000) donde se combinan evaluaciones subjetivas y variables objetivas de los sonidos y se proponen parámetros psicoacústicos como mejores estimadores de la calidad sonora en el interior de vehículos ferroviarios frente a los parámetros físicos.

En el 2000, Hardy publica un estudio realizado con vehículos ferroviarios de British Railways, operador británico de ferrocarril, donde indica la dificultad de realizar medidas representativas y repetibles en vehículos ferroviarios (Hardy, 2000). Además, en el artículo se concluye que la presión sonora ponderada A, parámetro ampliamente extendido en este sector, no parece un buen estimador del confort acústico. El autor indica que los parámetros que tienen en cuenta el contenido espectral del sonido son más eficientes para evaluar la calidad sonora, aunque también indica que este estudio es demasiado simple para poder extraer conclusiones y no se centra en vehículos de alta velocidad.

El mismo año, Letourneaux *et al.* (2000) refieren que la SNCF, el principal operador francés de ferrocarril, ha comenzado investigaciones en la acústica de los vehículos de alta velocidad. En este trabajo se comenta que, durante muchos años, el confort acústico en vehículos ha sido caracterizado por parámetros físicos tales como el nivel de presión sonora, que pueden ser fácilmente medidos y comparados. Esta aproximación, según este mismo artículo, es demasiado restrictiva, ya que el confort acústico no puede ser evaluado solo con parámetros físicos, que no tienen en cuenta la percepción del pasajero ni las diferentes condiciones a bordo.

A partir de estas publicaciones se suceden otras durante los siguientes años con el objetivo de encontrar un indicador del confort acústico interior en vehículos ferroviarios de alta velocidad, empleando diferentes formas de abordar el problema.

Bajo esta perspectiva, podemos clasificar los estudios en dos grupos diferentes según si se aborda el objetivo de explicar el confort acústico a partir de variables psicoacústicas de manera global o parcial. Estas dos formas de afrontar el objetivo pueden ser complementarias. Hay autores que en primer lugar analizan el confort de manera global para, posteriormente, profundizar en aspectos concretos con un enfoque parcial (Pariziet *et al.*, 2002).

Los estudios que analizan el confort de manera global se centran en el ruido de fondo y en ellos se evalúa la percepción del sonido interior teniendo en cuenta todos las componentes que forman dicho ruido interior, evitando al máximo la pérdida de realismo del sonido evaluado respecto del sonido registrado (Pariziet *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2012). Generalmente, los estudios que abordan el problema de manera global respetan al máximo las características del sonido registrado sin interferir en sus

características, limitando el tratamiento de la señal sonora a una edición del sonido para dotarlo de una duración determinada y en ocasiones a un aumento o disminución del volumen del sonido al principio y al final de la reproducción, para conseguir una transición suave a la hora de evaluarlos.

Por otro lado, en los estudios en los que se intenta explicar el confort de manera compartimentada o parcial encontramos dos subgrupos: aquellos que dividen el problema del confort en el interior estudiando el confort de diferentes efectos concretos, como pueden ser determinar cómo afectan al confort las componentes tonales o la energía a ciertas frecuencias (intensidad) (Letourneaux *et al.*, 2000; Bouillet *et al.*, 2007) y aquellos que plantean el problema de manera secuencial, estudiando jerárquicamente las variables que explican el confort, anulando el efecto de variables psicoacústicas que explican parte de ellas para analizar el efecto de otras variables secundarias (Pariziet *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014).

En estos estudios, los sonidos evaluados suelen responder a un diseño experimental de sus características acústicas con el objetivo de contrastar una hipótesis *a priori*, por tanto, o bien se ecualizan los sonidos para conseguir que respondan al diseño experimental controlado (Letourneaux *et al.*, 2000; Pariziet *et al.*, 2002; Bouillet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2014), o bien se seleccionan unos sonidos determinados que cumplan con los requisitos del diseño experimental (Choi *et al.*, 2011).

De los trabajos previamente comentados se ha analizado en especial detalle los realizados por Letourneaux *et al.* (2000), Pariziet *et al.* (2002), Bouillet *et al.* (2007), Choi *et al.* (2011), Zhang *et al.* (2012) y Yang *et al.* (2014) por su especial relevancia para la obtención de un modelo psicoacústico para vehículos de alta velocidad.

Para la exposición del análisis de dichos trabajos, se ha optado por mostrar sus tesis de manera detallada por separado en los apartados 2.5.1 a 2.5.6 por orden cronológico para, posteriormente, en el apartado 2.5.7 concluir, en forma de corolario, cuáles son sus principales aportaciones a la psicoacústica en vehículos de alta velocidad.

2.5.1. Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: integration of subjective parameters (Letourneaux *et al.*, 2000)

Como se ha comentado previamente, éste es uno de los primeros estudios realizados sobre calidad sonora de vehículos de alta velocidad donde se combinan evaluaciones subjetivas y variables objetivas de los sonidos y se proponen parámetros psicoacústicos como mejores estimadores de la calidad sonora en el interior de vehículos ferroviarios frente los parámetros físicos.

Este estudio tenía un doble objetivo que dio lugar a dos experimentaciones diferenciadas. Uno de los objetivos era estudiar la relevancia del nivel de presión sonora ponderado A como indicador del confort. El otro objetivo era verificar la homogeneidad de los sonidos dentro del vehículo en cuanto su efecto sobre el confort.

Los sonidos se registraron con una cabeza maniquí (Brüel and Kjaer 4100 and 2672) y una grabadora digital. Se obtuvieron muestras binaurales en asientos de un TGV dúplex, de dos pisos, circulando a 300 km/h, evitando el paso por túneles y otras barreras que pudieran afectar al sonido.

Se realizaron dos test de evaluación subjetiva, uno a continuación del otro, para cada uno de los objetivos, con la misma muestra formada por 43 evaluadores (24 hombres y 19 mujeres). La duración de ambos tests fue menor de 36 minutos en todos los casos, y fue considerado sencillo por los participantes.

Para cubrir el objetivo de estudiar la relevancia del nivel de presión sonora ponderado A como indicador del confort, fueron evaluadas siete muestras, usando una interfaz gráfica que mostraba una escala continua, de la menos agradable a la más agradable.

Las muestras evaluadas fueron variaciones del sonido registrado en el centro de un piso inferior del vehículo en el asiento junto a la ventana. La señal registrada original (ORI) es representativa del sonido en el vehículo donde la mayor parte de la energía se concentra entre 0 y 1000 Hz y aparecen algunos tonos puros a 139, 300 y 800Hz. Esta muestra fue ecualizada para crear otras muestras:

- F139, de la señal original se elimina el tono puro que aparece a 139Hz.
- F300, de la señal original se elimina el tono puro que aparece 300Hz.
- F800, de la señal original se elimina el tono puro que aparece 800 Hz.
- FBF, de la señal original se atenúa la amplitud sobre 6dB en el rango de 0 a 139Hz.
- FMF, de la señal original se atenúa la amplitud sobre 6dB en el rango de 139 a 1000 Hz.
- FHF, de la señal original se atenúa la amplitud sobre 6dB en el rango de 1000 a 4000 Hz.

El nivel de presión sonora (SPL) de la señales filtradas era entre 1 y 3 dBA inferior a la señal original.

El análisis de la respuesta subjetiva fue directo, calculándose la media de la puntuación del agrado de los sonidos indicada por los evaluadores.

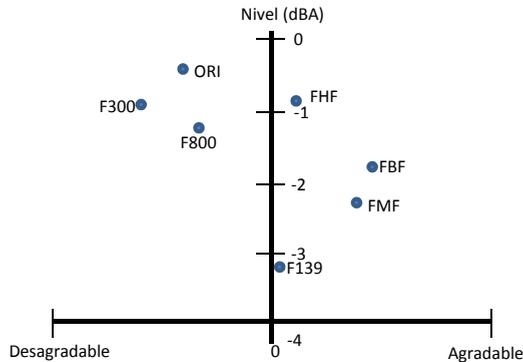


Figura 2.9: Agrado y nivel de presión sonora ponderado A en las muestras evaluadas del estudio de Letourneaux *et al.* (2000)

Como se muestra en la figura 2.9, las señales filtradas en una banda de frecuencias (FBF y FMF) eran las mejor valoradas, consideradas más agradables, que los sonidos con filtros en los tonos puros F300 y F800. La energía acústica en esas bandas de frecuencia tiene influencia en el agrado de los sonidos indicado por parte de los evaluadores. Sin embargo, la frecuencia de la banda atenuada no parece influir en la respuesta subjetiva de las muestra FBF y FMF.

La correlación entre el nivel de agrado y nivel de presión sonora ponderado A de las muestras fue considerado bajo, 0,44. En los sonidos F300 y FHF, con un valor similar en su nivel de presión sonora ponderado A, la valoración subjetiva de su nivel de agrado es muy diferente.

Además, los resultados indican que los evaluadores son más sensibles a la energía de la banda de frecuencias de 0 a 1000 Hz, sin embargo, el nivel de presión sonora ponderado A atenúa este espectro.

En base a los resultados, los autores concluyen que el nivel de presión sonora ponderado A no es el mejor indicador del confort.

El segundo objetivo era verificar la homogeneidad de los sonidos dentro del vehículo en cuanto a su nivel de confort. Para ello se registraron dieciséis muestras de sonido en diferentes asientos del TGV dúplex.

Para este test, se utilizó un método de comparación por pares (David, 1963) para clasificar los sonidos del menos agradable al más agradable. La clasificación se validó mediante el método de Bootstrap (Lebart, Morineau y Fénelon, 1979), obteniéndose una coherencia de los pares (A, B) y (B, A) del 79%.

Según los autores, los resultados indican:

- Las muestras sonoras en la zona de las ventanas son más agradables que en la zona entre ventanas.
- Los sonidos del piso inferior son más similares en cuanto la valoración del agrado que los sonidos del piso superior.

Los autores indican que, aunque el nivel de presión sonora equivalente ponderada A es bajo, se han encontrado diferencias en valoraciones subjetivas entre los pisos superior e inferior. Además, refieren que el ambiente acústico en los sitios cerca de la ventana es más agradable y que también aumenta la sensación de agrado desde un extremo a otro del coche.

Los autores concluyen que el confort acústico en el TGV depende de muchos factores subjetivos, pero que estudios psicoacústicos sencillos podrán contribuir a contestar cuestiones específicas.

Como líneas futuras de este trabajo se identifican dos de naturaleza diferente. Por un lado, mejorar la caracterización de las fuentes de baja frecuencia y, por otro, desarrollar un indicador de confort acústico que permita una evaluación más precisa del nivel de molestias de los pasajeros.

2.5.2. Noise assessment in a high-speed train (Pariziet *et al.*, 2002)

El objetivo del estudio de Pariziet *et al.* (2002) fue la evaluación de los principales indicadores que influyen en la percepción de sonidos registrados en un vehículo de alta velocidad. Para ello, se realizaron dos experimentaciones con diferentes objetivos. El objetivo de la primera experimentación era valorar el nivel de presión sonora equivalente A y el *loudness* como indicador del confort acústico de primer orden. El objetivo de la segunda experimentación era encontrar un indicador del confort de segundo orden, que explicara la parte del confort no cubierta por el indicador de primer orden.

El estudio se centró en sonidos de fondo del vehículo de alta velocidad, pero incluyó y controló la variabilidad de los factores velocidad, tipo de vía y localización dentro del vehículo.

Los estímulos utilizados en este estudio fueron sonidos registrados en un único vehículo de alta velocidad compuesto de dos pisos. Para el registro, se utilizó una cabeza maniquí (Brüel and Kjaer) que permite el registro binaural. La duración de los estímulos fue de 10 segundos.

Se registraron un total de 8 sonidos en los dos pisos y en tres posiciones distintas, pero no se describen sus características en detalle. Solo se indica que el sonido registrado en la posición 1 es en el piso superior, la posición 2 es en el piso inferior, y la posición 3 fue registrada en ambos pisos. Se registraron sonidos a 3 velocidades diferentes (160, 220 y 300 km/h) y en dos tipos de vías, vía clásica y vía nueva específicamente construida para alta velocidad. El registro de estos 8 sonidos en cuanto a la distribución de los factores velocidad, posición, piso y vía no parece corresponder a ningún tipo de diseño experimental.

En la primera experimentación participaron 48 evaluadores, la mayor parte estudiantes, con edad media de 25 años, y rango comprendido entre los 18 y 55 años. Ninguno de ellos reportó problemas auditivos.

Para evaluar la preferencia de los participantes por los sonidos, se utilizó un método de comparación por pares con una escala de preferencia de 5 niveles, en el que se

realizaron 28 comparaciones con una duración media de la sesión de evaluación de entre 15 y 30 minutos en función de las repeticiones que solicitaban los participantes.

Los resultados indicaron que la evaluación subjetiva de la preferencia por comparaciones por pares presentaba una variabilidad intersujeto baja.

En cuanto al objetivo de valorar el nivel de presión sonora equivalente A y el *loudness* como estimadores del confort acústico de primer orden, según los autores, el nivel de presión sonora controlaba los resultados ya que había grandes diferencias entre el nivel de los sonidos, de hasta 14 dB(A) como se muestra en la figura 2.10.

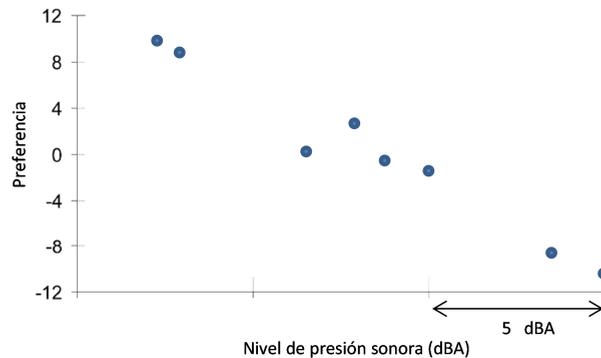


Figura 2.10: Representación de la preferencia frente a nivel de presión sonora ponderado A (Pariziet et al., 2002)

La correlación entre la preferencia y el nivel de presión sonora equivalentes A es muy buena ($R=-0,98$). Los autores concluyen que, en este caso, el uso de otros indicadores como el *loudness* no es necesario.

Los resultados, según indican los autores, fueron diferentes de los obtenidos por Hardy (2000) y Letourneaux *et al.* (2000), que encontraron que el nivel de presión sonora ponderado A no era un buen descriptor de la evaluación subjetiva. No obstante, hay que tener en consideración que en el estudio de Letourneaux *et al.* (2000) las variaciones entre sonidos eran pequeñas, 3dB (A), este hecho podría explicar que el nivel de presión sonora ponderado A no fuese un buen estimador. Sin embargo, para el trabajo de Hardy (2000) las diferencias eran de 10 dB(A) por tanto no se puede atribuir a esta razón la contradicción en los resultados. Analizando en detalle el trabajo de Hardy (2000), la falta de correlación entre la evaluación subjetiva y el nivel ponderado A es debido a un solo estímulo, evaluado como molesto. Comentan los autores que el timbre de este sonido debe ser particular y debe explicar esta mala evaluación.

Según el autor, si se representa la preferencia comparada entre sonidos media de los sujetos, puede observarse que la escala de 5 niveles satura para sonidos con una diferencia mayor de 12 dB(A).

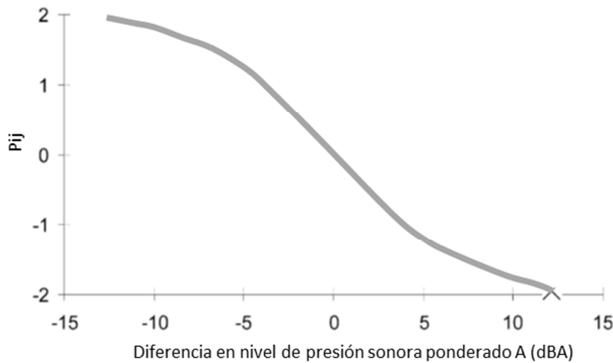


Figura 2.11: Tendencia de la diferencia entre la preferencia de dos sonidos y su diferencia en el nivel de presión sonora ponderado A. Basado en los resultados de Pariziet *et al.* (2002)

En la figura 2.11 se representa la curva que relaciona la preferencia comparada entre un sonido y otro, que es:

$$P_{ij} = A \cdot \text{Artan} \left(\frac{\Delta_{ij}}{B} \right) \quad (2.6)$$

Donde Δ_{ij} es la diferencia de dB(A) entre los sonidos comparados, siendo A y B constantes, que para los resultados de este estudio son $A = -1,76$ y $B = 6,06$. Como principal resultado, los autores indican que la velocidad es el factor que más influencia tiene en la preferencia, frente tipo de vía y localización en el vehículo.

El objetivo del segundo experimento era profundizar en la preferencia, eliminando la influencia de los indicadores identificados como de primer orden descritos a través de presión sonora equivalente o *loudness*.

Para ello, se equalizaron los estímulos para anular la influencia del *loudness*. La equalización consistió en ajustar el *loudness* promediado en el tiempo a un valor cercano a 10 sones, de acuerdo con ISO 532 B:1975. Tras la equalización se consiguió que los sonidos variasen entre 9,8 y 10,2 sones.

Para la evaluación, se utilizó el mismo método de comparaciones pareadas y la misma muestra de sujetos que en el test anterior.

Todos los sujetos realizaron dos evaluaciones con procedimientos diferentes:

- Una con auriculares como en la experimentación anterior.
- Otra con auriculares acompañados de un subwoofer. El objetivo era evaluar la importancia de la percepción del cuerpo de las muy bajas frecuencias, ya que el uso de auriculares no permite esta evaluación. Pariziet *et al.* (2002) en un estudio de sonido en el interior de camiones, previamente comentado, afirmaban que el uso de un subwoofer aumentaba el realismo.

Los resultados de la preferencia fueron muy similares en los dos procedimientos. La diferencia con el estudio de Pariziet *et al.* (2002) puede ser debida a que en su estudio el *loudness* de los sonidos era mucho mayor. Finalmente, se decidió unir los resultados de ambas evaluaciones.

Los valores de la preferencia variaron entre -2,5 y 4,5 mientras que en el experimento anterior variaba entre -10 y 10. Los autores indican que, en general, la reducción del rango de la preferencia en los test de comparación por pares puede ser debido a tres causas:

- Respuestas más cautas de los evaluadores, indicando menos diferencias entre sonidos. Los usuarios no utilizan todo el rango de las escala.
- Respuestas inestables, con cada evaluador cometiendo errores circulares (A es preferido a B, y B a C, pero C es preferido a A).
- Grandes diferencias intersujeto (Las preferencias entre sujetos no coinciden).

De estas posibles causas se concluye que en este experimento se han dado las 3 causas en comparación con el test anterior.

Para continuar el análisis se realiza un análisis clúster donde separa en tres grupos diferentes de evaluadores. El grupo 1 y 3 tenían la misma tendencia en las evaluaciones de preferencia que, finalmente para continuar el análisis, se unen y el grupo 2 presentaba una tendencia diferente.

Se calcularon las siguientes variables psicoacústicas de los estímulos evaluados como potenciales indicadores del confort: el nivel de presión sonora equivalente sin ponderar y con ponderación A, B y C; *sharpness*, *fluctuation strength*, *roughness*; *tonality*; *spectral center of gravity e intelligibility*.

Para estudiar la relación entre la preferencia y estas variables se calcularon modelos de regresión lineal y logarítmica.

El resultado obtenido fue que ninguna de las variables de manera independiente era un predictor fiable de la preferencia. El mejor modelo obtenido según su capacidad de predicción fue el modelo con el parámetro *sharpness* con unas correlaciones de -0,64, 0,74 y -0,39 para los tres grupos. Este hecho puede explicar las diferencias entre el grupo 2 y el resto de evaluadores.

Los autores destacan como conclusiones del estudio:

- La variable psicoacústica con más influencia en la preferencia de un sonido de vehículo de alta velocidad es el parámetro *loudness*, que puede ser correctamente descrito por el nivel de presión sonora equivalente ponderado A. La influencia del *loudness* en la preferencia es común a todos los evaluadores. Además, el nivel de *loudness* está muy influenciado por la velocidad.
- Cuando se elimina la influencia del *loudness*, la preferencia no es común a todos los evaluadores. La mayoría (70%) de los evaluadores prefieren sonidos con energía en las bajas frecuencias mientras otros prefieren lo contrario.

- Tras el *loudness*, no se encuentra un descriptor secundario válido entre las variables psicoacústicas, incluso el *sharpness* no consigue ser un buen descriptor.
- El criterio definido como balance de *loudness* (Ec. 2.8) puede representar bien la percepción como indicador secundario del confort.

Se calcularon también modelos de regresión lineal multivariante pero no se obtuvieron resultados útiles con excepción del grupo 2, donde se obtuvo el siguiente modelo que tenía una capacidad de predicción $R^2=0,86$.

$$\text{Preferencia} = -31,1 + 68,9 * \text{tonality} + 36,2 * \text{sharpness} \quad (2.7)$$

Sharpness calculada con el método de Zwicker y Fastl (1990), expresado en acum.

Tonality calculada según el modelo de Terhardt *et al.* (1982), expresada en tu.

Según los autores, el balance espectral es una característica importante de los sonidos, éstos utilizaron el modelo de *loudness* de Moore, Glasberg y Baer (1997) que difiere del modelo de Zwicker en los siguientes puntos:

- En la función de transferencia del oído externo y medio.
- En el cálculo de los patrones de excitación.
- En las bandas críticas, en especial por debajo de 500Hz.
- En el cómputo del *loudness* específico a partir de los patrones de excitación.

Los autores proponen un nuevo criterio, balance de *loudness* (LB), que es el ratio de *loudness* en las bandas de 0-200Hz y 2000-4500Hz.

$$LB = 10 \cdot \log_2 \left(\frac{S_{0.2}}{S_{13.18}} \right) \quad (2.8)$$

El coeficiente de correlación entre cada grupo y el balance de *loudness* calculado es -0,68 para el grupo 1, 0,85 para el grupo 2 y -0,78 para el grupo 3. Estos coeficientes indican que este parámetro se refiere a la preferencia para los sonidos ecualizados para igualar su *loudness*. No obstante, su validez debe de ser comprobada con una muestra representativa de vehículos, velocidades y nuevos usuarios.

En relación a los factores de las condiciones de registro controladas, el criterio calculado de balance de *loudness* parece estar relacionado con el piso en que fue registrado el sonido del vehículo. Los sonidos con mayor valor de balance de *loudness* son aquellos con más energía en las bajas frecuencias, que puede relacionarse con mayor ruido aerodinámico que se produce en el piso superior.

2.5.3. Psychoacoustical indicators of acoustical comfort inside trains for background noise and emergent signals (Boullet *et al.*, 2007)

El estudio de Boullet *et al.* (2007) se divide en dos partes diferenciadas en función de sus objetivos:

- Estudiar el confort acústico del ruido de fondo en vehículos de alta velocidad, con el objetivo concreto de validar que la variable *loudness* está más correlacionada con el confort acústico que el nivel de presión sonora ponderado A.
- Estudiar el confort acústico de ruidos emergentes de los vehículos.

Confort acústico para ruido de fondo

En el estudio del ruido de fondo en el vehículo se registraron sonidos en dos vehículos, un TGV con un piso y un TGV Dúplex con dos pisos.

Según los autores, los sonidos registrados, en especial en el piso inferior, pueden ser una mezcla de ruido de fondo y excitación paramétrica debido a las traviesas y/o el ruido del convertidor eléctrico, por tanto se atenuó esta contribución de la excitación paramétrica mediante ecualización de los sonidos. De esta manera decrecieron los picos en frecuencia al nivel del ruido de fondo haciéndose inaudible, consiguiendo así una señal de ruido de fondo sin señales emergentes.

De las grabaciones efectuadas, se seleccionaron para el estudio 30 sonidos de 4 segundos de duración, 15 del TGV de un solo piso y 15 del TGV de dos pisos - 9 sonidos del piso inferior y 6 del piso superior. Se registraron los sonidos en diferentes posiciones, a diferentes alturas y a diferentes velocidades (desde 150 km/h a 320 km/h). En el estudio no se especifican las posiciones donde fueron efectuadas las medidas ni la altura a la que se realizaron los registros.

En la evaluación subjetiva participaron 24 sujetos de 20 a 50 años.

La molestia y *loudness* fueron medidos por los evaluadores utilizando el método de *free magnitude estimation* sin referencias (Stevens, 1956). En este experimento se midió tanto la percepción de la molestia como la percepción del *loudness* de cada sonido por parte del evaluador.

El orden de los estímulos fue aleatorio y diferente en cada sesión para cada sujeto. Durante cada test, cada sonido fue mostrado y evaluado tres veces.

Se calculó la media geométrica de 72 evaluaciones de molestia y la variable *loudness* de los 24 evaluadores. Los autores concluyen que el logaritmo de la molestia está altamente correlacionado con el logaritmo del *loudness* percibido (0,987) y que la correlación es menor cuando correlaciona con el nivel de presión sonora (0,935).

A la hora de proponer un indicador para estimar la molestia, como la correlación de la molestia y el *loudness* es alta y los sonidos son estacionarios, los autores proponen el modelo de Zwicker (Zwicker, Fastl y Dallmayr, 1984) para evaluar el *loudness*.

Se encontró una relación lineal entre la molestia y el valor *loudness* calculado, según la siguiente ecuación, con un coeficiente de correlación de 0,98.

$$\text{Log}(Annoyance) = -2,15 + 0,044L_{\text{phons}} \quad (2.9)$$

Donde *L_{phons}* es el nivel de *loudness* en phons calculados según el modelo de Zwicker y *Annoyance* es la molestia medida.

Confort acústico en el interior de vehículos para señales emergentes

El objetivo de esta parte del estudio fue desarrollar un indicador para el confort de señales emergentes. En concreto se midió la molestia de sonidos compuesto de ruidos emergentes.

La sonoridad de la señal emergente queda enmascarada, en parte, por de la señal del ruido de fondo. Esta sonoridad parcial que se percibe de la señal emergente sobre el ruido de fondo fue medida mediante un test subjetivo para evaluar su relación con la molestia.

Las señales fueron registradas con la misma técnica y equipo que en el experimento anterior. Las señales emergentes correspondían a tonos puros de la excitación paramétrica debida al paso por las traviesas, cuya frecuencia aumenta con la velocidad y a los tonos puros de la apertura y cierre de puertas.

Se seleccionaron tres ruidos de fondo, dos de un vehículo de alta velocidad TGV Dúplex circulando a 150 km/h y a 300 km/h y otro de un vehículo de servicio regional (TER) circulando a 80 km/h. El sonido de apertura y cierre de puertas fue añadido a los 3 ruidos de fondo. Tres excitaciones paramétricas correspondientes a diferentes velocidades del TGV Dúplex se añadieron solo al ruido de fondo del TGV Dúplex circulando a 300km/h. El sonido de fondo no cambia de modo relevante hasta más allá de los 300km/h. Los sonidos compuestos de señal emergente y ruido de fondo tenían una duración de 3 segundos.

Los niveles de las señales emergentes presentadas a cada evaluador se determinaron mediante la medida de los umbrales de enmascaramiento¹⁵ de manera que todos los sujetos podían escuchar las señales más débiles. Para la señal de tonos puros, apertura y cierre de puertas, se utilizó el nivel real de la señal emergente y los otros niveles se fijaron con intervalos constantes de manera que fueran audibles, obteniendo seis niveles del sonido de emergencia. Para las señales de excitación paramétrica, traviesas, la señal más alta se fijó en 2dB más que su nivel real. Para las otras cinco condiciones se decrecía 2 dB cada vez. En total, se presentaron 15 combinaciones a cada evaluador y cada ruido de fondo fue presentado solo.

Los participantes evaluaron el nivel de molestia percibido en una escala de siete puntos (Guski, 1997) Los extremos de la escala de molestias estaban etiquetados como “nada

¹⁵ Enmascaramiento: (1) El proceso mediante el cual se eleva el umbral de audición para un sonido mediante la presencia de otro sonido. (2) La cantidad en que se aumenta el umbral de audición de un sonido en presencia de otro sonido.

molesto” y “extremadamente molesto”. Cada sonido se evaluó una vez y el orden fue aleatorio. Se realizaron 3 test independientes para cada sonido de fondo.

Los mismos sujetos evaluaron el *partial loudness*¹⁶ percibido utilizando el método de *free magnitude estimation* como en el test anterior y, como en el caso de la molestia, se realizaron 3 test por cada ruido de fondo.

La evaluación de la molestia se realizó en primer lugar para no sesgar a los evaluadores incrementando la importancia del *partial loudness* en la evaluación de molestias. Los evaluadores fueron los mismos que en el experimento anterior.

Para la excitación paramétrica se realizó un ajuste de regresión lineal del nivel de molestias y el *partial loudness* percibido por los evaluadores, presentando una correlación muy alta, con un coeficiente de $R=0,98$.

Los ajustes son similares para los sonidos con tonos emergentes, sonidos de apertura y cierre de puertas, obteniéndose un ajuste por regresión lineal del nivel de molestias y el *partial loudness* percibido por los evaluadores de $R=0,99$, $R=0,97$ y $R=0,99$ para cada uno de los ruidos de fondo.

Una vez validada la alta correlación entre la molestia y el *loudness* los autores intentaron definir un indicador objetivo que determine el nivel de *partial loudness*.

El cálculo del *partial loudness* para las señales emergentes se realizó usando el modelo propuesto por Moore *et al.* (1997) para la excitación paramétrica. Este modelo no pudo ser utilizado para la apertura y cierre de puertas ya que solo aplica a sonidos estacionarios. Con el *partial loudness* así calculado se obtuvo un $R=0,89$ con el nivel de molestias.

Los autores compararon este coeficiente de correlación lineal con el obtenido con el nivel de presión sonora en dB(A), siendo este último de 0,99. Por tanto, concluyeron que el nivel de presión sonora en dB(A) era mejor indicador de la molestia para sonidos con excitación paramétrica.

Para los sonidos de apertura y cierre de puertas, se calcularon distintos parámetros basados en el nivel de presión sonora y en los modelos de *loudness* para sonidos no estacionarios.

En concreto, los indicadores calculados fueron el nivel de presión sonora sin ponderación y con ponderación A. Para el *loudness* se calculó según el modelo para sonidos no estacionarios Zwicker y Fastl (1999) eligiendo el valor máximo, también se calculó el *impulse loudness* según el modelo de Boulet *et al.* (2006). Por último, se calculó el parámetro *Longterm Loudness Maximun* (LTLmax) (Glasberg y Moore, 2002).

¹⁶ Para tratar de efectuar medidas de ruido que tengan en cuenta el enmascaramiento se siguen diversos métodos, como los de Zwicker y Stevens, en éste último se utilizan una familia de curvas, en combinación con medidas de ruido efectuadas a través de un filtro de un tercio, media o una octava. En cada banda, una vez determinado el nivel de presión sonora, se halla la sonoridad parcial; estas sonoridades parciales se llaman índices de sonoridad.

Según los autores, la correlación de los diferentes indicadores con la percepción de molestias del sonido completo, sonido de fondo más la señal emergente, no es buena. Para los niveles bajos la molestia aumenta pero los indicadores medidos no varían.

Si el cálculo de los indicadores se realiza solo con la señal emergente, la correlación con el nivel de molestia aumenta con estos indicadores de manera considerable.

En concreto, los mejores indicadores para predecir el nivel de molestias son el parámetro LTLmax propuesto por Glasberg y Moore (2002) que presenta un coeficiente de correlación de 0,97, seguido del nivel de presión sonora equivalente ponderado A que presenta un coeficiente de correlación de 0,96 (ambos calculados sobre la señal emergente sin el ruido de fondo).

La conclusión principal según los autores es que el *loudness* es el mejor indicador del confort acústico, en este caso, molestias. Para el ruido de fondo, el *loudness* estimado por los evaluadores está muy correlacionado con el nivel de molestias y el modelo propuesto por Zwicker para sonidos estacionarios (Zwicker *et al.*, 1984) es un buen indicador objetivo de la molestia.

Para señales emergentes junto con el ruido de fondo, la molestia está muy correlacionada con el *partial loudness* de la señal emergente evaluado por los sujetos. Como indicador objetivo del confort para señales emergentes de excitación paramétrica el nivel de presión sonora ponderado A es un buen estimador. Sin embargo, para señales no estacionarias no se encontró un buen estimador de confort. No obstante, sobre la señal emergente sin ruido de fondo se concluye que LTLmax (Glasberg y Moore, 2002), y nivel de presión sonora ponderado A son buenos estimadores del confort.

2.5.4. Acoustic comfort indicator for the assessment of interior noise in Korean high-speed trains (Choi *et al.*, 2011)

El objetivo último de este trabajo es encontrar el indicador acústico que mejor valore el confort del pasajero.

La primera parte del estudio se centra en la medida del ruido en el interior de vehículos de alta velocidad para conocer las características del mismo debido a la velocidad, el tipo de vía y la infraestructura, así como las diferencias entre distintos modelos de vehículos según su contenido espectral. Las conclusiones de esta parte del estudio se han descrito anteriormente en el apartado 2.3.2 correspondiente a la caracterización sonora en el interior de vehículos.

En la segunda parte del estudio, se realizaron dos experimentos de evaluación subjetiva con el objetivo de encontrar qué factores físicos indicaban mejor el confort del pasajero, expresado como nivel de molestia o como nivel de ruido, según cada una de las experimentaciones. Participaron 30 evaluadores con buena audición. Los test se realizaron en una sala acondicionada para evaluación acústica mediante el uso de auriculares que permitían una reproducción binaural.

En ambos test se utilizó el método de comparaciones por pares para la evaluación.

Los sonidos utilizados eran de tres vehículos de alta velocidad a diferentes velocidades y las características de los sonidos de ambos experimentos se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Descripción de los estímulos sonoros utilizados por Choi *et al.* (2011)

Experimento	Velocidad km/h	dB(A)	Loudness	Sharpness
1	100	59,4	12,6	1,00
1	100	60,9	12,3	0,733
1	295	74,4	31,6	1,16
1	300	74,9	32,3	1,18
1	310	72,5	34,2	1,87
1	315	72,6	34,6	1,93
2	130	61,9	13,9	0,947
2	190	61,9	15,2	1,07
2	275	66,4	20,3	1,08
2	294	66,3	21,7	1,28
2	100	62,3	14,4	0,975
2	100	62,4	15	1,15
2	155	62,6	14,2	0,929
2	200	62,5	15,4	1,04

El objetivo del primer experimento era comprobar cuál es mejor estimador del confort del pasajero, el nivel de presión sonora ponderado A o el *loudness*, calculado según el modelo de Zwicker. Para ello se seleccionaron sonidos de tres vehículos con diferentes velocidades, que tuviesen diferentes valores de nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*. Se calculó la correlación entre el nivel de molestias indicado por los sujetos y el nivel de presión sonora ponderado A, además de con otras variables de calidad sonora como son *loudness*, *sharpness*, *roughness* y *fluctuation strength*. También se calculó la correlación entre el nivel de presión sonora ponderado A y los parámetros de calidad sonora. Se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Coeficiente de correlación de los indicadores con el nivel de molestias y nivel de presión sonora ponderado A, n=6. (Choi *et al.*, 2011)

Coef. correl	Nivel de molestia	L _A
L _A	,865*	-
Loudness	,939**	,983**
Sharpness	,755	,348
Roughness	-,329	,115
Fluctuation strength	,330	,637

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significantiva al nivel 0,05 (bilateral)

Los autores concluyen que el *loudness* es el mejor estimador de la molestia en los sonidos de vehículos y que está muy correlacionada con el nivel de presión sonora ponderada A.

El objetivo del segundo experimento era comprobar qué variable de calidad sonora estaba más relacionada con el nivel de ruido percibido por los evaluadores. Para ello se seleccionaron sonidos de uno solo de los vehículos a diferentes velocidades, que por parejas presentaran el mismo nivel de presión sonora ponderado A pero diferentes parámetros de calidad sonora. Los autores concluyen que cuando el nivel de presión sonora ponderado A se mantiene constante, se indica como sonido con más volumen aquel que presenta más *loudness* y más *sharpness*. Se calcularon los coeficientes de correlación del nivel (Volumen) sonoro percibido y los parámetros nivel de presión sonora ponderada A, *loudness*, *sharpness*, *roughness* y *fluctuation strength*, obteniéndose los resultados de la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Coeficiente de correlación con el nivel de ruido, n=8 (Choi, 2011)

Coef. correl	Nivel sonoro percibido
dB(A)	,932*
Loudness	,981**
Sharpness	,129
Roughness	-,703
Fluctuation strength	-,324

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significantiva al nivel 0,05 (bilateral)

La variable que tiene más correlación con el nivel de ruido percibido es el *loudness* (0,981), seguida por el nivel de presión sonora ponderado A (0,932).

Los autores indican como conclusión del estudio que el *loudness* es el mejor indicador de la molestia de los pasajeros, ya que el nivel de molestia debería de estar representado

por factores independientes. Según los autores la variable *sharpness* también debe ser considerado en la evaluación del confort del pasajero ya que tiene correlación con la molestia.

En cuanto al nivel de ruido percibido se concluye que el *loudness* es la variable que mejor lo representa mientras que el *sharpness* no tiene relación con el nivel de ruido.

Cuando el nivel de presión sonora ponderada A, segunda experimentación, se mantiene constante, un menor *loudness* representa menos molestia y menos nivel de ruido percibido.

Finalmente los autores concluyen que el *loudness* y el *sharpness* pueden representar mejor las características del sonido interior cuando la velocidad del vehículo es elevada, y predomina el ruido aerodinámico, ya que son independientes entre sí.

2.5.5. Sound quality subjective evaluation analysis of noise inside high-speed trains (Zhang *et al.*, 2012)

El trabajo de Zhang *et al.* (2012) tiene como objetivo el investigar sobre el método de comparaciones pareadas para la evaluación subjetiva de sonidos utilizando como muestras registros de sonidos de vehículos de alta velocidad. Esta investigación tiene en cuenta el proceso experimental para la validación estadística de la adecuación y la efectividad de los métodos utilizados, como ejemplo de experimento de calidad sonora para pasajeros de tren. En la segunda parte del trabajo se estudia la relación de la preferencia con las condiciones de medida y las variables psicoacústicas de los sonidos.

Para el registro se utilizó HMSIII (Head Measure System), equipo que simula una cabeza humana e incorpora el software SQLabII multi-channel test system.

Se registraron y evaluaron un total de 12 sonidos de dos vehículos diferentes a velocidades entre 145 km/h y 385 km/h. En uno de los vehículos se distinguieron los asientos en función de la clase “*ordinary pack*” y “*senior pack*”.

La evaluación subjetiva de la calidad sonora de los sonidos se realizó mediante el método de comparación por pares.

Se seleccionaron 20 evaluadores para la realización del test. La media de edad de los participantes era de 24 años y 16 de ellos eran estudiantes en temas de acústica.

La duración de los registros para su evaluación era de 5 segundos, separados 2 segundos. Los parejas a comparar eran 66 pares i-j, 6 pares de las mismas muestras 6 i-i y 12 pares en diferente orden i-j y j-i. En total se realizaban en cada sesión un total de 84 comparaciones pareadas. La duración media de las sesiones fue de 30 minutos.

La comparación de los sonidos A y B se realizó mediante una escala de 3 niveles donde 1 significaba, A mejor, -1 B mejor y 0, A y B son prácticamente iguales.

En cuanto a la fiabilidad del método de comparación por pares, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La evaluación de estímulos similares se identificaba fácilmente ya que el error fue de 10,8%. El error debido al cambio de orden de los estímulos fue de 25,8%.
- Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se eliminó a evaluadores que tuviesen menor consistencia en sus evaluaciones. Se calculó el coeficiente de Kendall de inspección y se eliminó a aquellos evaluadores que tuviesen un coeficiente $<0,7$. De los veinte evaluadores, 3 fueron eliminados.
- Se calculó la correlación de Pearson entre los diferentes evaluadores, obteniendo una matriz de correlación de 16 x 16 valores con una correlación con valores entre 0,708 y 0,989, por tanto, la evaluación se consideró efectiva.

En cuanto a la preferencia y su relación con variables asociadas a las condiciones del registro por observación de los valores de preferencia, sin realizar un test estadístico, se concluye que la preferencia disminuye con la velocidad, y que en el vehículo donde había asientos de dos clases, los sonidos registrados en clase “*senior pack*” son preferidos frente a “*ordinary pack*”. Se atribuye esta diferencia a mejores materiales absorbentes de ruido que se utilizan en los coches de la clase “*senior pack*”.

En cuanto a las variables psicoacústicas y su relación con la preferencia, en el estudio se calcularon las variables Presión Sonora Equivalente lineal y ponderada A y el parámetro *loudness* de los ocho sonidos correspondientes a uno solo de los vehículos. Observando la relación de las variables y la preferencia, se concluye que el parámetro *loudness* es el que mejor correlación inversa presenta con la preferencia.

El estudio concluye que el experimento ha permitido validar que:

- La evaluación subjetiva de la calidad sonora es un método efectivo para valorar la calidad sonora en el interior de vehículos.
- El valor de preferencia obtenido mediante el método de comparaciones por pares debe tener una muy buena correlación entre evaluadores.
- El valor de preferencia y las variables psicoacústicas presentan una correlación inversa siendo el parámetro *loudness* el que presenta mayor correlación.

2.5.6. Sound quality evaluation analysis on the interior noise of high-speed train (Yang *et al.*, 2014)

El objetivo del trabajo de Yang *et al.* (2014) era conocer qué variables objetivas están más relacionadas con la percepción de molestias del sonido interior de un vehículo de alta velocidad.

Los registros sonoros utilizados fueron realizados en un solo modelo de vehículo de alta velocidad. El vehículo medido fue el modelo RH380 que realizaba el trayecto de Harbin a Dalian (China) con una velocidad máxima de 350 km/h, pero en verano solo alcanza los 300 km/h.

Los sonidos se registraron en diferentes condiciones de velocidad, posición dentro del vehículo, condiciones del trayecto y condiciones interiores. Sin embargo, no se da información en el artículo de dichas condiciones excepto de las posición de las medidas

dentro del vehículo. Se obtuvieron un total de 32 registros para su análisis y evaluación subjetiva.

La duración de los registros para su evaluación fue fijada en 5 segundos. Se trataron los registros con el objetivo de igualar el *loudness*, convirtiendo todos los registros a un nivel de 18,6 sones.

En el análisis psicoacústico de los registros, primero se calculó el valor de la variable *loudness* de los registros utilizando seis métodos DIN 45631/A1, FFT/ISO 532 B, Filter/ISO 532 B, FFT/HEAD desarrollado por la compañía HEAD, FFT/ANSIS3. 4-2007 y FFT(3rd Oct)/ANSIS3.4-2007. Tras comparar los valores concluye que la tendencia de las diferencias entre las muestras utilizando los diferentes métodos es similar. Finalmente se selecciona el método DIN 45631/A1.

Para la variable *sharpness*, basada en *loudness* calculado, se compararon los resultados utilizando los métodos DIN45692, Aures (1984) y von Bismarck (1974). De manera similar al *loudness*, concluye que las diferencias entre las muestras utilizando los diferentes métodos varían de forma similar, seleccionando finalmente el método DIN45692. Adicionalmente, se calcula el parámetro *roughness*, el *roughness* mejorado mediante un modelo de simulación del sistema auditivo, *tonality*, *fluctuation strength*, *articulate index* y *speech intelligibility index*.

La evaluación subjetiva fue realizada a través de un *jury test* en el que participaron 32 sujetos jóvenes (23 hombres y 9 mujeres no expertos) sin problemas de audición, que hubieran usado el tren alguna vez. La edad de los sujetos estaba entre 22 y 26 años, sin embargo la juventud de los sujetos utilizados no queda justificada en el trabajo, por tanto, tal vez sea una limitación del estudio por falta de acceso para captación de usuarios con mayor variabilidad en la edad.

Para la evaluación subjetiva de los sonidos se utilizó una cámara semi-anecoica, con las condiciones de temperatura y humedad apropiadas, según los autores.

La escala utilizada para la evaluación subjetiva de un sonido fue una escala semántica de 11 niveles, “*Very Terrible*”, “*Terrible*”, “*Very Bad*”, “*Bad*”, “*Not Bad*”, “*Acceptable*”, “*Satisfied*”, “*Better*”, “*Good*”, “*Very Good*” y “*Extremely Good*”.

Tras la evaluación subjetiva, 6 de los 32 registros sonoros fueron descartadas debido a divergencias mostradas por los evaluadores en cuanto al nivel de molestias de dichas muestras, identificadas a partir de la falta de correlación de las evaluaciones.

Para estudiar la influencia de las variables objetivas en la percepción subjetiva, se calcularon las correlaciones entre la percepción de molestias y el nivel de presión sonora lineal (SPL) y ponderada A, *Loudness*, *Sharpness*, *Roughness*, *Hearing Model Roughness*, *Tonality*, *Fluctuation Strength*, *Articulate index (AI)* y *Speech Intelligibility Index* (tabla 2.7).

Tabla 2.7: Correlación entre la valoración subjetiva y variables psicoacústicas, n=26 (Yang et al., 2011)

SPL	SPL (A)	Loudness	Sharpness	Roughness
-,109	-,457**	-,485**	,739**	-,391*
H.M. roughness	Tonality	Fluc. strength	AI	SII
-,273	,074	-,178	,542**	,531**

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Los resultados de las correlaciones incluidos en la tabla 2.7 muestran que la correlación más elevada con la valoración subjetiva de molestia es la variable *sharpness*, seguida del nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, y *articulate index* (AI), con un valor similar, indicando que las variables *articulate index* y *speech intelligibility index* son variables muy correlacionadas que están midiendo el mismo fenómeno.

2.5.7. Conclusiones sobre el estado del arte en modelos psicoacústicos para vehículos de alta velocidad

Como hemos podido ver en los estudios descritos, el problema de buscar indicadores del confort acústico en los vehículos de alta velocidad ha sido tratado con diferentes enfoques en los últimos 15 años.

De los estudios que se han centrado en la evaluación del ruido de fondo, en la búsqueda del estimador principal del nivel de molestia encontramos que las conclusiones de los diferentes estudios no son coincidentes en lo que se refiere a la mejora aportada por la variable *loudness* como indicador del confort respecto al nivel de presión sonora equivalente ponderado A.

Cabe destacar que uno de los objetivos del estudio de Letourneaux et al. (2000) era determinar la relevancia del nivel de presión sonora ponderado A como indicador del confort. La correlación entre el nivel de agrado y nivel de presión sonora ponderado A de las muestras fue considerado bajo, 0,44. Además, los resultados indican que los evaluadores son más sensibles a la energía de la banda de frecuencias de 0 a 1000 Hz, sin embargo, el nivel de presión sonora ponderado A atenúa este espectro.

En base a los resultados, los autores concluyen que el nivel de presión sonora ponderado A no es el mejor indicador del confort.

Sin embargo, a la hora de valorar la validez externa de estos resultados hay que tener en cuenta que los sonidos estudiados provienen de la ecualización de un único sonido de tren registrado a alta velocidad siguiendo un diseño experimental, por tanto no se corresponden a sonidos reales registrados en un vehículo. Además, el estudio se ha limitado a la evaluación subjetiva de ocho sonidos para extraer las conclusiones.

La primera parte del estudio Pariziet et al. (2002) se centró en sonidos de fondo del vehículo de alta velocidad, pero incluyó y controló la variabilidad de los factores velocidad y tipo de vía, así como la localización dentro del vehículo.

En este trabajo, la correlación entre la preferencia y el nivel de presión sonora equivalente A es muy buena ($R=-0,98$). Los autores concluyen que, en este caso, el uso de otros indicadores, como el *loudness* no es necesario, al contrario de lo que afirmaba Letourneaux *et al.* (2000). Sin embargo, aunque en este estudio los sonidos utilizados eran realistas, los sonidos se registraron a distintas velocidades, siendo este factor el que más influye en el confort acústico percibido, según afirman los autores. Adicionalmente, la muestra de evaluadores, en su mayoría estudiantes, no era representativa de los pasajeros de este tipo de vehículos.

Boullet *et al.* (2007) evaluó el ruido de fondo de dos vehículos de alta velocidad mediante el registro de 30 muestras de sonido. Según los autores, la molestia percibida está altamente correlacionada con el *loudness* percibido y la correlación es menor cuando correlaciona con el nivel de presión sonora. Los autores proponen el modelo de Zwicker (Zwicker *et al.*, 1984) para evaluar el *loudness* y calculan una relación lineal entre el logaritmo de la molestia y el valor *loudness* calculado en phons, con un coeficiente de correlación de 0,98.

Hay que tener en cuenta en lo que se refiere a la validez externa de los resultados, que las 30 muestras fueron registradas en solo dos vehículos a diferentes velocidades desde 150 km/h a 320 km/h, por tanto muchas de las muestras de sonido estaban por debajo de la velocidad comercial. Además, las emergencias debidas a excitación paramétrica se atenuaron mediante ecualización de los sonidos.

Choi *et al.* (2011) concluyen, también, que el *loudness* es el mejor estimador de la molestia en los sonidos de vehículos y que está muy correlacionado con el nivel de presión sonora ponderado A. La validez externa de estas conclusiones está limitada ya que se extraen únicamente con 8 sonidos de vehículos de alta velocidad circulando a diferentes velocidades desde los 100km/h a 315km/h.

En cuanto al indicador secundario del confort del ruido de fondo, Pariziet *et al.* (2002) indican el parámetro balance de *loudness* definido es el mejor predictor de la preferencia para los sonidos ecualizados para igualar su *loudness*. No obstante, ellos mismos indican que su validez debe de ser comprobada con una muestra representativa de vehículos, velocidades y nuevos usuarios.

Choi *et al.* (2011) apuntan a la variable *sharpness*, como indicador secundario del confort, ya que correlaciona con la percepción de molestias del sonido y es independiente, a diferencia del *loudness*, del nivel de ruido percibido y del nivel de presión sonora. Sin embargo, esta afirmación no está demostrada con los resultados del estudio.

En el estudio de Yang *et al.* (2014) se ecualizan los sonidos a igual *loudness*. Tras la evaluación subjetiva de la calidad sonora de los vehículos de dichos sonidos, la variable *sharpness* es la que presenta mayor correlación con dicha evaluación.

A continuación se muestran, a modo de resumen, las variables psicoacústicas analizadas y las conclusiones extraídas de los estudios centrados únicamente en la evaluación del ruido de fondo.

Las variables se han separado en dos tablas según si el objetivo es buscar el primer indicador del confort acústico relacionado con el ruido de fondo, tabla 2.8, o buscar un indicador secundario, una vez eliminada la influencia del primer indicador (generalmente *el loudness*) del confort acústico, tabla 2.9.

Tabla 2.8: Variables analizadas para identificar el indicador primario de confort en vehículos de alta velocidad

Autor del estudio	Variable analizada	Conclusiones
Letourneaux et al., 2000	Nivel de presión sonora ponderada A	El nivel de presión sonora ponderado A no es el mejor indicador del confort.
Pariziet et al., 2002	Nivel de presión sonora equivalente A y <i>loudness</i>	La correlación entre la preferencia y el nivel de presión sonora equivalentes A es muy buena (R=-0,98). Los autores concluyen que, en este caso, el uso de otros indicadores como el <i>loudness</i> no es necesario.
Boullet et al., 2007	Nivel de presión sonora ponderado A y <i>loudness</i> .	La molestia está más correlacionada con el <i>loudness</i> que con el nivel de presión sonora ponderado en A. Se calcula un modelo de regresión lineal para predecir la molestia con ambas variables. El modelo que predice el logaritmo de la molestia con el <i>loudness</i> presenta un R= 0,987 frente a R= 0,935 con el nivel de presión sonora ponderado A.
Zhang et al., 2012	Presión Sonora Equivalente lineal y ponderada A y <i>loudness</i>	El <i>loudness</i> el que presenta mayor correlación con el confort acústico.
Choi et al., 2011	Nivel de presión sonora ponderado A, <i>loudness</i> , <i>sharpness</i> , <i>roughness</i> y <i>fluctuation strength</i> .	<i>Loudness</i> es el mejor estimador de la molestia en los sonidos de vehículos y está muy correlacionado con el nivel de presión sonora ponderada A. Se indica que <i>sharpness</i> podría ser un buen estimador secundario pero no se incluyen resultados.

Tabla 2.9: Variables analizadas para identificar el indicador secundario de confort en vehículos de alta velocidad

Autor del estudio	Variable analizada	Conclusiones
Pariziet et al., 2002	Presión sonora equivalente sin ponderar y con ponderación A, B y C; <i>sharpness, tonality, fluctuation.</i>	Se calcularon modelos de regresión lineal y logarítmica de la preferencia con las variables. Se obtuvo un modelo lineal de la preferencia con <i>tonality</i> y <i>sharpness</i> como variable dependientes como mejor estimador pero solo válido para un grupo de evaluadores. (Se ecualizaron los estímulos para anular la influencia del <i>loudness</i> .)
Pariziet et al., 2002	Balance de <i>loudness</i> (Se ecualizaron los estímulos para anular la influencia del <i>loudness</i>)	Correlaciona con el confort acústico, aunque esta correlación no es elevada. Necesita ser comprobado con más usuarios ya que no se obtienen resultados concluyentes.
Choi et al., 2011	Nivel de presión sonora ponderado A, <i>loudness, sharpness, roughness</i> y <i>fluctuation strength.</i>	Se indica que <i>sharpness</i> podría ser un buen estimador secundario pero no se incluyen resultados.
Yang et al., 2014	<i>Nivel de presión sonora ponderado A, loudness, sharpness, roughness, tonality, fluctuation strength, articulate index</i> y <i>speech intelligibility index.</i> (sonidos ecualizados con igual <i>loudness</i>).	La correlación más elevada con la valoración subjetiva de molestia fue la variable <i>sharpness</i> .

En cuanto a los mejores indicadores de componentes adicionales que pueden formar parte del ruido en interior del vehículo, no se obtienen resultados concluyentes en cuanto a indicadores diferentes del confort. En el estudio de Boulet *et al.* (2007), cuando estudia la molestia del ruido de fondo con sonidos emergentes, para los sonidos emergentes debidos tonos puros de la excitación paramétrica provocada por el paso por las traviesas, los autores concluyeron que el nivel de presión sonora en dB(A) era mejor indicador de la molestia. Para el ruido con tonos puros provocados por la apertura y cierre de puertas se concluyó que la variable *Longterm Loudness Maximun* (Glasberg y Moore, 2002) y nivel de presión sonora ponderado A son buenos estimadores del confort, pero calculados solo sobre la señal emergente sin ruido de fondo. Hay que tener en cuenta, en cuanto a la validez externa de los resultados, que todos los sonidos de este estudio fueron ecualizados para conseguir un diseño experimental con el sonido de fondo y las señales emergentes.

2.6. Conclusiones

Referentes a la medida objetiva del sonido interior de vehículos de alta velocidad

El ruido en el interior de los vehículos es un fenómeno complejo, provocado por multitud de fuentes sonoras y condicionado por los numerosos factores que influyen sobre el mismo.

Los factores de influencia identificados en la revisión bibliográfica pueden provenir tanto del diseño del vehículo como de las condiciones de circulación del mismo. En el presente trabajo, para ser capaces de controlar estos múltiples parámetros de influencia, se partirá de una clasificación de los mismos. Esta tarea se llevará a cabo en la fase de medida objetiva del sonido en el interior de los vehículos, descrito posteriormente en el capítulo 3.

De entre todos, el diseño constructivo del vehículo y su motorización son los factores asociados al material móvil que influyen especialmente en el ruido interior. En el presente trabajo se identificarán las características de los vehículos de alta velocidad que circulan en territorio español para poder definir la muestra de vehículos a registrar de modo que sea posible asegurar la representatividad de los mismos.

Mediante la definición de las condiciones en que se debe medir el vehículo en función del objetivo de la medida, se pueden controlar ciertos factores de influencia. En el presente trabajo se definirán unas características objetivo del sonido a registrar que permitan establecer unas condiciones de medida adecuadas con la finalidad de controlar parte de los factores de influencia.

La norma UNE-EN ISO 3381:2011 identifica unas posiciones de medida tanto en planta como en altura a lo largo del vehículo. Debido al carácter experimental del estudio de campo incluido en el presente trabajo, se deberá definir, en base a esta norma y respetando los objetivos del presente trabajo, una caracterización del vehículo mediante la definición de un número de puntos de registro adecuado al tiempo de registro y con distribución a lo largo del vehículo, que permita el control de otro grupo de factores de influencia.

En cuanto a la forma de captar los sonidos, el maniquí acústico ha sido utilizado para el registro del sonido en gran número de los estudios revisados ya que la información sobre el carácter tridimensional de la localización de la fuente de sonido respecto a la persona que lo escucha, así como la influencia de la señal en el aparato auditivo, son fundamentales en la percepción aurál normal del sonido. Por tanto, en el presente trabajo, se optará por este modo de toma de medidas.

Referentes a la percepción del sonido en vehículos de alta velocidad

Existen numerosos tipos de métodos para la evaluación de la percepción de sonidos, además de numerosas variaciones y modos de aplicación de dichos métodos. Cada uno de estos métodos presenta ventajas e inconvenientes que permiten valorar su aplicación en función del objetivo perseguido. Existe un consenso en la bibliografía en que los métodos de evaluación por pares aportan fiabilidad a la hora de detectar pequeñas

diferencias entre sonidos para el atributo evaluado pero, por el contrario, presentan el inconveniente de la elevada duración de la evaluación, al tener que comparar todas las parejas de sonidos. Los métodos de evaluación directa son más rápidos, pero presentan menor fiabilidad en la evaluación. En el presente trabajo se seleccionará, en base al conocimiento existente, un método de evaluación para el nivel de molestias adecuado a las características del sonido a evaluar, duración de la prueba, tipo de evaluador y fiabilidad requerida de la evaluación.

Para garantizar una evaluación representativa del usuario final, se debe seleccionar como evaluadores a un grupo adecuado de compradores o usuarios potenciales, evitando seleccionar a profesionales de sector del producto evaluado (Nordtest, 2002). Por otra parte, los sujetos que participen en la evaluación no deberían tener ningún problema auditivo (Otto *et al.*, 2001).

La duración del test de evaluación subjetiva no debería superar los 45 minutos (Otto *et al.*, 2001), aunque depende de la complejidad de la evaluación (Nordtest, 2002).

Existe gran disparidad entre autores respecto al número de evaluaciones por sonido. La definición del número de evaluaciones depende del objetivo que se plantea, por tanto, forma parte del presente trabajo definir el número de evaluaciones por sonido necesarias para una evaluación fiable.

Los auriculares son el sistema que más se utiliza, asegurando que cada evaluador oye el mismo estímulo bajo las mismas condiciones que el resto, simplificando la infraestructura necesaria. El uso de auriculares provoca una pérdida de realismo a la hora de evaluar la percepción de las bajas frecuencias del sonido, recomendado en estas ocasiones el uso de un subwoofer. Sin embargo, para los sonidos de vehículos ferroviarios de alta velocidad, según las conclusiones de Pariziet *et al.* (2002b) no parece necesario. Por tanto, se optará por emplear este sistema de escucha en el presente trabajo.

En cuanto a la duración de los estímulos, se recomienda que ésta sea suficiente para dar una impresión estable del producto o proceso cuyo sonido está siendo evaluado, raramente es necesaria superar los dos minutos de duración. De este modo, se decide emplear un tiempo de duración del estímulo de 90 segundos en las fases experimentales del presente proyecto. El objetivo de una exposición larga al sonido es que los evaluadores identifiquen los sonidos que les resulten molestos en el largo plazo, ya que en un tren en condiciones reales los pasajeros están expuestos a este sonido durante largos periodos de tiempo.

Referentes al estado del arte de modelos psicoacústicos de predicción de nivel de molestias

Se puede concluir, tras la revisión realizada, que no existe un indicador o modelo psicoacústico de predicción del nivel de molestias para el ruido de fondo en interior del vehículo de alta velocidad representativo de la percepción del pasajero en un trayecto comercial.

En la evaluación del ruido de fondo, los estudios presentan problemas a la hora de asegurar la representatividad del sonido y, por tanto, la validez externa de las

conclusiones. Además, las conclusiones de los diferentes estudios no son coincidentes en lo que se refiere a la mejora aportada de la variable *loudness* como indicador del confort respecto al nivel de presión sonora equivalente ponderado A.

.

Capítulo 3

**Objetivos y
plan de trabajo**

3.1. Introducción

La revisión del estado de arte expuesta en el capítulo anterior pone de manifiesto que no existe un modelo para predecir el nivel de molestia del ruido interior de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial con validez externa. Esto es debido, principalmente, a que los sonidos analizados no son representativos del ruido interior en un trayecto comercial ya que incluyen sonidos registrados a diferentes velocidades de circulación, tienen en cuenta la variabilidad provocada únicamente por uno o dos vehículos o modifican artificialmente los sonidos para generar nuevos estímulos a partir de los registros realizados en el interior del vehículo.

En este contexto se hace necesario abordar la generación de un modelo de predicción del nivel de molestia del ruido interior partiendo de la definición de:

- Un procedimiento de medida del vehículo que permita controlar los sonidos a utilizar en el modelo.
- Una metodología adecuada de evaluación subjetiva del nivel de molestia.
- Una fase experimental lo suficientemente amplia para obtener datos para la generación de un primer modelo representativo del confort acústico en trayectos comerciales de este tipo de vehículo.

3.2. Objetivos

El objetivo principal de la presente investigación es realizar una aproximación metodológica a la obtención de un modelo psicoacústico que permita predecir el nivel de molestias de los pasajeros en condiciones de circulación comerciales, así como la comparativa de diferentes vehículos ferroviarios de alta velocidad en cuanto a su calidad sonora.

De este modo se establecerán las bases para obtener modelos que, en un futuro, permitirán el planteamiento de objetivos de calidad sonora cuyo cumplimiento asegure el confort del pasajero.

Para la consecución del objetivo principal del proyecto, deberán alcanzarse los siguientes objetivos parciales:

- O1. Definir y poner a punto un procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial que permita la caracterización psicoacústica de diferentes vehículos para su comparativa.
- O2. Definir una metodología de evaluación del nivel de molestia de los sonidos registrados representativa de la percepción del pasajero.
- O3. Construir una base de datos representativa de registros sonoros de vehículos de alta velocidad y su percepción del nivel de molestia.
- O4. Evaluar el control de los factores de influencia del ruido en el interior de los vehículos.

- O5. Validar la metodología de evaluación de la percepción del nivel de molestia con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos.
- O6. Analizar si existen diferencias que permita comparar vehículos de alta velocidad en cuanto a su nivel de molestia percibido y la caracterización psicoacústica.
- O7. Calcular un primer modelo que permita predecir el nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad a partir de variables psicoacústica en condiciones de circulación comerciales, que pueda ser actualizado y validado mediante la ampliación de la base de datos de registros sonoros y percepciones.

Adicionalmente, a los objetivos del presente trabajo, se incluye un objetivo secundario para la exploración de otros atributos que subyacen en la percepción que tiene los pasajeros a la hora de evaluar el ruido interior para su aplicación en futuras investigaciones (O8).

Los objetivos planteados se encuentran relacionados, tal y como se muestra en la figura 3.1.

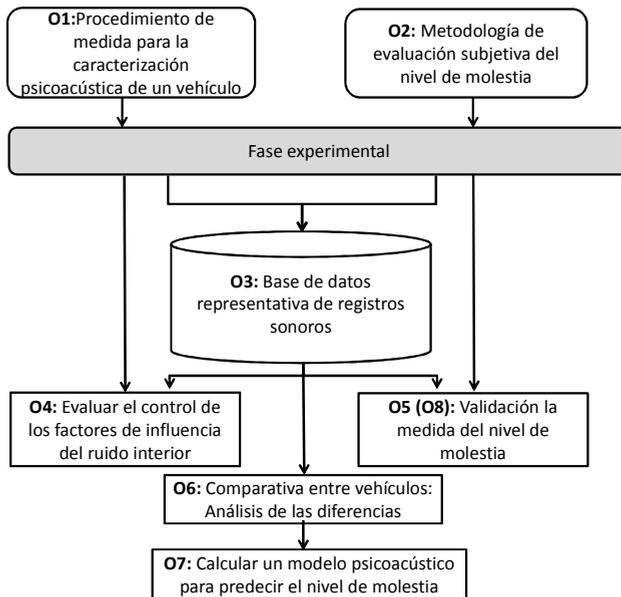


Figura 3.1: Relación entre los objetivos

Los objetivos 1 y 2, son objetivos metodológicos, que una vez definidos se aplicaron en una fase experimental para el cumplimiento de objetivo 3, que permitió disponer de datos suficientes alcanzar el resto de objetivos. Mediante el objetivo 4 y 5 se validaron cada uno de los objetivos metodológicos, respectivamente. Por último, se analizaron los datos disponibles en la base datos para analizar las diferencias entre los distintos

vehículos para su comparación, objetivo 6, y para el cálculo de un primer modelo predictor de la calidad sonora, objetivo 7.

Las condiciones elegidas para asegurar la validez externa de los resultados obtenidos, que se desarrollarán en detalle durante el presente trabajo son:

- Utilizar solo sonidos que correspondan a ruido de fondo de vehículos de alta velocidad vigentes y en uso en trayectos comerciales.
- Evaluar el nivel de molestia por un colectivo de usuarios de tren, es decir, que viajen con una frecuencia determinada en este medio de transporte.
- Realizar una reproducción fiel de los sonidos registrados en el interior del vehículo.

3.3. Plan de trabajo

Para alcanzar los objetivos propuestos se elaboró un plan de trabajo en el que se contemplaron 8 fases. La figura 3.2 muestra las diferentes fases relacionadas con los objetivos y principales hitos.

Con fondo azul se muestran los aspectos relacionados con la medida de los vehículos para su caracterización y en verde los aspectos relacionados con la metodología de evaluación subjetiva del nivel de molestia.

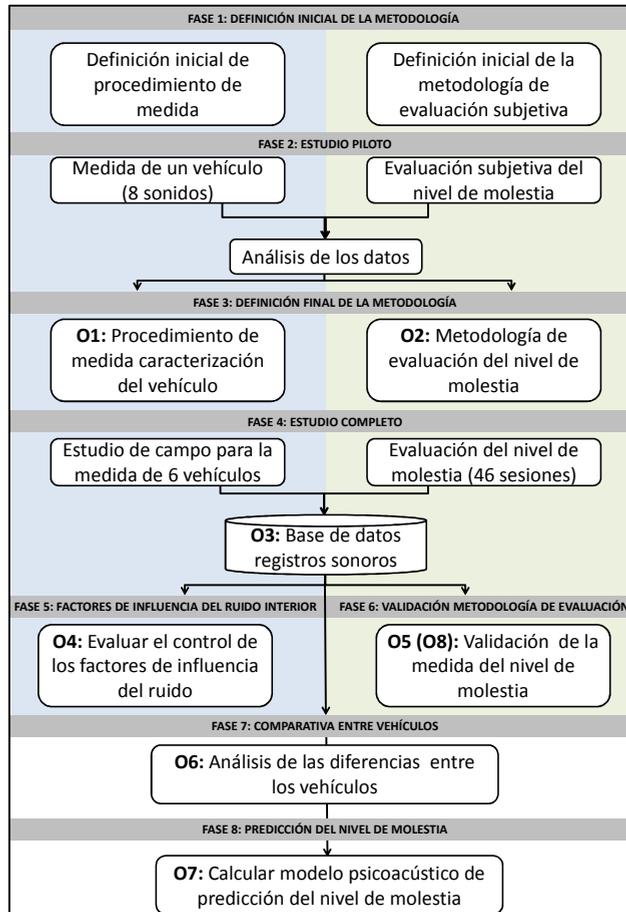


Figura 3.2: Esquema del plan de trabajo y relación con los objetivos

A continuación se describe cada una de las fases en las que se divide el proyecto de investigación:

Fase 1. Definición inicial de la metodología

El objetivo de esta primera fase fue la definición inicial de los objetivos metodológicos 1 y 2, es decir:

- El procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad.
- La metodología de valoración subjetiva del nivel de molestias en base al conocimiento disponible.

Las fases 1 y 3 de definición de inicial y final de la metodología se describen en dos bloques.

Fase 1.1. Procedimiento inicial de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad

En una primera fase de definición del procedimiento de medida, se determinó el alcance del estudio de campo estableciendo las condiciones a cumplir para considerar la medida representativa de la alta velocidad, así como las condiciones experimentales en la que se desarrollaría el estudio de campo y que debían ser consideradas en el procedimiento.

A continuación, se identificaron y clasificaron los factores que influyen en el ruido interior para la búsqueda de estrategias de control en la fase experimental. En base al control de los factores, se definieron las condiciones de medida que se deben cumplir para dar validez a los sonidos registrados y una primera aproximación a la distribución de puntos de medida en el interior del vehículo que debería ser optimizada mediante los datos recopilados en el estudio piloto.

Para el procesado de los registros se propuso una caracterización psicoacústica en base a los trabajos anteriores de otros autores incluidos en la revisión bibliográfica.

Fase 1.2. Metodología inicial de evaluación del nivel de molestia de los sonidos

La fase inicial de definición de la metodología de evaluación del nivel de molestia en base al conocimiento existente fue muy completa debido a la gran cantidad de información disponible de la aplicación experimental de las metodologías de evaluación subjetiva.

En concreto se definió la escala de referencia para el nivel de molestias, las características del entorno de escucha incluyendo los medios materiales necesarios para realizar la evaluación, el protocolo a seguir en todas las fases de evaluación, y los criterios de inclusión y exclusión de los evaluadores.

Fase 2. Estudio piloto y análisis de los datos

Para terminar de definir ambas metodologías era necesaria la realización de una fase experimental en la que se registraron sonidos de un vehículo de alta velocidad que posteriormente fueron valorados subjetivamente en cuanto al nivel de molestia percibido. Los datos recopilados fueron analizados y los resultados sirvieron para validar aspectos de la definición metodológica propuesta, reformularla e incorporar nueva información que permitió continuar la definición del procedimiento de medida de los vehículos y la metodología de evaluación subjetiva.

Fase 3. Definición final de la metodología

El objetivo de esta fase fue completar la definición inicial del procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad y de la metodología de valoración subjetiva del nivel de molestias incorporando los resultados obtenidos del estudio piloto, cumpliendo los objetivos 1 y 2 del estudio.

Fase 3.1. Procedimiento final de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad

El procedimiento de medida se completó, gracias al estudio piloto, terminando de definir el protocolo de medida del vehículo. Se redefinieron las condiciones de medida de cada vehículo mediante una condición que limitaba la velocidad de circulación y se definió la distribución de puntos de registro en el interior del vehículo.

Además, en cuanto al procesado de la información, la caracterización psicoacústica de los sonidos fue revisada respecto a la definición inicial para adecuarla a los sonidos objeto del estudio.

Fase 3.2. Metodología final de evaluación del nivel de molestia de los sonidos

La definición final de la metodología de evaluación del nivel de molestia sufrió escasas modificaciones respecto a su definición inicial ya que los resultados de la validación realizada en el estudio fueron positivos. En este caso, los resultados del estudio piloto sirvieron para definir con precisión el número de evaluaciones por sonido para una estimación adecuada del nivel de molestia, fijar el número de sonidos a evaluar en las sesiones de evaluación y asentar la definición de los criterios de selección de los evaluadores.

Fase 4. Estudio completo

La aplicación experimental de la metodología desarrollada en las fases anteriores se realizó en esta fase. En el estudio completo se midió el ruido interior de un total de seis vehículos de alta velocidad, recopilando un total de 46 sonidos para la base de datos representativa de sonidos de vehículos de alta velocidad, objetivo 3. En el estudio completo todos los sonidos fueron evaluados por ocho evaluadores diferentes para conocer su nivel de molestias, mediante la realización de un total de 46 sesiones de evaluación. Los datos procesados del estudio completo fueron analizados en las siguientes fases para alcanzar el resto de objetivos planteados.

Fase 5. Factores de influencia del ruido interior

En esta fase, destinada al cumplimiento del objetivo 4, se analizaron los sonidos de la base de datos con el objetivo de evaluar la adecuación del control realizado sobre los factores de influencia del ruido interior. Primero, se comprobó la validez de las hipótesis que sirvieron de base para la definición del procedimiento de medida de los vehículos. Una vez validadas se procedió a la cuantificación de la variabilidad controlada por los factores incluidos en el diseño experimental mediante el cálculo de la varianza explicada por dichos factores para cada una de las variables de interés.

Fase 6. Validación de la metodología de evaluación subjetiva

En esta fase, la metodología definida para la evaluación del nivel de molestias (objetivo 2) fue validada mediante el cálculo de la fiabilidad de la medida, además de un exploratorio para validar la selección de los sonidos de referencia y uso de la escala cumpliendo, así, el objetivo 5. Se incluyó en esta fase el exploratorio de los atributos aplicables a semántica diferencial, objetivo secundario 8 del presente trabajo.

Fase 7. Comparativa de los vehículos

En esta fase se analizaron las diferencias que presentaban los diferentes vehículos tanto en su nivel de molestia como en su caracterización psicoacústica. Este análisis permitió la comparativa de vehículos de alta velocidad, objetivo 6 del presente trabajo.

Fase 8. Predicción del nivel de molestia

El objetivo de esta fase era el cálculo de un modelo para predecir el nivel de molestia a partir de las variables psicoacústicas, objetivo 7, mediante un análisis de regresión lineal múltiple a partir de los datos disponibles de los sonidos de la base de datos. Este modelo fue validado en cuanto al cumplimiento de los supuestos de la regresión lineal. Debido al tamaño insuficiente de la base de datos no fue posible la validación externa del modelo, realizando una aproximación para la estimación del error de predicción del modelo aplicado a nuevos sonidos.

Capítulo 4

Materiales y Métodos

4.1. Introducción

En los siguientes apartados se detallan los pasos necesarios para la consecución de los objetivos descritos en el capítulo 3.

En el apartado 4.2. se expone el planteamiento metodológico que va a servir de esquema conductor.

En el apartado 4.3. se describe la definición inicial de la metodología a partir de la información disponible de estudios anteriores, recopilada en el capítulo 2.

Para completar la definición de la metodología se realizó un estudio piloto que se explica en el apartado 4.4.

La definición final de la metodología se describe en el apartado 4.5, cumpliendo los objetivos 1 y 2.

En el último apartado 4.6. se expone el estudio completo, realizado mediante la aplicación experimental de las metodologías desarrolladas, que permitió alcanzar los objetivos del 3 al 5.

4.2. Planteamiento metodológico

Para abordar la definición de la metodología se siguió la estructura de Rossi *et al.* (2005) que propone los aspectos principales a definir y protocolizar con el objetivo de estandarizar una metodología basada en *jury test* con validez metrológica.

La propuesta de Rossi *et al.* (2005) con sus comentarios se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Aspectos a definir y protocolizar en un *jury test* y comentarios (Rossi *et al.*, 2005)

		Comentarios
Estímulo	Representatividad	Los conjuntos de estímulos seleccionados deben ser representativos del tipo de los posibles estímulos que son objeto de evaluación.
	Adquisición	Los estímulos pueden ser naturales o sintetizados. Para los estímulos naturales se debe definir un protocolo de adquisición.
	Producción/ Reproducción	Para los estímulos sintéticos se debe definir un protocolo de adquisición y para los estímulos naturales se debe definir un protocolo de reproducción.
Jurado	Representatividad	La composición del jurado debería reflejar las características de los usuarios del producto al que se dirige. En algunos casos, solo deben considerarse jurados concretos como operadores o usuarios. El entrenamiento puede favorecer la consistencia de los resultados, sin embargo, puede convertirse en un factor de sesgo, ya que el jurado deja de estar compuesto por gente “común”.
	Selección/ Entrenamiento	
	Número de sujetos	El número de sujetos debe ser suficiente para asegurar la estabilidad estadística. Monitorizar la convergencia de los resultados puede ayudar.
Escala	Tipo de escala: Ordinal/Nominal /Intervalo	El tipo de escala es quizá el aspecto más importante a la hora de construir una escala. El tipo de escala es importante cuando el <i>jury test</i> está pensado para realizar una medida en una escala dada.
Test	Estímulo: Presentación / producción	Los estímulos pueden ser naturales o sintetizados. En el primer caso un protocolo para su presentación se hace necesario. En el segundo caso también es necesario un protocolo de producción.
	Rol de los sujetos	Un sujeto es considerado activo si puede influir en la producción del estímulo y pasivo si no lo hace. Además es importante definir el tipo de evaluación que debe realizar (ej: ausencia o presencia de una sensación, preferencia, etc)
	Duración	La secuencia de la presentación de los estímulos y la duración del test puede influenciar el resultado.
	Implementación del test	Requerimientos de software, hardware y protocolos a seguir.
Análisis de los datos	Control de la respuesta	Deben considerarse protocolos de inclusión y exclusión.
	Construcción de la escala/medida	El análisis de los datos depende de los objetivos del test, tanto si es la construcción de una escala como si es la medida dada una escala.
	Validación	Debe de considerarse una estrategia de validación y documentarse.
	Resultados/ evaluación de la incertidumbre	Es un requerimiento estándar de metrología.

Los aspectos descritos por Rossi *et al.* (2005) se retomarán al final de los apartados 4.3 y 4.5 para los diferentes grados de definición de la metodología.

4.3. Definición inicial de la metodología

La definición de la metodología se divide en dos grandes bloques según los objetivos metodológicos 1 y 2, de los objetivos descritos en el capítulo 3.

En el primer bloque *4.3.1 Procedimiento inicial de medida de un vehículo de alta velocidad para su caracterización psicoacústica* se abordará el primero de los objetivos “definir y poner a punto un procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial que permita la caracterización psicoacústica de diferentes vehículos para su comparativa”.

En segundo bloque *4.3.2 Metodología inicial de evaluación subjetiva del nivel de molestia* se abordará el segundo de los objetivos “definir una metodología de evaluación del nivel de molestia de los sonidos registrados representativa de la percepción del pasajero”.

Por último, se incluye un tercer bloque complementario *4.3.3 Definición inicial del procesado de la información* donde se describirán procedimientos de análisis en los que se basan los objetivos 6 y 7, “analizar si existen diferencias que permita comparar vehículos de alta velocidad en cuanto a su nivel de molestia percibido y la caracterización psicoacústica” y “calcular un modelo que permita predecir el nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad a partir de variables psicoacústicas en condiciones de circulación comerciales”. El motivo de incluir este tercer bloque es que las metodologías a definir deben contemplar una serie de requisitos que vienen condicionados por las técnicas estadísticas empleadas en el procesado de información.

4.3.1. Procedimiento inicial de medida de un vehículo de alta velocidad para su caracterización psicoacústica

4.3.1.1. Introducción

El procedimiento de medida experimental debe respetar las condiciones elegidas para el desarrollo del presente trabajo definidas en el capítulo 3 *Objetivos y plan de trabajo*. De dichas condiciones aquellas con más impacto en el estudio de campo son:

- Utilizar solo sonidos de modelos de vehículos de alta velocidad vigentes y en uso en trayectos comerciales.
- Realizar una reproducción fiel de los sonidos registrados en el interior del vehículo.

Debido a las condiciones elegidas y al carácter experimental del estudio de campo se abordó en la definición inicial los siguientes puntos:

- Definición de alta velocidad, apartado 4.3.1.2, donde se describe el concepto de alta velocidad en territorio español y cómo se acota para el presente trabajo.
- Condiciones experimentales del estudio de campo. Las condiciones en las que se va a desarrollar el estudio de campo de medida de los vehículos, descritas en el apartado 4.3.1.3, son fundamentales para la correcta aplicación de los procedimientos a definir.
- Factores de influencia en nivel de ruido. Estos factores fueron identificados y clasificados en el apartado 4.3.1.4 para poder proceder a su control en el procedimiento de medida.
- Control de los factores de influencia. Para cada uno de los factores de influencia se definió cómo controlar su efecto en el estudio experimental, tal y como se detalla en el apartado 4.3.1.5.
- Definición inicial de las condiciones de medida de cada vehículo. En el apartado 4.3.1.6 se establece el contexto en que se debe realizar la medida incluyendo vehículo, vía, condiciones que se deben dar en el interior y condiciones de circulación, para el control de algunos de los factores anteriores.
- Distribución inicial de los puntos de registro en el interior de los vehículos. En el apartado 4.3.1.7, se realizó una primera aproximación basada en la norma UNE-EN ISO 3381:2011 para el control de los factores cuya influencia varía según la localización del asiento.

4.3.1.2. Definición de alta velocidad

Una de condiciones elegidas para el desarrollo del presente trabajo es utilizar solo sonidos que correspondan a ruido de fondo de vehículos de alta velocidad vigentes y en uso en trayectos comerciales.

La definición de transporte ferroviario de alta velocidad es múltiple, según la propia UIC¹⁷ (Union Internacional de Chemins de Fer), ya que varía según el criterio utilizado, pues responde a una realidad compleja (UIC, 2015).

En territorio español, tal y como recoge el Real Decreto 1434/2010, basada en la definición según la Unión Europea, incluida en la Directiva 96/48, el sistema ferroviario español incluye:

Redes.-El sistema ferroviario español que forma parte del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad incluye:

- Las líneas especialmente construidas para la alta velocidad, equipadas para velocidades por lo general iguales o superiores a 250 km/h,
- Las líneas especialmente acondicionadas para la alta velocidad equipadas para velocidades del orden de 200 km/h,

¹⁷ Asociación mundial para la cooperación entre los principales actores del sector ferroviario internacional.

- Las líneas especialmente acondicionadas para la alta velocidad, de carácter específico debido a dificultades topográficas, de relieve o de entorno urbano, cuya velocidad deberá ajustarse caso por caso. Esta categoría incluye también las líneas de interconexión entre las redes de alta velocidad y convencionales, los tramos de estación, el acceso a las terminales, almacenes, etc., que son recorridos a velocidad convencional por material rodante de «alta velocidad».

Estas redes incluirán los sistemas de gestión del tráfico, de posicionamiento y de circulación, instalaciones técnicas de tratamiento de datos y de telecomunicaciones previstas para el transporte en dichas líneas con el fin de garantizar una explotación segura y armoniosa de la red y la gestión eficaz del tráfico.

Vehículos.– El sistema ferroviario español que forma parte del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad engloba los vehículos concebidos para circular:

- A una velocidad de 250 km/h como mínimo en las líneas especialmente construidas para la alta velocidad, pudiéndose al mismo tiempo, en las circunstancias adecuadas, alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h, o bien,
- a una velocidad del orden de 200 km/h en las líneas especialmente acondicionadas para la alta velocidad equipadas para velocidades del orden de 200 km/h,, en caso de ser compatibles con las posibilidades de esas líneas.
- Además, los vehículos concebidos para funcionar a una velocidad máxima inferior a 200 km/h que posiblemente vayan a circular por toda la red transeuropea de alta velocidad, o por una parte de ésta, cuando sean compatibles con los niveles de rendimiento de dicha red, deberán reunir los requisitos que garanticen un funcionamiento seguro en esa red.

Sin embargo, la definición de la directiva europea, y en consecuencia la definida en el Real Decreto 1434/2010, es considerada por la UIC como demasiado amplia ya que recoge demasiados sistemas bajo la denominación de alta velocidad.

Los problemas que detecta la UIC (2015) con esta definición, es que denomina líneas de alta velocidad a aquellas que por motivos de seguridad el vehículo circula a velocidades de 160 o 180 km/h durante todo el trayecto (como en zonas muy pobladas). Además, en países donde la infraestructura ferroviaria no está muy desarrollada, la introducción de vehículos de alta velocidad que operan a velocidades cercanas a los 160 km/h son también considerados como alta velocidad bajo esta definición.

4.3.1.2.1. Definición de alta velocidad en el presente estudio

En el presente estudio se acotó la definición de alta velocidad limitándola a los siguientes supuestos:

- **Vehículos:** Los vehículos concebidos para circular a una velocidad de 250 km/h como mínimo en las líneas especialmente construidas para la alta velocidad, pudiéndose al mismo tiempo, en las circunstancias adecuadas, alcanzar velocidades superiores a los 300 km/h.

- **Líneas:** Las líneas especialmente construidas para la alta velocidad, equipadas para velocidades por lo general iguales o superiores a 250 km/h.

Además del cumplimiento de estos dos supuestos, la velocidad comercial ¹⁸del vehículo en el trayecto deberá ser superior 250 km/h y el estado de mantenimiento del vehículo y vía deben ser los marcados como válidos por un operador de vehículos ferroviarios.

4.3.1.2.2. Vehículos de alta velocidad en España

Siguiendo la definición de alta velocidad para el presente trabajo, en la tabla 4.2 se incluyen los vehículos que operan en España considerados de alta velocidad.

Tabla 4.2: Vehículos de alta velocidad en España. Fuente RENFE (2015).

Vehículo	Tracción y Tipo de motor	V Max km/ h	Composición	Año puesta en servicio (Unidades en servicio)
AVE Serie 100R Automotor eléctrico S-100 (Alstom)	Eléctrica (8 motores trifásicos síncronos autopilotados)	300 km/ h	Composición mínima: 8 coches (M1+R1+R2+R3+R4+R5+R6+ R7+R8+M2). Composición múltiple: 16 coches (dos composiciones).	S100-1992 S100R -2009. (22)
AVE Serie 102/112 Automotor eléctrico S-102 y S-112 (Talgo/ Bombardier)	Eléctrica (8 asíncrono).	330 km/ h	Composición mínima: M + 12 R + M.	2005 -S102 (16 -S102) (30 - S112)
AVE Serie 103 Automotor eléctrico S-103 (Siemens)	Eléctrica (16 asíncronos.)	350 km/ h	Composición mínima: Ocho coches (Mc-R-M-R-R-M-R-Rc). Composición múltiple: 16 coches (dos composiciones)..	2007 (26 unidades)
Avant Serie 104 /114 Automotor eléctrico S-104/114 (Alstom/CAF)	Eléctrica (Asíncrono trifásico)	270 km/ h	Mc+Mi+Mi+Mc	2004 (20)
Alvia Serie 120 Automotor eléctrico S-120 (CAF, con motor Alstom)	Eléctrica (8 asíncronos - Alstom MTA / 550 H.)	250 km/ h	Composición mínima: 4 coches Mc-M-M-Mc.	2006 (12 - S120 + 16 de S-120 29 -S121).

¹⁸ Velocidad máxima impuesta por el operador.

Alvia Serie 130 Automotor eléctrico S-130 (Talgo/ Bombardier)	Eléctrica (8 asíncronos).	250 km/ h	Composición máxima: M + 11 R + M.	2007
Alvia Serie 730* Híbrido (Talgo/ Bombardier)	Híbrido (diésel /eléctrica)	250 km/ h	M+11R+M	2012 (14)
Avant Serie 121** Automotor eléctrico S-121 (CAF, con motor Alstom)	Eléctrica (8 asíncronos - Alstom MTA / 550 H)	250 km/ h	Composición mínima: 4 coches Mc-M-M-Mc.	2006 (12 - S120 + 16 de S-120 29 -S121).

*Evolución del Alvia 130

**Evolución del Alvia 120

4.3.1.3. Condiciones experimentales del estudio de campo. Consideraciones

Para poder cumplir los requisitos anteriores que definen la alta velocidad, el registro de los sonidos se realizó durante pruebas programadas de verificación de vehículos considerados de alta velocidad.

Estas pruebas se realizan con el vehículo sin pasajeros, solo contando habitualmente como ocupantes el propio conductor y de tres a cuatro técnicos que se ubican, durante las pruebas, en el puesto de conducción.

Los vehículos utilizados para estas pruebas son vehículos que forman parte de la flota del operador, que están en uso habitual para transporte comercial con pasajeros.

El estado de mantenimiento de los vehículos es el mismo que el de los vehículos en trayecto comercial, es decir, son vehículos que siguen el protocolo de mantenimiento, por tanto, el nivel de mantenimiento habitual de los vehículos a la hora de realizar las pruebas entra en los niveles considerados normales para trayectos con pasajeros.

El trayecto realizado durante las pruebas de verificación se corresponde con un tramo del trayecto que realiza el vehículo en su trayecto comercial, no tratándose de una vía de pruebas, sino de un trayecto típico con sus características reales de trayecto comercial. En estos trayectos las vías permiten la alta velocidad y son de ancho internacional.

Estas condiciones presentan dos limitaciones que afectarán al diseño experimental: la dificultad de aislar el vehículo de la influencia de los factores relacionados con el trayecto realizado y la limitación del tiempo disponible para realizar las mediciones:

Así:

- Estas pruebas de verificación se realizan de manera muy poco frecuente. Para cada vehículo se pueden realizar uno o dos trayectos de pruebas al año. Este hecho limita el acceso a los vehículos del estudio de campo, por tanto, se hace necesario una robusta planificación del mismo, debido a la dificultad de repetir el registro de sonidos en campo de un vehículo concreto.

- En función de la naturaleza de la prueba, la duración varía, así como el tiempo en que el vehículo circula a velocidad comercial. El tiempo que el vehículo circula a velocidad comercial es menor que cuando realiza un trayecto comercial con pasajeros. Esta limitación hace que el tiempo disponible para realizar las medidas esté muy acotado. Como en el caso anterior, una robusta planificación de las medidas es imprescindible para conseguir alcanzar el número de registros necesario de cada vehículo.
- Las pruebas se realizan para cada vehículo en un recorrido concreto con sus características propias. Este hecho hace que cada vehículo haya de ser registrado en un trayecto determinado, evitando aislar factores por la influencia de las características de la vía y del recorrido.

Como se ha comentado, la calidad de los registros sonoros debe ser alta ya que se desea una reproducción fiel.

En el estudio, para el registro de los sonidos seleccionó la cabeza artificial HMS III desarrollada por HEAD Acoustics (figura 4.1). El sistema de medida se trata de un instrumento autónomo y portátil preparado para realizar grabaciones binaurales precisas.



Figura 4.1: Cabeza artificial HMS III

Además, se utilizó un suplemento para elevar el busto maniquí hasta la altura que alcanza un pasajero sentado en el asiento (120 cm) de vehículo con la cabeza a la altura del reposacabezas.

4.3.1.4. Factores de influencia en nivel de ruido

Los factores principales que influyen en ruido interior pueden ser agrupados de la siguiente manera:

- Influencia de la interacción rueda-carril.
- Influencia de las características del vehículo.
- Influencia de las condiciones de circulación.

- Influencia de las fuentes de ruido interiores.
- Influencia de la posición dentro del vehículo.

A continuación se describen brevemente para conocer cómo controlar su efecto en fases experimentales.

Influencia de la interacción rueda-carril

El ruido producido por la interacción propia del conjunto rueda – carril y las vías junto a su conjunto de aparatos de vía es uno de los factores a tener en cuenta dentro de las fuentes sonoras ligadas a la rodadura descritas en la revisión bibliográfica.

La influencia acústica y su efecto potencial sobre el sonido radiado por la vía se muestra en la tabla 4.3 según lo describe la norma UNE-EN ISO 3381:2011. Hay que tener en cuenta que estas diferencias no se limitan a la variabilidad que se encuentra en vehículos de alta velocidad sino que incluye diferentes tipos de vehículos que circulan sobre carriles, exceptuando vehículos de mantenimiento.

Tabla 4.3: Factores de influencia del ruido irradiado por la vía y valores incluidos en UNE-EN ISO 3381:2011

Factores de influencia	Diferencias entre valores mínimo y máximo de los factores (dB)
Tipo de carril	0,7
Rigidez de la almohadilla	5,9
Factor de amortiguación de la almohadilla	2,6
Tipo de traviesa	3,1
Distancia entre traviesas	1,2
Rigidez del balasto	0,2
Factor de amortiguación del balasto	0,2
Excentricidad de la rueda	0,2
Desviación del carril	1,3
Rugosidad de la rueda	8,5
Rugosidad del carril	de 0,7 a 3,9
Carga por eje	1,1
Temperatura del aire	0,2

Estos factores influyen si los niveles de ruido medidos se comparan con los datos de medición obtenidos en otras vías. Los factores que más influyen son la rugosidad de la rueda y del carril y las almohadillas.

Las almohadillas pueden tener variaciones en función de la alineación, tiempo en servicio y mantenimiento. Además, la temperatura del carril, que puede diferir de la temperatura del aire por radiación de calor, puede influir en la temperatura de la almohadilla y, por consiguiente, en la rigidez y amortiguación de dicha almohadilla.

Hay que tener en cuenta, que dentro de estos factores no se ha incluido la velocidad de circulación, incluido en los factores de influencia debidos a las condiciones de circulación. Sin embargo, el ruido irradiado por la interacción rueda-carril tiene una alta dependencia con la velocidad de circulación así como con todos los factores que influyen en esta interacción.

Influencia de las características del vehículo

Los principales factores intrínsecos del material móvil que afectan a la calidad acústica, excluyendo aquellos que se han tenido en cuenta en la interacción rueda-carril, son los incluidos en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Factores de influencia propios del vehículos

Factores de influencia
Tipo de tracción
Estructura del vehículo (diseño y materiales)
Disposición del mobiliario dentro del vehículo

El tipo de tracción, como se indicó en el capítulo 2 *Revisión bibliográfica*, es una fuente de ruido exterior relevante. Esta puede ser eléctrica o diésel, con una cabeza motriz y/o por bogies autopulsados.

Por otra parte, la transmisión del ruido está fuertemente condicionada por el tipo de materiales que componen la estructura del vehículo. Además, el diseño del vehículo en su conjunto tiene una gran influencia sobre el ruido aerodinámico producido por el mismo.

La contribución al ruido interior de los factores aquí descritos varía en función de la velocidad de circulación, bien por el mayor o menor nivel de emisión de la fuente sonora, o bien por la contribución diferenciada de las distintas fuentes sonoras al sonido interior.

Por último, la disposición del mobiliario (asientos, mesas, portaequipajes...) también afecta a la trasmisión y percepción del sonido interior.

Influencia de las condiciones de circulación

Los principales factores que influyen debido a las condiciones de circulación se incluyen en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Factores de influencia debido a las condiciones de circulación

Factores de influencia
Velocidad de circulación
Aceleración / frenado
Eventos discretos de circulación: Túneles, estaciones, núcleos urbanos y cruces de vehículos

La velocidad de circulación es uno de los parámetros que más influye en la percepción sonora (Parizet *et al.*, 2002). Además, como se ha comentado en los apartados anteriores tiene efecto sobre el resto de los factores de influencia.

De manera separada, hay que tener en cuenta que en la situación de aceleración y frenada del vehículo el ruido de fondo no es representativo del ruido interior durante la mayor parte del trayecto.

Cuando un vehículo está circulando pueden ocurrir eventos discretos que afectan al sonido interior. En concreto, se considera que se produce un evento discreto de circulación cuando el sonido radiado por el vehículo hacia el exterior que contribuye al ruido interior no se produce exclusivamente por las reflexiones desde la vía. Los fenómenos más frecuentes que se incluyen en este factor son el paso por túneles, estaciones, núcleos urbanos y cruce con otros vehículos.

Influencia de fuentes de ruido interior

En la tabla 4.6 se indican los principales factores que influyen debido a las fuentes de ruido interior.

Tabla 4.6: Factores de influencia debido a las fuentes de ruido interior

Factores de influencia
Equipos auxiliares
Apertura y cierre de puertas
Vibración de elementos constructivos

El ruido producido por los equipos auxiliares puede influir en el sonido registrado en el interior del vehículo de forma prolongada o durante un periodo corto de duración según su funcionamiento. La UNE-EN ISO 3381:2011 divide el equipo auxiliar en dos grupos: los que normalmente funcionan durante la marcha y que deben de estar en

funcionamiento durante las mediciones de ruido y aquellos en los que el ruido del equipo auxiliar aparece de forma infrecuente (menos del 2% del tiempo).

Respecto a la apertura y cierre de puertas, son sonidos emergentes que se producen de manera ocasional con el uso de las puertas que comunican las salas.

Por último, la vibración de elementos constructivos del interior suele producirse por un montaje incorrecto del elemento o por una falta de mantenimiento del interior del vehículo.

Influencia de la posición dentro del vehículo

La posición del pasajero en el vehículo influye en su percepción sonora. Por lo tanto, el sonido medido en el interior de un vehículo puede variar considerablemente con la localización del punto de medición.

Se entiende como posición la situación en planta del pasajero dentro del vehículo y la altura.

Existen numerosos factores que pueden afectar según la posición. En la tabla 4.7 se incluyen los principales a tener en cuenta.

Tabla 4.7: Factores de influencia debido a la localización

Factores de influencia
Proximidad a ventanas
Proximidad a puertas
Proximidad a bogie o rodal
Distancia a la cabeza del vehículo
Altura (sentado / de pie)

La percepción de molestia estará influenciada por la proximidad a las ventanas, situación cercana al bogie o rodal, proximidad a las puertas de intercomunicación entre coches y fuentes de sonido auxiliares. Además el sonido varía en función del coche en el que se localice el pasajero dentro de la composición del vehículo.

Debido a la gran variabilidad, la norma UNE-EN ISO 3381:2011 indica que el número de puntos seleccionados debe ser tal que la distribución de nivel de sonido en el vehículo esté adecuadamente representada.

La altura estará condicionada si el pasajero está de pie o sentado.

4.3.1.5. Control de los factores de influencia

Con el objetivo de determinar la influencia de factores en el nivel de molestia de los pasajeros hay factores que se deben controlar y otros factores que no se pueden anular e inevitablemente irán anidados con el vehículo medido. A continuación, en la tabla 4.8, se agrupan los factores dependiendo de la naturaleza de la influencia en las condiciones

experimentales del presente trabajo y se describe cómo se va a tratar cada uno de los factores para controlar su efecto en la medida experimental del vehículo.

Tabla 4.8: Control del efecto de los factores según las condiciones experimentales

Naturaleza de la influencia en las condiciones experimentales	Factores de influencia	Control de efecto del factor
Dependen del vehículo y en algunos casos de su estado de mantenimiento.	Tipo de tracción Estructura del vehículo (diseño y materiales) Disposición del mobiliario dentro del vehículo Rigidez de la almohadilla Factor de amortiguación de la almohadilla Excentricidad de la rueda Rugosidad de la rueda Carga por eje	La mayor parte de éstos depende del modelo del vehículo por tanto son objeto del estudio. Algunos de ellos dependen del estado de mantenimiento de vehículo pero su influencia se considera controlada ya que el mantenimiento del vehículo cumple los estándares del operador para trayectos comerciales.
Dependen de la vía y de su estado de mantenimiento.	Tipo de carril Desviación del carril Rugosidad del carril Tipo de traviesa Distancia entre traviesas Rigidez del balasto Factor de amortiguación del balasto	La influencia de estos factores queda anidada en la medida de un vehículo. Es imposible de aislar de la influencia del modelo de vehículo y del estado de mantenimiento del mismo, debido a las condiciones del estudio. El estado de mantenimiento de las vías entra dentro de los estándares del operador en sus trayectos comerciales, por tanto cumplirá las condiciones elegidas.
Depende de las condiciones de circulación pero la velocidad comercial depende del vehículo.	Velocidad/es de circulación	Una de las condiciones elegidas es utilizar sonidos del vehículo a velocidad comercial. Por tanto, no se realizan medidas a otra velocidad que no sea la comercial del vehículo quedando este efecto anidado.
Dependen de las condiciones de circulación pero son eventos ocasionales.	Aceleración / frenado Eventos discretos de circulación	No se realizan registros en estas condiciones ya que no son objeto de análisis. Por tanto, este efecto queda anulado.

Depende principalmente de su estado encendido o apagado.	Equipos auxiliares	Los registros se realizan siempre con los equipos encendidos que normalmente funcionan durante la marcha. Se evitará la toma de registros con ruido de equipos auxiliares que aparecen de forma infrecuente. De esta manera el efecto queda controlado.
Eventos ocasionales del uso de la puerta.	Apertura y cierre de puertas	No se realizan registros en estas condiciones ya que no son objeto de análisis. Por tanto, este efecto queda anulado.
Depende principalmente del estado de mantenimiento del interior. Con un mantenimiento adecuado esta fuente es ocasional.	Vibraciones de elementos de interior	No se realizan registros en estas condiciones ya que no son objeto de análisis. Por tanto, este efecto queda anulado.
Depende de la posición dentro del vehículo.	Proximidad a ventanas Proximidad a bogie o rodal Distancia a la cabeza del vehículo Altura (sentado / de pie)	Se definieron diferentes puntos de medida de acuerdo a las condiciones experimentales y objetivos propuestos para el control de dichos factores. En el apartado 4.3.1.7 puede verse en detalle.

El control de la mayor parte de los factores se trasladó al procedimiento de medida a través de la definición inicial de las condiciones de medida. El control de los factores que dependen de la posición dentro del vehículo se trasladó al procedimiento de medida a través de la distribución inicial de los puntos de registro en el interior de los vehículos.

4.3.1.6. Definición inicial de las condiciones de medida de cada vehículo

Estas condiciones se establecieron con el objetivo de controlar los parámetros de influencia en el contexto experimental descrito para el estudio de campo:

- Se registrarán vehículos de alta velocidad comerciales con un nivel de mantenimiento dentro de los parámetros establecidos por el operador para su flota en servicio.
- Se registrarán vehículos circulando por un trayecto comercial con un estado de mantenimiento de la vía dentro de los parámetros establecidos por el operador.

Los registros en el interior de estos vehículos se realizarán en las siguientes condiciones:

- Los equipos de auxiliares que normalmente funcionen durante la marcha deben estar encendidos.
- Las puertas de intercomunicación entre compartimentos permanecerán cerradas.
- El vehículo no puede estar en ese momento circulando por el paso de un evento discreto que afecte a su ruido interior tales como aceleraciones, frenazos, paso por túneles, núcleos urbanos, estaciones y cruce con otros vehículos.
- El vehículo estará circulando a velocidad comercial.

Así mismo, se evitará todo ruido producido por fuentes sonoras que no formen parte del ruido de fondo tales como señales acústicas del vehículo, equipamiento auxiliar que aparece de forma infrecuente, conversaciones o sonidos producidos por los ocupantes del vehículo.

Se realizará una revisión posterior de los registros con el objetivo de validar que dichas condiciones han sido respetadas y eliminar de la muestra los sonidos que no cumplan con las mismas.

4.3.1.7. Distribución inicial de los puntos de registro en el interior de los vehículos

Los principales factores de influencia a tener en cuenta son los descritos en la tabla 4.7: proximidad a ventanas, proximidad a puertas, proximidad a bogie o rodal, distancia a la cabeza del vehículo y altura.

Debido a la definición de condiciones de medida de cada vehículo, el factor de cercanía a la puerta quedó minimizado ya que se definió como condición que las puertas iban a permanecer cerradas.

Siguiendo principalmente las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 3381:2011 se identificaron una serie de puntos de medida.

Identificación de la localización de puntos de registro recomendados

Los registros sonoros en el interior del vehículo se deberían realizar en varios coches que conforman la unidad, de forma que estén distribuidos a lo largo del vehículo. Concretamente sería recomendable realizar mediciones al menos en el primer coche, en coches intermedios y en el último coche del vehículo.

También sería aconsejable realizar medidas en el coche cafetería por su diferencia en cuanto a la disposición de los pasajeros en él, pero este coche no es prioritario en el objetivo de este trabajo ya que los pasajeros utilizan este servicio de manera ocasional y no es representativo de las condiciones acústicas durante la mayor parte del trayecto.

Las mediciones en el primer coche se realizarían para estudiar la influencia de la aerodinámica en el sonido percibido y por la proximidad de la cabeza tractora que podría influir en la calidad sonora. Las mediciones en el último coche se realizarían para estudiar la influencia de la aerodinámica y el ruido proveniente de la locomotora de cola. Los coches intermedios corresponderían a un coche tipo cuyos registros podrían ser comparados con el primer y último coche.

Respecto a las medidas específicas dentro de un determinado coche, la norma UNE-EN ISO 3381:2011 propone de 5 a 7 puntos de medida para registros de ruido en el interior del vehículo.

Siguiendo las recomendaciones de la norma, se plantearon 6 puntos de medida para un coche de pasajeros estándar (se excluiría el coche cafetería), de forma que la distribución de nivel de sonido en el vehículo esté adecuadamente representada.

En la distribución de los puntos de registro a lo largo del coche, no se hizo distinción en los vehículos provistos de bogies o de los provistos de rodales, quedando a partir de ahora ambos englobados en el término bogie.

A continuación se muestran en la figura 4.2, en planta y alzado, los puntos de registro definidos:

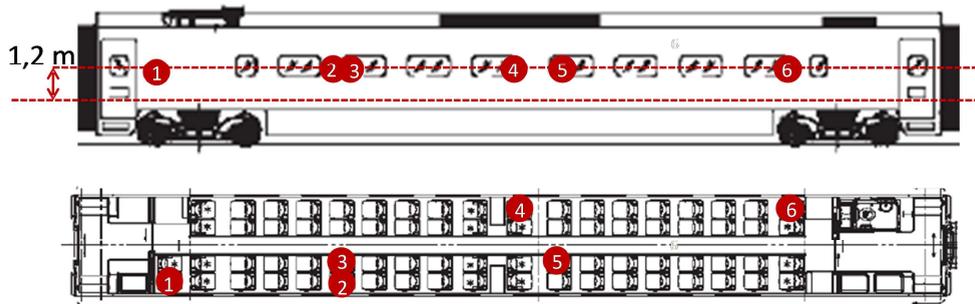


Figura 4.2: Propuesta de puntos de medida en un vehículo genérico

Dónde:

1. Posición sentada: En un extremo del vehículo, en el asiento más cercano al bogie y junto a la ventana.
2. Posición sentada: En el punto intermedio entre extremo y centro del vehículo, situado junto a la ventana.
3. Posición sentada: Al lado de la posición 2, situado junto el pasillo del vehículo.
4. Posición sentada: En el centro del vehículo, junto a la ventana.
5. Posición sentada: En el centro del vehículo, situado junto el pasillo del vehículo.
6. Posición sentada: En el otro extremo del vehículo, en el asiento más cercano al bogie, junto a la ventana.

Los puntos de medida se propusieron considerando la simetría del vehículo y abarcando la mayor distribución posible.

- Extremo del vehículo. Los puntos 1 y 6 están posicionados de forma que se adquiera el sonido en ambos extremos del vehículo. En estos puntos habrá más ruido debido a la proximidad de los bogies.
- Centro del vehículo. Los puntos 4 y 5 se sitúan en el centro del vehículo. Uno de ellos se encuentra junto a la ventana y el otro junto al pasillo.
- Posición entre el extremo y el centro. Los puntos 2 y 3 están posicionados para adquirir registros sonoros en un punto intermedio del vehículo entre su extremo y su punto central. Se compara el asiento junto a la ventana con el asiento junto al pasillo.

La altura de los micrófonos deberá ser estar 1,2 metros por encima del suelo del vehículo simulando la altura de posición sentada.

En esta distribución se decidió excluir medidas simulando posición de pie ya que no se consideran representativas de la posición de los pasajeros durante el trayecto, puesto que la mayor parte del tiempo está en posición sentada.

Consideraciones a la identificación inicial de puntos de registro recomendados

Siguiendo esta selección de puntos de medida recomendados, se requiere un total de 18 registros para la caracterización acústica de cada uno de los vehículos. Estos registros se distribuirían en las posiciones determinadas del primer coche, último coche y, al menos, un coche intermedio.

La limitación más relevante a la hora de llevar a cabo la distribución propuesta es el tiempo disponible para el registro de los sonidos de cada uno de los vehículos que forman parte del estudio. Además, cada uno de los registros realizados debe cumplir con las condiciones de medida definidas para asegurar su representatividad como ruido de fondo a velocidad comercial. Este hecho limita aún más el tiempo disponible a los lapsos de tiempo donde confluyen todas las condiciones de medida definidas.

Adicionalmente, existe la limitación de que cada uno de los vehículos que cumplen las condiciones de formar parte del estudio de campo tiene un número de coches determinado en su composición, por tanto, es necesario determinar qué coches medir en cada modelo para que el resultado sea comparable. La disposición de los asientos también varía dentro de cada vehículo, incluso dentro de cada coche del mismo vehículo. Por tanto a la hora seleccionar las posiciones a evaluar se debe tener en cuenta su equivalencia en otros vehículos y coches.

Esta identificación inicial se utilizó para definir la experimentación del estudio piloto con el objetivo de elaborar una serie de hipótesis que permitieran definir en el protocolo definitivo, de manera óptima, los puntos de medida acordes con el tiempo disponible y los objetivos propuestos.

4.3.2. Metodología inicial de evaluación subjetiva del nivel de molestia

4.3.2.1. Introducción

El estudio de campo debe respetar las condiciones elegidas para el desarrollo del presente trabajo, definidas en el capítulo 3 *Objetivos y plan de trabajo*. De dichas condiciones, aquellas con más impacto en la metodología son:

- Evaluar el nivel de molestia por un colectivo de usuarios de tren, es decir, que viajen con una frecuencia determinada en este medio de transporte.
- Realizar una reproducción fiel de los sonidos registrados en el interior del vehículo.

Para conseguir el objetivo propuesto, la metodología debe medir el nivel de molestia de los sonidos de los vehículos tanto para los sonidos del estudio como para nuevos sonidos de la misma naturaleza que permita la ampliación de la base de datos.

Para medir el nivel de molestia de los sonidos de un vehículo de alta velocidad, se han seguido cuatro pasos esenciales:

- Construcción de una escala de referencia, descrito en el apartado 4.3.2.2.
- Definición de un proceso de medida principal. El proceso de medida se detalla en el apartado 4.3.2.3. e incluye tanto los medios materiales necesarios como el protocolo a seguir durante la evaluación subjetiva.
- Selección de los evaluadores, descrito en el apartado 4.3.2.4.
- Definición de otros procesos de medida, si fuese necesario. En el presente trabajo se incluyó un test de evaluación semántica para realizar el exploratorio de las escalas de semántica diferencial. 4.3.2.5.

De estos cuatro pasos, solo los tres primeros son estrictamente necesarios, mientras que el cuarto puede ser de interés por razones científicas, mejor entendimiento del proceso de percepción, como en el presente trabajo, o por motivos prácticos, por ejemplo, reducción futura de costes de la metodología definida.

4.3.2.2. Construcción de una escala de referencia para el nivel de molestia

El primer aspecto a tener en cuenta a la hora de construir la escala de referencia¹⁹ para la medida de una magnitud es seleccionar el tipo de escala adecuado ya que el resultado de la medida tiene sentido siempre que reproduzca, en un espacio numérico, las relaciones que ocurren en el mundo real. El tipo de escala seleccionada está condicionada por la metodología principal a utilizar en la evaluación (Rossi *et al*, 2005).

Para la medida del nivel de molestia se seleccionó un método de evaluación directa mediante una escala continua.

¹⁹ Se considera aquí escala de referencia el sistema numérico relacional y las referencias asociadas a los valores numéricos.

Este tipo de evaluación directa se encuentra en multitud de los trabajos revisados. En estos métodos, la diferencia entre los valores de las escalas utilizadas posee significado, por tanto, representa la percepción de la evaluación de los sonidos en una escala de intervalo (Nortest, 2002).

Para evitar el mayor inconveniente de los métodos de *free magnitude estimation*, que cada evaluador podría estimar una magnitud muy diferente (Otto *et al.*; 2001) en la escala propuesta, se asociaron sonidos de referencia en el valor 0- Nada molesto y en el valor 10 – Muy molesto para orientar a los evaluadores, como se utiliza en los trabajos de Yost (1996) y Shrivastav *et al.* (2012).

Pese al uso de los sonidos de referencia, los evaluadores eran libres de valorar sonidos con puntuaciones fuera del intervalo de 0 a 10.

Esta metodología ha sido seleccionada por las siguientes ventajas:

- El usuario, de acuerdo a su percepción, puntúa el nivel de molestia del sonido y, al ser una escala continua, no existe limitación del usuario en la precisión a la hora de localizar un sonido. Por tanto, el usuario valora tanto el orden como la distancia entre sonidos en cuanto a su nivel de molestia percibido (Otto *et al.*; 2001).
- Al utilizar una escala de 0 a 10 se emplea una forma familiar de evaluar según ISO/TS 15666:2003.
- La facilidad a la hora de comparar las respuestas dentro un futuro trabajo internacional, ya que no está sujeta a la elección de las palabras en la escala verbal. ISO/TS 15666:2003.
- Poder aplicar la estadística paramétrica para la creación de un modelo que relacione el nivel de molestia con los parámetros psicoacústicos, al tratarse de una relación medida mediante escala de intervalo.
- Permite reducir la duración de la medida ya que no es necesario que un evaluador valore todos los sonidos. Los sonidos de referencia actúan como “anclas” y permiten tantas sesiones de medida y evaluadores como sea necesario para conseguir una base de datos de evaluaciones de cada sonido acorde con los objetivos establecidos.
- Permite la introducción, en un futuro, de nuevos sonidos representativos en la base de datos gracias a los sonidos de referencia que actúan como anclas.

Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes enumerados en la *revisión bibliográfica* que deberán ser controlados, minimizados o superados mediante la definición del proceso de medida:

- La respuesta numérica no es una forma natural de reflejar la impresión que tiene un evaluador de un sonido (Otto *et al.*, 2001). Este inconveniente se ha minimizado seleccionando la escala numérica más familiar para los evaluadores según ISO/TS 15666:2003.

- Los extremos de la escala normalmente no son utilizados por los evaluadores. Si la evaluación de los sonidos es secuencial, los evaluadores evitan valorar sonidos cerca de los extremos en previsión de que sonidos aún por evaluar sean más extremos que los sonidos evaluados hasta el momento (Otto *et al.*, 2001). Una forma para minimizar este inconveniente es el uso de los sonidos de referencia para los extremos de la escala. Adicionalmente el protocolo diseñado de evaluación subjetiva del nivel de molestia permite una comparación directa de parejas de sonidos antes de valorar definitivamente el nivel de molestia de un sonido.
- Las valoraciones en un intervalo arbitrario como es el de 0 a 10, *a priori*, no tienen por qué correlacionarse con medidas objetivas. Mientras la tendencia puede ser común entre medidas objetivas y subjetivas, se necesita que las evaluaciones subjetivas sean proporcionales a la medida objetiva (Otto *et al.*, 2001). Este aspecto deberá ser comprobado durante cálculo del modelo de predicción del nivel de molestia en la que se relacionan las medidas psicoacústicas objetivas con las medidas subjetivas del nivel de molestia.

Selección de los sonidos de referencia

La escala propuesta utiliza sonidos de referencia asociados al 0 (nada molesto) y al 10 (muy molesto). Estos sonidos de referencia deben ser representativos también de los sonidos a evaluar cumpliendo los mismos requisitos.

El objetivo para su selección es encontrar un balance para que estos sonidos puedan representar los extremos de la escala sin que la distancia entre los sonidos evaluados y alguno de los extremos sea excesiva, de forma que los sonidos objeto de estudio se distribuyan por toda la escala y no se agrupen en un intervalo reducido de la escala de evaluación.

El método para la selección de las referencias se propuso en base al nivel de *loudness* que presentaban los diferentes registros, ya que *a priori* es la variable con más relación tiene con la percepción de molestia. Una vez seleccionados los sonidos candidatos a ocupar los extremos de la escala, el equipo investigador escuchaba estos sonidos comparándolos con los sonidos con niveles de *loudness* más cercanos para fijar de manera definitiva los extremos de la escala a partir de la percepción subjetiva de los mismos.

Como se ha comentado, los sonidos de referencia permanecen anclados a las puntuaciones 0 y 10 pero el usuario es libre de puntuar alguno de los sonidos a evaluar por encima de 10 o por debajo de 0.

Este hecho nos permitía validar si el método propuesto era válido si la mayoría de evaluadores consideraban los sonidos seleccionados como el más y menos molesto de la muestra, valorando en muy pocas ocasiones sonidos fuera de la escala de 0 a 10.

4.3.2.3. Definición del proceso de medida principal. Nivel de molestia

La definición del proceso de medida del nivel de molestia se va a dividir en dos bloques:

- Entorno de escucha. Donde se describirán los medios físicos necesarios para la evaluación (sala de reproducción, equipo de reproducción, visualización de la escala).
- Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia. Donde se describen las diferentes fases del protocolo de evaluación que deben seguir el evaluador y el personal investigador para una adecuada aplicación de la metodología. Este protocolo describe la forma de presentación de los estímulos sonoros a los evaluadores para cada fase.

4.3.2.3.1. Entorno de escucha

Sala de reproducción

Siguiendo las recomendaciones resumidas en la *revisión bibliográfica* se definió que los ensayos se debían realizar en una sala silenciosa y aislada, decorada con colores neutros (Otto *et al.*, 2001).

Para recrear un ambiente similar al entorno real de los sonidos, según las recomendaciones de Otto *et al.* (2001) y Rossi *et al.* (2005) se definió que el evaluador se sentara en una butaca de vehículo de alta velocidad, como se puede observar en la figura 4.3.



Figura 4.3: Sala de reproducción

En cuanto al confort térmico de la sala se estableció que durante los ensayos, ésta debía mantenerse dentro un rango de temperatura entre 21°C y 23°C y con una humedad relativa entre 45% y 55% (Otto *et al.*, 2001).

Equipo de reproducción

Para la reproducción de las grabaciones a los evaluadores se seleccionó el sistema compuesto por el ecualizador PEQ V y auriculares dinámicos (figura 4.4). El sistema permite la escucha de los registros grabados de forma binaural, por lo que la sensación que percibe el usuario es igual a las condiciones en las que se realizaron las grabaciones.



Figura 4.4: Sistema de ecualizador PEQ V y auriculares dinámicos de Head Acoustics

Visualización de la escala

Para la evaluación de los sonidos se definió que la escala de evaluación estuviese siempre visible así como las evaluaciones realizadas. Con este objetivo se propuso la utilización de una pizarra magnética, como se muestra en la figura 4.3, donde los sujetos, mediante imanes, clasificaran los registros en una escala de 0 a 10. Los imanes de los registros de referencia deben de estar colocados en los puntos 0 y 10 (donde el registro menos molesto se colocará en el 0 con las palabras “nada molesto” y el más molesto en el 10 con las palabras “muy molesto”). La escala debe continuar con valores menores de 0 y mayores de 10, ya que en el caso de que el evaluador considere que el registro escuchado rebasa los límites establecidos de 0 y 10 puede colocar el marcador fuera de estos límites, como se comprueba en la figura 4.5.

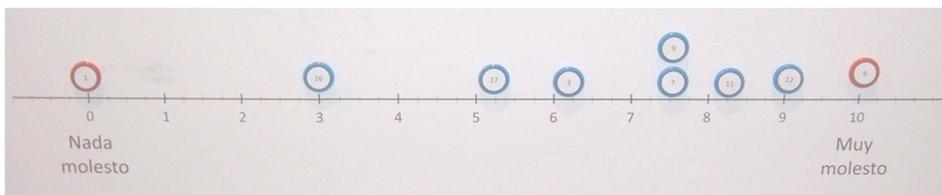


Figura 4.5: Detalle de la escala visualizada

La visualización de la escala en todo momento permite que el evaluador tenga un retorno del proceso que le permita hacer ajustes no solo basándose en la memorización de sus evaluaciones.

4.3.2.3.2. *Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia*

El objetivo principal del protocolo de medida es conseguir que la medida realizada del nivel de molestia de los sonidos sea lo más fiable posible. Para conseguir este objetivo se diseñó un protocolo de evaluación individual, que consiste en que cada sesión de medida solo participa un evaluador.

El protocolo diseñado comprende las siguientes fases:

- Fase de instrucción: En esta fase se informa a los evaluadores del objetivo de la evaluación, duración y medios disponibles, además de instruir a los participantes en la fase de la evaluación.
- Fase de familiarización: El principal objetivo es mostrar a los evaluadores la muestra de sonidos que van a valorar, con el fin de que perciban la variabilidad entre los diferentes sonidos que facilite la posterior evaluación.
- Fase de evaluación definitiva: El objetivo es valorar de manera precisa el nivel de molestia de cada uno de los sonidos de la muestra a evaluar.

Para la aplicación de este protocolo se debe contar con un técnico que será el responsable de guiar la sesión, del manejo del equipo para la reproducción de los sonidos y recopilar los datos de la evaluación.

A continuación se describen cada una de estas fases:

Fase de instrucción

Los evaluadores se deben sentar en la butaca del vehículo ferroviario y tendrán enfrente la pizarra magnética con los marcadores que representan los registros.

Al comenzar el ensayo, se les debe informar acerca de la naturaleza de los sonidos que van a escuchar “ruido de fondo que escucharían en el interior de diferentes vehículos de alta velocidad y en distintas posiciones del vehículo” y la duración de la exposición al ruido en condiciones reales “en un trayecto tipo en alta velocidad este ruido de fondo se escucharía durante aproximadamente 2 horas”.

Fase de familiarización

Los objetivos de esta fase son que los evaluadores:

- Conozcan los sonidos que van a evaluar.
- Identifiquen las características de los sonidos que le resulten molestas en el largo plazo.
- Realicen una primera evaluación preliminar, visible en la pizarra, como punto de partida a la evaluación final del nivel de molestia.

Para ello se definió el siguiente protocolo:

Los evaluadores escuchan los sonidos de referencia para conocer los valores extremos en cuanto al grado de molestia percibido (20 segundos cada uno).

A continuación, escuchan cada uno de los sonidos a evaluar durante 90 segundos, primero los de referencia para asentar los extremos de la escala y seguidamente, de forma pseudoaleatoria, el resto de sonidos que deben ser evaluados, uno a continuación del otro.

Para cada uno de los sonidos, el sujeto dispone de un apartado en el cuestionario para anotar las sensaciones que podrían describir los registros mediante sus propias palabras (adjetivos, símiles, etc.) que le sirvan de referencia para poder evaluarlos y/o compararlos.

Los registros de referencia están situados en la pizarra magnética en la puntuación 0, “nada molesto” y 10 “muy molesto”.

Al finalizar la escucha de cada sonido, el evaluador debe colocar el marcador correspondiente al registro en la escala. Se debe indicar al evaluador que tenga en cuenta los extremos de la escala (sonidos de referencia).

Si el sujeto considera que uno de los marcadores correspondientes a algún registro oído anteriormente está mal posicionado, puede recolocarlo según estime convenientemente.

Fase de evaluación definitiva

El objetivo de esta fase es asentar los registros en la escala la evaluación. Para ello, el sujeto puede escuchar todos los sonidos, incluidos los de referencia, en el orden y número de veces que lo estime necesario para clasificar los registros escuchados anteriormente. El tiempo de escucha para cada sonido también está definido por el sujeto pero se limita el mínimo tiempo de escucha a 10 segundos y con un intervalo de mínimo 2 segundos entre la escucha de dos sonidos, para evitar distorsionar la percepción del mismo.

En esta fase, los evaluadores deben revisar la valoración de los sonidos en la fase 1 y pueden modificarlas cuando lo estimen oportuno, hasta que consideren que han evaluado correctamente.

Presentación de los estímulos sonoros y duración

Profundizando en el protocolo descrito, en este apartado se va a justificar la presentación y duración de los estímulos definidos para las diferentes fases del mismo.

Siguiendo la recomendación de Nordtest (2002) que indica que la duración de un sonido debe de ser suficiente para dar una impresión estable del producto o proceso que lo genera y que no es frecuente que sea necesario superar los dos minutos de duración, en la fase de familiarización la duración de los sonidos se fijó en 90 segundos. El objetivo de una exposición larga al sonido es que los usuarios identifiquen los sonidos que le resulten molestos en el largo plazo, ya que en un vehículo en condiciones reales los pasajeros están expuestos a este sonido durante largos periodos de tiempo.

En la fase de evaluación definitiva, debido a que se permite hacer comparativas entre sonidos, el tiempo de escucha para cada sonido está definido por el sujeto pero se limitó a un mínimo tiempo de escucha de 10 segundos, para evitar sesgar la evaluación al

escuchar el sonido muy poco tiempo. El intervalo entre dos sonidos se fijó en 2 segundos, tal y como utilizó Patsouras *et al.* (2002) en las comparativas de su estudio.

En cuanto a la presentación de los estímulos se optó por un método mixto. Durante la fase de familiarización se presentan los sonidos a evaluar de manera aleatoria para cada evaluador, tal y como recomienda Nordtest (2002). En la fase de evaluación definitiva, el método de presentación de los estímulos es a demanda del evaluador (Otto *et al.* 2001), realizando solo las comparaciones que el propio evaluador considera necesarias para ajustar la evaluación inicial. Con esta forma de presentar los estímulos, se acorta el tiempo necesario para aplicar el método de comparaciones.

La duración completa del test depende del número de sonidos a evaluar y de la facilidad del evaluador en establecer con seguridad un nivel de molestia a cada uno de los sonidos.

Las recomendaciones reflejadas en la revisión bibliográfica establecen que la duración máxima de cada sesión debe ser inferior a 45 minutos (Otto *et al.* 2001), aunque el tiempo recomendado depende de la complejidad de la evaluación (Nordtest, 2002).

Para respetar esta recomendación, uno de los objetivos del estudio piloto fue establecer el número de sonidos a evaluar según la duración del mismo y la opinión de los evaluadores en cuanto a complejidad y percepción de la adecuación del tiempo invertido en la evaluación.

4.3.2.4. Selección de los evaluadores

La gran disparidad entre autores respecto al número de participantes no presenta un problema a la hora de realizar el presente estudio ya que la definición del número de participantes forma parte de los objetivos del mismo.

En concreto, para la definición de la metodología, el número de participantes viene determinado por el número de evaluaciones necesarias de cada sonido para conseguir una potencia de test suficiente para poder discriminar el nivel de molestia entre sonidos.

Por tanto, uno de los objetivos principales del ensayo piloto fue establecer el número mínimo de evaluaciones por sonido.

Adicionalmente, hay que tener en cuenta a la hora de diseñar el estudio que alrededor de un 10% de los sujetos tendrán baja fiabilidad (Otto *et al.* 1999; (Zhang *et al.*, 2012). Un análisis de la fiabilidad del evaluador será otro de los objetivos a tener en cuenta en el diseño del estudio piloto.

En cuanto al perfil de los evaluadores, según las recomendaciones extraídas de los trabajos incluidos en la revisión bibliográfica y de los objetivos propuestos, deben ser un grupo representativo de los usuarios, excluyendo participantes que están relacionados profesionalmente con el producto a evaluar, si se desea la opinión del usuario final. Los participantes no deberán de tener ningún problema auditivo.

El cliente habitual de los vehículos ferroviarios de alta velocidad, sin problemas auditivos, se sitúa entre 25 y 55 años.

Siguiendo estas recomendaciones para la selección de la muestra participante se establecieron los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión de los evaluadores

- Pasajeros que viajen al menos en dos ocasiones al año en vehículos de grandes líneas.
- Edad entre 25 y 55 años.

Criterios de exclusión de los evaluadores

- No cumplir los criterios de inclusión.
- Desempeñar su actividad profesional, actualmente o en el pasado, en sectores relacionados con el transporte ferroviario o la acústica.
- Referir o tener diagnosticado algún problema de audición.

Ambos géneros deberán de estar representados y en la medida de lo posible de manera equilibrada y la edad de los participantes se debe repartir de manera uniforme dentro del rango definido.

4.3.2.5. Definición del test de semántica diferencial. Otros procesos de medida

Como se describe en el capítulo 2 *Revisión bibliográfica* los métodos de semántica diferencial permiten la evaluación rápida de múltiples atributos de los sonidos (Otto *et al.*, 2001). Los sujetos evalúan sonidos según diferentes descriptivos de los mismos, generalmente utilizando escalas bipolares de un adjetivo y su antónimo.

La selección de los descriptores debe ser acorde a la aplicación evaluada y a la hora de optimizar la evaluación, evitar medir dos veces el mismo fenómeno. Es importante seleccionar parejas de descriptores no correlacionadas entre sí.

El objetivo en el presente trabajo es realizar un exploratorio en cuanto a los atributos que podrían formar parte de la aplicación de la metodología de semántica diferencial a la evaluación de sonidos de vehículos de alta velocidad, que aporten un valor añadido a la evaluación del nivel de molestia.

Para disponer de datos cuantitativos y así poder realizar un análisis exploratorio se definió la aplicación de la técnica de semántica diferencial.

El primer paso fue identificar escalas bipolares de un adjetivo y su antónimo que han aparecido con mayor frecuencia en la *revisión bibliográfica* y que al mismo tiempo se consideró que, *a priori*, no son atributos correlacionados entre sí (tabla 4.9).

Tabla 4.9: Escalas bipolares más utilizadas para la evaluación del sonido

Escalas bipolares de un adjetivo y su antónimo
Molesto / Agradable
Fuerte / Débil
Áspero / Suave
Limpio / Sucio
Agudo / Grave
Estable / Inestable
Rápido / Lento
Oscuro / Brillante
Relajado / Estresante

A partir de este primer listado, se seleccionaron las parejas de adjetivos bien por su carácter claramente denotativo, es decir, que describen las percepciones asociadas con parámetros del sonido o bien por su carácter claramente connotativo, es decir, que describen las sensaciones percibidas durante un trayecto de vehículo:

- **Fuerte / Débil:** Debido a su relación con la variable *loudness* del sonido.
- **Áspero / Suave:** Debido a su relación con la variable *roughness*.
- **Agudo / Grave:** Debido a su relación con la variable *sharpness*.
- **Relajado / Estresante:** Debido a que a través del sonido puede transmitir la misma sensación al pasajero cuando viaja.
- **Rápido / Lento:** Se seleccionó para identificar si había sonidos y variables psicoacústicas más relacionados con la sensación de velocidad de vehículo de alta velocidad, una de sus ventajas competitivas. La hipótesis es que un sonido que transmita una sensación de velocidad alta del vehículo podría influir positivamente en su evaluación subjetiva del nivel de molestia. Por tanto, en este caso la pregunta formulada referirá a la percepción de la velocidad del vehículo y no a la percepción del sonido en sí mismo.

La pareja molesto / agradable no se seleccionó finalmente ya que el nivel de molestia iba a ser evaluada como proceso de medida principal. Las parejas limpio / sucio y oscuro / brillante no cumplían ninguno de los dos criterios, tener o no tener un carácter claramente connotativo ni claramente denotativo.

Para la evaluación semántica se optó por utilizar para la evaluación una escala discreta de 5 niveles. El motivo es la rapidez que ofrece este tipo de escalas a la hora de realizar la evaluación por parte de los usuarios. La figura 4.6 muestra el cuestionario de evaluación semántica.

El sonido me parece...						
	++	+	=	+	++	
Fuerte	<input type="checkbox"/>	Débil				
	++	+	=	+	++	
Áspero	<input type="checkbox"/>	Suave				
	++	+	=	+	++	
Agudo	<input type="checkbox"/>	Grave				
	++	+	=	+	++	
Relajado	<input type="checkbox"/>	Estresante				
La velocidad del tren parece...						
	++	+	=	+	++	
Rápida	<input type="checkbox"/>	Lenta				

Figura 4.6: Visualización del cuestionario de evaluación semántica

El protocolo definido para la evaluación semántica fue el siguiente:

Previo a la evaluación los participantes deben leer los adjetivos utilizados. Los registros se presentan de forma pseudoaleatoria. Los participantes escuchan el registro durante 30 segundos y a continuación anotan sus valoraciones en los cinco adjetivos propuestos antes de pasar al siguiente registro. Entre la escucha de un sonido y el siguiente se fija un tiempo mínimo de 10 segundos, tiempo mínimo recomendado por Nordtest (2002) para la presentación secuencial de sonidos para su evaluación mediante semántica diferencial.

En el estudio piloto se realizó un primer exploratorio para la validación de los atributos seleccionados.

4.3.3. Definición inicial del procesado de la información

Para la definición de la metodología se hace necesario describir el procesado de información posterior ya que condiciona su definición.

En concreto, la técnicas utilizadas para la comparativa de los vehículos, objetivo 6, y la obtención de un modelo de predicción del nivel de molestia, objetivo 7, requieren que los datos recogidos tanto de la caracterización psicoacústica del vehículo como de la evaluación subjetiva del nivel de molestia cumplan ciertos requisitos para la aplicación de las mismas.

En la figura 4.7 se representa el esquema seguido en la descripción del procesado de información que describe en los siguientes apartados.

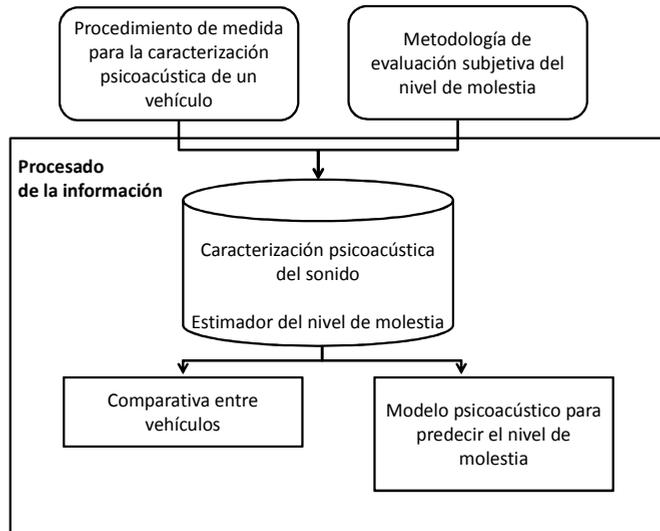


Figura 4.7: Esquema de las fases del procesado de los datos resultado de la metodología

4.3.3.1. Caracterización psicoacústica del sonido

La caracterización psicoacústica de los sonidos registrados se definió en base a las variables psicoacústicas más habituales en la búsqueda de indicadores del confort del ruido de fondo de vehículos de alta velocidad.

Las variables analizadas por los distintos autores como potenciales predictoras de la calidad sonora del ruido de fondo se encuentran resumidas en la tabla 2.8, para la búsqueda del predictor primario y en la tabla 2.9, para el secundario, incluidas en el apartado 2.5.7 *Conclusiones sobre el estado del arte en modelos psicoacústicos para vehículos de alta velocidad*.

Las variables que fueron inicialmente seleccionadas para formar parte de la caracterización psicoacústica de los sonidos fueron:

- Nivel de presión sonora ponderado A, junto con el *loudness*, es una de las variables que apuntan los autores como indicador primario de confort en el interior de vehículos de alta velocidad.
- *Loudness*, es una de las variables que apuntan los autores como indicador primario de confort en el interior de vehículos de alta velocidad, aunque hay autores que no justifican el uso del *loudness* como mejora al nivel de presión sonora (Pariziet *et al.*, 2002). Otros autores indican que es el mejor de los

estimadores del confort en vehículos de alta velocidad (Boullet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2011).

- *Sharpness*, esta variable psicoacústica es indicada por Yang *et al.* (2014) como la más correlacionada con el confort y Choi *et al.* (2011) como indicador secundario de confort en el interior de vehículos de alta velocidad, después del *loudness*, aunque no se incluyen resultados. Pariziet *et al.* (2002) obtuvo un modelo lineal a partir de las variables *tonality* y *sharpness* como variables dependientes para predecir el confort anulando en efecto del *loudness*.
- *Roughness*, ha sido utilizado por Choi *et al.* (2011), Pariziet *et al.* (2002) y Yang *et al.* (2014) como variable a analizar como indicador del confort acústico en el interior de vehículos de alta velocidad. Sin embargo ninguno de los autores encuentra resultados concluyentes entre la relación de esta variable y el confort.
- *Tonality*, ha sido utilizado por Pariziet *et al.* (2002) y Yang *et al.* (2014). Pariziet *et al.* (2002) obtuvo un modelo lineal a partir de la variable *tonality* y *sharpness* como variables dependientes para predecir el confort anulando en efecto del *loudness*.
- *Fluctuation strength*, fue seleccionada por Choi *et al.* (2011), Pariziet *et al.* (2002) y Yang *et al.* (2014), como variable a analizar como indicador del confort acústico en el interior de vehículos de alta velocidad. Sin embargo, ninguno de los autores encuentra resultados concluyentes entre la relación de esta variable y el confort.

Esta selección de variables psicoacústicas inicial fue analizada como resultado del estudio piloto para garantizar su adecuación a la caracterización de sonidos de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial.

4.3.3.2. Estimador del nivel de molestia

Como estimador de nivel de molestia de cada sonido se definió el valor promedio de las valoraciones realizadas por todos los evaluadores. El número mínimo de evaluaciones de cada sonido para promediar necesario para una respuesta fiable se concretará en la definición de la metodología final, tras los resultados del estudio piloto.

Los valores individuales de las evaluaciones de cada evaluador se utilizan para los cálculos cuando se realice un análisis estadístico donde se quiera incluir la variabilidad debida al evaluador.

4.3.3.3. Comparativa entre vehículos

El análisis estadístico seleccionado para la comparativa entre diferentes vehículos de alta velocidad fue Análisis de la varianza (ANOVA) multifactorial. Este análisis sirve para comparar grupos de una variable cuantitativa llamada variable dependiente.

Para la comparativa entre vehículos, los grupos de interés a comparar son los formados por sonidos de cada vehículo de la base de datos. Cuando la comparativa sea de la psicoacústica del vehículo se seleccionará como variable dependiente cualquiera de las variables incluidas en la caracterización psicoacústica del sonido. Cuando la

comparativa sea de percepción del nivel de molestia se seleccionará la variable nivel de molestia.

El ANOVA multifactorial permite incluir factores que dividen los casos en grupos que pueden influir *a priori* en la variable dependiente. El objetivo de incluir un factor puede ser, o bien, que se desee la comparativa según ese factor, como en nuestro caso los vehículos, o bien, anular la influencia de ese factor sobre la variable dependiente y así realizar un análisis más potente. El ANOVA también permite introducir variables de intervalo al modelo, llamadas co-variables, para anular su efecto.

En el caso de la comparativa entre vehículos como factores a incluir en el ANOVA se identifican:

- Factor VEHÍCULO. El objetivo de este factor es encontrar las diferencias estadísticamente significativas en la variables dependientes para realizar la comparativa entre vehículos.
- Otros factores o co-variables que afecten al ruido interior. Para anular la influencia de factores en la variable a comparar diferentes del factor vehículo, éstos deberán ser controlados en el estudio de campo de cada vehículo e incluidos en el ANOVA como factores. En el estado actual de la metodología, los principales factores de influencia a tener en cuenta a la hora realizar dicha selección eran: proximidad a ventanas, proximidad a puertas, proximidad a bogie, distancia a la cabeza del vehículo y altura. A través de los resultados del estudio piloto dichos factores y co-variables serán identificados e incluidos en la definición final de la metodología.

4.3.3.4. Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

Para la obtención de un modelo de predicción del nivel de molestia de un sonido a partir de su caracterización psicoacústica se optó por la utilización del análisis estadístico de regresión.

Se trata de uno de los análisis estadísticos más extendidos para la generación de modelos de predicción y presenta la ventaja de su fácil interpretación frente a las redes neuronales cuyo resultado es difícil de interpretar y necesitan más datos para la obtención de un modelo robusto (Otto *et al.*, 2001). Además, el procedimiento clásico de regresión obtiene mejores resultados que las redes neuronales si se cumplen las condiciones de aplicación (Pitarque, Ruiz y Roy, 1998).

En concreto se optó por realizar un análisis de regresión lineal múltiple. Este análisis permite explorar o cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente (Y) y más variables llamadas independientes o predictoras (X_1 , X_2 , ..., X_p) y permite desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos.

La variable dependiente, según la metodología propuesta, es una variable de intervalo siendo necesario el análisis de los datos experimentales obtenidos del nivel de molestia del presente trabajo para validar la fiabilidad de la medida.

Las variables psicoacústicas de los sonidos son las variables independientes o predictoras del modelo de predicción.

El modelo lineal viene dado por la ecuación:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_p + u \quad (4.1)$$

Los coeficientes b_1, b_2, \dots, b_p denotan la magnitud del efecto de las variables independientes, esto es, representan los pesos de la regresión o de la combinación lineal de las predictoras X_1, X_2, \dots, X_p sobre la variable dependiente Y . El coeficiente b_0 se denomina término constante (o independiente) del modelo. Y al término u se le llama término de error del modelo o componente de Y no explicada por las variables predictoras.

Para la aplicación del modelo lineal deben cumplirse una serie supuestos. Los supuestos de la regresión múltiple lineal son:

- **Independencia de los residuos.** Los residuos de la regresión son independientes entre sí, es decir, constituyen una variable aleatoria.
- **Homocedasticidad de los residuos.** Para cada combinación de las variables independientes la varianza de los residuos debe ser constante.
- **Normalidad de los residuos.** Para cada combinación de las variables independientes los residuos deben ser normales y de media 0.
- **Linealidad con la variable dependiente.** Para la utilización de un modelo de regresión lineal la relación entre la variables dependiente y las independientes debe ser de tipo lineal.
- **No-colinealidad de las variables independientes.** No existe relación lineal entre ninguna de las variables independientes.

En el análisis del estudio piloto y del estudio completo se controlaron los supuestos de linealidad entre el nivel de molestia y las variables psicoacústicas y no-colinealidad entre las variables psicoacústicas.

El control de la linealidad tiene como objetivo valorar la utilización de un modelo no lineal en el caso que no se cumpla la linealidad. Se puede optar a un modelo exponencial, logarítmico, etc...si se ajusta a la relación con la variable dependiente u optar por otro modelo que no exija este supuesto, como son las redes neuronales.

Se realizó un control de la colinealidad para velar que en la base de datos de sonidos el grado de independencia entre las variables psicoacústicas sea suficiente para la obtención de un modelo robusto.

El control de los supuestos de independencia, homocedasticidad y normalidad que aplica sobre los residuos del modelo, se realizó una vez obtenido el modelo de regresión lineal, para asegurar su validez.

Bondad del modelo

La bondad del modelo obtenido se valoró a través del coeficiente de determinación R^2 corregido que se trata de una corrección a la baja del coeficiente de determinación R^2 .

El coeficiente de determinación R^2 , es una medida descriptiva del ajuste global del modelo cuyo valor es el cociente entre la variabilidad explicada y la variabilidad total.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.2)$$

Siendo y las observaciones, \hat{y} los pronósticos e \bar{y} la media.

Este coeficiente cuantifica el porcentaje de variabilidad de la variable dependiente que puede ser explicado a partir de las variables independientes. Este coeficiente varía de 0 a 1, siendo 1 un ajuste perfecto del modelo. Su valor suele multiplicarse por 100, recibiendo el nombre de porcentaje de nivel de explicación o predicción del modelo.

Para contabilizar la relación entre número de casos y las variables independientes con las que se ha construido el modelo se calcula el R^2 corregido.

$$R^2 \text{ corregido} = 1 - (1 - R^2) \frac{(n - 1)}{(n - p - 1)} \quad (4.3)$$

Donde p representa el número de variables independientes y n número de casos.

4.3.4. Conclusiones

Siguiendo en planteamiento metodológico que se ha definido al principio del capítulo en el apartado 4.2, la tabla 4.10 recoge el estado de avance tras la definición inicial de la metodología de cada uno de los aspectos a considerar.

Tabla 4.10: Estado de avance tras la definición inicial de la metodología de los aspectos de planteamiento metodológico

Estado en la definición inicial de a metodología		
Estímulo	Representatividad	Para asegurar la representatividad de los estímulos se definieron las condiciones de medida de los vehículos cuya variabilidad se analizará en el estudio de campo piloto. Debido a la necesidad de limitar los puntos de medida dentro del vehículo, se estableció como objetivo del estudio de campo piloto establecer hipótesis para su selección.
	Adquisición	Para asegurar la validez de los resultados, los estímulos deben ser naturales, evitando la eculización de los mismos. La instrumentación seleccionada para la adquisición, la cabeza maniquí HMS III desarrollada por HEAD Acoustics, permite un registro de sonidos biaural para una reproducción posterior lo más parecida al sonido escuchado en el entorno original.
	Producción/ Reproducción	Con el objetivo de maximizar la representatividad del estímulo sonoro, se limitó la intervención sobre los registros a adecuar su duración a las necesidades del protocolo de evaluación.

Jurado	Representatividad	Con el objetivo de asegurar la representatividad se establecieron los criterios de inclusión y exclusión de los evaluadores.
	Selección/ Entrenamiento	El tipo de evaluador representativo no debe poseer experiencia en este ni en el producto ni en acústica. Se estableció una fase para la familiarización como parte del protocolo, <u>sin considerarse un entrenamiento previo.</u>
	Numero de sujetos	El número de sujetos que evalúan cada sonido debe ser suficiente para asegurar la estabilidad estadística. Uno de los objetivos del estudio de campo piloto fue establecer este número.
Escala	Tipo de escala: Ordinal/Nominal /Intervalo	La escala seleccionada es una escala continua con sonidos de referencia en el 0 y en el 10.
Test	Estimulo: Presentación / producción	En el protocolo de evaluación subjetiva la reproducción de los sonidos se divide en dos fases. En la fase de familiarización, con el objetivo de que los evaluadores identifiquen las características del sonido molestas a largo plazo, se estableció un orden pseudoaleatorio de reproducción de los sonidos y una duración fija de 90 segundos. En la fase de evaluación definitiva con el objetivo de la evaluación precisa de molestia de los sonidos evaluados, el orden de reproducción era indicado por el evaluador. Se limitó el mínimo tiempo de escucha de 10 segundos y un intervalo mínimo entre la escucha de dos sonidos en 2 segundos.
	Rol de los sujetos	El rol principal definido para los evaluadores es valorar los sonidos en cuanto al nivel de molestia. Para ello, en la fase de familiarización, se permite realizar anotaciones sobre la percepción de los sonidos, con una duración y orden de reproducción fijos previamente establecidos. En la fase de evaluación definitiva el evaluador decide sobre los sonidos <u>a reproducir para precisar la evaluación de los mismos.</u>
	Duración	Una vez definida la metodología de evaluación, la duración completa del test depende del número de sonidos a valorar por el evaluador. Uno de los objetivos del estudio piloto fue establecer el número de sonidos a evaluar para respetar las recomendaciones en este sentido extraídas en la <u>revisión bibliográfica.</u>
	Implementación del test	Se han establecido los medios materiales para la implementación del test en cuanto al entorno de escucha y el hardware y software necesarios.
Análisis de los datos	Control de la respuesta de los sujetos	La metodología inicial incluye los protocolos de inclusión y exclusión. Uno de los objetivos del estudio de piloto es analizar la fiabilidad de los evaluadores y valorar la necesidad de implementar un test para la detección de <u>evaluadores no fiables.</u>
	Construcción de la escala/medida	A partir de datos recopilados en las fases experimentales se evaluará la fiabilidad de la medida del nivel de molestia.

Validación	Mediante los resultados del presente trabajo se validarán todos los aspectos de la metodología, según su grado de definición.
Resultados/ evaluación de la incertidumbre	El resultado directo de la aplicación de la metodología es el nivel de molestia de cada sonido (promedio de las evaluaciones de un sonido). Los resultados derivados son la comparativa entre vehículos y el cálculo de un modelo psicoacústico de predicción de nivel de molestia siguiendo las herramientas descritas. Para cada uno de estos resultados se valorará su calidad a través de unos estadísticos propios.

4.4. Materiales y métodos del estudio piloto

4.4.1. Objetivos e introducción al estudio piloto

El estudio piloto llevado a cabo comprendía una fase experimental que abordaba tanto una fase de estudio de campo para la medida de sonidos de un vehículo de alta velocidad como la aplicación de la metodología de evaluación subjetiva sobre los sonidos registrados, que permitió completar la definición de la metodología.

El objetivo principal del estudio piloto, planteado para la definición del procedimiento de medida para la caracterización acústica de los vehículos, fue avanzar en la definición del protocolo de medida óptimo ajustado al tiempo disponible para los ensayos. Este objetivo se puede desglosar en los siguientes objetivos parciales:

- Conocer el número de sonidos que es viable registrar en las condiciones experimentales del presente trabajo que cumplan las condiciones de medida establecidas en la definición inicial de la metodología en 4.3.1.6.
- Explorar la validez de la caracterización psicoacústica propuesta en 4.3.3.1 para los sonidos registrados en el interior del vehículo.
- Analizar la influencia de una disminución de la velocidad comercial en el nivel de molestia percibido y en la caracterización psicoacústica.
- Elaborar una serie de hipótesis que permita terminar de determinar la distribución óptima de los puntos de registro planteada en 4.3.1.7 acorde con el tiempo disponible para cumplir con los objetivos propuestos de la metodología.

El objetivo principal del estudio piloto planteado para la metodología de evaluación subjetiva fue la validación y ajuste del procedimiento de evaluación subjetiva para el nivel de molestia. Este objetivo se puede desglosar en los siguientes objetivos parciales:

- Validación de la medida del nivel de molestia a partir de la metodología, descrita en 4.3.2.
- Explorar la fiabilidad del evaluador, seleccionado según los criterios de inclusión y descritos en 4.3.2.4, para identificar si existe la necesidad de un método para evitar la selección de unos evaluadores de baja fiabilidad.
- Determinación del número necesario de evaluaciones por sonido para tener un estimador fiable del nivel de molestia descrito en 4.3.3.2.
- Para el test de evaluación semántica, validación de las escalas semánticas definidas en 4.3.2.5.

Del resumen de avance en la definición inicial de la metodología presentado en la tabla 4.10, se desprende que los objetivos del estudio piloto responden a diferentes necesidades según el grado de definición en que se encontraba la metodología tras el planteamiento inicial.

El apartado 4.4.2. agrupa los apartados donde se detallan los distintos aspectos del estudio de campo para la medida de un vehículo.

El apartado 4.4.3 agrupa los apartados donde se indican los diferentes test de evaluación subjetiva que se realizaron y los evaluadores participantes.

El apartado 4.4.4 agrupa los apartados donde se describe el procesado de los datos y los análisis realizados.

4.4.2. Estudio de campo para la caracterización de un vehículo de alta velocidad

4.4.2.1. Vehículo analizado y recorrido

El estudio de campo piloto se realizó en un vehículo de alta velocidad y en un trayecto que cumplía con los requisitos impuestos en la definición de alta velocidad del presente estudio definidos en 4.3.1.2.1.

El vehículo formaba parte de los vehículos descritos en la tabla 4.2 que circulan en España considerados de alta velocidad.

En concreto, la composición del vehículo medido era de cuatro coches con dos cabezas motoras y no disponía de coche cafetería.

El trayecto realizado fue en territorio español durante una prueba programada de dicho vehículo. El trayecto formaba parte de la ruta comercial que realizaba este vehículo de manera habitual, cumpliendo las condiciones de medida descritas en 4.3.1.6.

La duración del trayecto fue de dos horas aproximadamente, trayecto que consistía en una ida y vuelta al mismo punto.

4.4.2.2. Instrumentación y condiciones de medida establecidas

Cumpliendo con la definición inicial del protocolo para la caracterización acústica de un vehículo de alta velocidad en condiciones comerciales, se establecieron *a priori* las condiciones de medida definidas en el apartado 4.3.1.6 *Definición inicial de las condiciones de medida de cada vehículo* y se utilizó la instrumentación seleccionada, la cabeza artificial HMS III desarrollada por HEAD Acoustics. En la figura 4.8 se muestra la colocación de la instrumentación a bordo del vehículo.



Figura 4.8: Colocación de la instrumentación durante la medida de un vehículo

4.4.2.3. Selección de los puntos de medida objetivo

Con el objetivo de elaborar una serie de hipótesis que permitieran definir el protocolo definitivo, se seleccionaron una serie de puntos de medida para el estudio de campo piloto siguiendo las indicaciones descritas en el apartado 4.3.1.7 *Distribución inicial de los puntos de registro en el interior de los vehículos*.

La distribución de los diferentes puntos de medida, representada en la figura 4.9, corresponde al objetivo de explorar la influencia de los factores que afectan a la localización de medidas a lo largo del vehículo.

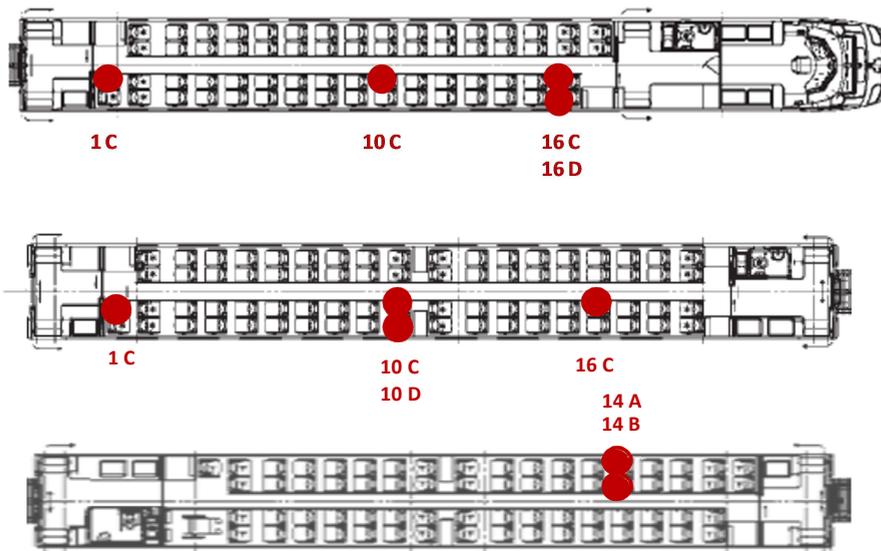


Figura 4.9: Localización de los puntos de medida objetivo (Arriba: Coche de cabeza. Centro: Coche intermedio 1. Abajo: Coche intermedio 2)

En concreto, se consideró la influencia de la localización del pasajero dentro del coche en función de si está en asiento de ventana o pasillo y de su localización a lo largo del coche, en el centro del vehículo, en el extremo más próximo a los bogies y en una posición intermedia entre extremo y centro. Para poder explorar la influencia del factor distancia a la cabeza tractora se registraron posiciones equivalentes entre coches con diferente distancia.

En la tabla 4.11 se indica cual fue la selección de los puntos objetivos para registrar en el estudio piloto, así como su distribución respecto a los factores de influencia.

Tabla 4.11: Descripción de los puntos de medida objetivo

	Ventana	Pasillo
Centro del coche	10D (Coche intermedio 1)	10C (Coche de cabeza)
		10C (Coche intermedio 1)
Bogie y extremo del coche	16D (Coche de cabeza)	16C (Coche de cabeza)
		16C (Coche intermedio 1)
		1C (Coche de cabeza)
		1C (Coche intermedio 1)
Entre bogie y centro	14A (Coche intermedio 1)	14B (Coche intermedio 2)

4.4.2.4. Sonidos validados para su utilización en la fase de evaluación subjetiva

Durante el estudio de campo piloto se lograron registrar un total de dieciocho sonidos, pero solo ocho fueron considerados validados al cumplir las condiciones de medida establecidas en 4.3.1.6, tal y como se describe en el capítulo 5 *Resultados y Discusión* en los resultados del estudio piloto.

Dentro de estos registros validados, existían registros con el vehículo circulando a velocidad comercial del vehículo y registros con el vehículo circulando a una velocidad un 20% inferior a la velocidad comercial.

De los registros válidos para el estudio se debían seleccionar los dos sonidos de referencia, 0- Nada molesto y 10 – Muy molesto.

Para la selección de las referencias se aplicó el procedimiento definido para este fin descrito en 4.3.2.2 *Construcción de una escala de referencia para el nivel de molestia*.

La selección del sonido para la referencia 10 – Muy molesto no presentó problemas ya que el sonido 3 presentaba un nivel de *loudness* claramente superior (tabla 4.12) y de manera subjetiva el mayor nivel de molestia de este sonido respecto al resto también era percibido.

Sin embargo, a la hora de seleccionar la referencia inferior (0- Nada molesto) los sonidos registrados a una velocidad un 20% inferior presentaban los menores niveles de

loudness pero este nivel era muy similar entre ellos y ninguno de ellos era claramente percibido como menos molesto respecto al resto (tabla 4.12).

Debido a este hecho y con el objetivo de tener un sonido de referencia netamente menos molesto al resto se decidió seleccionar uno de los registros descartados realizado a muy baja velocidad (100 km/h) como referencia inferior. Este sonido presentaba un nivel de *loudness* claramente inferior al resto y, de manera subjetiva, valorado por el equipo investigador, también era percibido con un bajo nivel de molestia.

A continuación, en la tabla 4.12 se describen los sonidos validados para ser utilizados en la prueba piloto de evaluación subjetiva junto con las condiciones de registro y su valor del percentil 50 de *loudness*.

Tabla 4.12: Descripción de sonidos validados para ser valorados por los evaluadores y sonidos de referencia

Sonido	Velocidad comercial	Ventana/ Pasillo	Centro/ Bogie	Distancia a la cabeza	Loudness (Sones)
3 (16D)	Sí	Ventana	Bogie	1 ^{er} coche	32,8
6 (16C)	Sí	Pasillo	Bogie	1 ^{er} coche	27,7
7 (10C)	Sí	Pasillo	Centro	1 ^{er} coche	28,1
8* (1C)	Sí	Pasillo	Bogie	1 ^{er} coche	40,9
11(16C)	20% inferior	Pasillo	Bogie	3 ^{er} coche	22,7
12 (10C)	20% inferior	Pasillo	Centro	3 ^{er} coche	19,8
16 (14B)	20% inferior	Ventana	Entre bogie y centro	2 ^o coche	20,6
17 (14A)	20% inferior	Pasillo	Entre bogie y centro	2 ^o coche	20,7
19** (16D)	100 km/h	Ventana	Bogie	1er coche	11,3

*Sonidos de referencia superior de la escala (10 - Muy molesto)

** Sonidos de referencia inferior de la escala (0 - Nada molesto)

4.4.3. Estudio de evaluación subjetiva

4.4.3.1. Evaluación subjetiva del nivel de molestia

De los sonidos de la tabla 4.12 se evaluó el nivel de molestia de los sonidos 3, 6, 7, 11, 12, 16 y 17, por parte de diez evaluadores en sesiones individuales, obteniéndose 10 valoraciones del nivel de molestia para cada uno de los sonidos. Se utilizó la escala descrita en el apartado 4.3.2.2 *Construcción de una escala de referencia para el nivel de molestia* utilizando el sonido 19 de referencia inferior de la escala (0 - Nada molesto) y el 8 de referencia superior de la escala (10 - Muy molesto).

En cada una de las sesiones de medida un evaluador evaluaba los siete sonidos siguiendo el protocolo descrito en el apartado 4.3.2.3.2 *Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia* que contempla las fases de instrucción, familiarización y evaluación definitiva.

4.4.3.2. Evaluación mediante semántica diferencial

Al final de la evaluación del nivel de molestia, todos los evaluadores realizaban la evaluación semántica de tres o cuatro de los siete sonidos, dependiendo del tiempo disponible, siguiendo la metodología descrita en 4.3.2.5 *Definición del test de semántica diferencial. Otros procesos de medida.*

4.4.3.3. Valoración del protocolo

Una vez concluida la evaluación, el evaluador debía contestar a un cuestionario de respuestas abiertas para conocer su opinión sobre la sesión de evaluación. En concreto, en dicho cuestionario se valoraron los siguientes aspectos:

- Dificultad de la valoración.
- Adecuación de la duración de la evaluación.
- Adecuación del número de sonidos a valorar por su nivel de molestia.
- Comprensión de los adjetivos.

Además, se incluyó una pregunta abierta en la que el evaluador podía anotar cualquier comentario que considerase relevante o quisiera manifestar y el experimentador que realizó el ensayo debía anotar cualquier incidencia detectada o comentario del evaluador.

4.4.3.4. Evaluación de la fiabilidad del evaluador

Cinco de los sujetos repitieron la evaluación en dos sesiones distintas, con una diferencia temporal superior a una semana con el objetivo valorar la necesidad de incluir un test previo para evitar la selección de evaluadores no fiables.

Estos cinco sujetos, en cada una de las sesiones, evaluaron los mismos sonidos pero con una codificación y orden distintos.

Una semana se consideró tiempo suficiente para que el evaluador no recordara el nivel de molestia evaluado para cada sonidos en la sesión anterior.

4.4.3.5. Sujetos de participantes en la valoración

En las sesiones de evaluación subjetiva participaron un total de 10 sujetos. Todos los evaluadores del ensayo cumplían los criterios de inclusión y exclusión definidos en 4.3.2.4. *Selección de los evaluadores.*

Los sujetos comprendían edades entre 25 y 52 años y en cuanto al género de los sujetos, participaron 7 hombres y 3 mujeres.

Todos los sujetos realizaron la evaluación subjetiva del nivel de molestia, el test de evaluación semántica y la valoración del protocolo.

4.4.4. Procesado de datos en el estudio piloto

Los sonidos registrados en el estudio de campo piloto fueron posteriormente validados en el laboratorio para incluir solo aquellos sonidos que cumpliesen las condiciones de medida. Para la muestra de sonidos seleccionados se calculó su caracterización psicoacústica y su nivel de molestia para, a continuación, proceder con el análisis de los datos.

La figura 4.10 muestra el esquema seguido para el procesado y análisis de datos realizado en el estudio piloto.

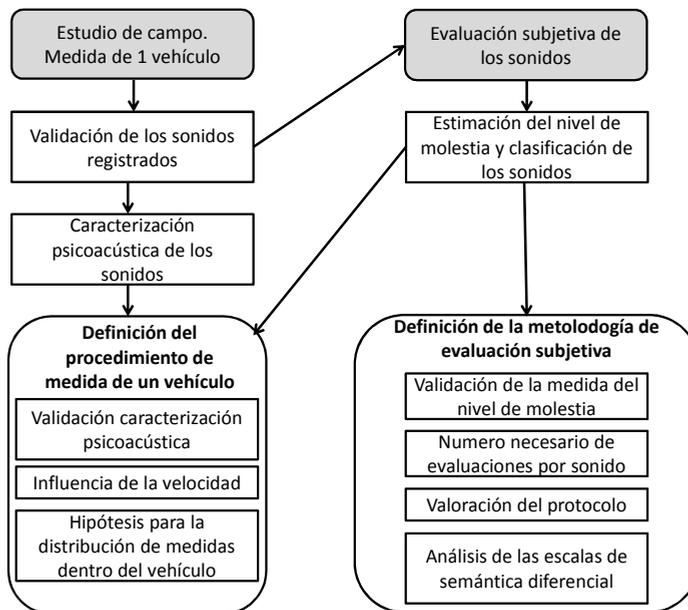


Figura 4.10: Procesado de información del estudio piloto

Cada caja con fondo blanco corresponde a cada uno de los apartados que se incluyen a continuación, donde se detallan los pasos del procesado de información.

4.4.4.1. Validación de los sonidos registrados. Número de sonidos validados

Para la medida experimental del vehículo del estudio de campo piloto se siguieron las condiciones de medida establecidas en la definición inicial de la metodología descritas en el apartado 4.3.1.6.

Tras el estudio de campo, se realizó una revisión posterior en laboratorio de los registros realizados con el objetivo de validar que las condiciones de medida habían sido respetadas y eliminando de la muestra los sonidos registrados que no cumplían con las mismas.

4.4.4.2. Caracterización psicoacústica de los sonidos validados

Para la caracterización psicoacústica se calcularon las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness*, *roughness*, *tonality* y *fluctuation strength*, según el apartado 4.3.3.1.

Para cada sonido, de 90 segundos de duración, se calcularon dichas variables en función del tiempo y se extrajeron de las señales obtenidas diferentes percentiles²⁰: el percentil 5, como estimador del nivel máximo de la variable psicoacústica, el percentil 95 como estimador del nivel mínimo o de fondo y el percentil 50 como estimador del nivel medio.

Al tratarse de un ensayo piloto de carácter exploratorio se realizaron los cálculos con el sonido registrado por uno de los micrófonos de la cabeza maniquí.

El cálculos de las variables psicoacústicas se realizó con el software ARTEMIS multichannel analysis (*Head acoustics, GmbH*).

Para las variables *loudness* y *sharpness* ARTEMIS ofrece diferentes métodos de cálculo. Para la variable *loudness* se utilizó en el cálculo de “*loudness vs time*” y en concreto se utilizó el método “FFT / ISO 532B” que sigue el modelo descrito por la norma ISO-532 B:1975 para sonidos estacionarios. Para el cálculo de la variable *sharpness* se utilizó el “*sharpness vs time*” y en concreto se utilizó el método “*Aures*” (Aures, 1984).

4.4.4.3. Estimador del nivel de molestia de los sonidos validados y clasificación

Para establecer el nivel de molestia de los sonidos validados se calculó la valoración media de cada sonido a partir de las evaluaciones individuales realizadas por los diez evaluadores.

Para su clasificación según su nivel de molestia se calcularon las diferencias estadísticamente significativas entre los sonidos. Se realizó un test ANOVA con variable dependiente las evaluaciones individuales del nivel de molestia de los sonidos realizada por cada evaluador y con factor SONIDO. Se han calculado las diferencias estadísticamente significativas entre sonidos con el test de contrastes post-hoc DHS Tukey-b (1953), con una confianza del 95%.

²⁰ En acústica el percentil N expresa los niveles que han sido alcanzados o sobrepasados en N% del tiempo.

4.4.4.4. Análisis para la definición del procedimiento de medida de un vehículo

4.4.4.4.1. Validación y exploratorio de la caracterización psicoacústica del sonido

Para validar la adecuación de las variables seleccionadas a la caracterización psicoacústica de los sonidos del interior del vehículo, se realizó un descriptivo exploratorio de cada una de ellas para conocer sus valores medios, rangos y variabilidad. Este descriptivo permitió validar la adecuación de cada una de las variables como descriptor de los sonidos estudiados verificando que existía variabilidad entre los sonidos de la muestra.

Como se describió en el apartado 4.3.3.4 *Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia*, las variables psicoacústicas son las variables independientes del modelo de regresión lineal múltiple. Para explorar el cumplimiento de los supuestos del modelo, se determinó la colinealidad entre las variables así como su grado de dependencia lineal con el nivel de molestia, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson (1894).

4.4.4.4.2. Influencia de la disminución de la velocidad comercial

Los sonidos considerados válidos en la fase piloto fueron registrados con el vehículo circulando a velocidad comercial y a una velocidad un 20% inferior a ésta.

En concreto, de los siete sonidos que fueron evaluados, cuatro de ellos fueron registrados a velocidad comercial y tres a una velocidad un 20% inferior.

Para estudiar la influencia de la velocidad se realizó un análisis exploratorio para observar las diferencias entre sonidos en función de la velocidad tanto en su caracterización psicoacústica como en el nivel de molestia percibido. Debido a la reducida muestra de sonidos se decidió no realizar un análisis estadístico inferencial.

4.4.4.4.3. Elaboración de hipótesis para la distribución de los puntos de registro dentro del vehículo

La selección de los puntos de medida objetivo del estudio piloto fue diseñada para establecer hipótesis en cuanto a la influencia de los factores ventana / pasillo, localización a lo largo del coche y distancia del coche a la cabeza del vehículo. Sin embargo, tras el estudio de campo piloto, no fue posible el análisis para el establecimiento de hipótesis del factor distancia del coche a la cabeza del vehículo, al no disponer de registros comparables según este factor.

Para la elaboración de las hipótesis *a priori* se tuvo en cuenta tanto la caracterización psicoacústica del sonido como el nivel de molestia percibido.

Se analizó la influencia del factor ventana / pasillo comparando sonidos registrados en parejas de asientos contiguos en los cuales el resto de factores de influencia permanecían constantes.

Para analizar la influencia de localización a lo largo del coche, la muestra de sonidos permitió la comparativa de asientos localizados en un extremo del coche sobre el bogie

(bogie) frente a asientos en localizados en el centro del coche (centro). En estos asientos el resto de factores de influencia permanecían constantes.

No se planteó realizar ningún test estadístico inferencial para analizar la influencia de los factores pues las comparaciones realizadas eran de una única pareja para cada uno de los factores debido a la reducida muestra de sonidos validados.

4.4.4.5. Análisis para la definición de la metodología de la evaluación subjetiva

4.4.4.5.1. Validación de la medida de nivel de molestia

Para la validación de la medida del nivel de molestia se realizaron dos análisis complementarios.

Primero, para valorar el uso de la escala de valoración así como la adecuada selección de los sonidos de referencia, se realizó un análisis exploratorio mediante un histograma de valoraciones individuales según la escala propuesta del nivel de molestia para visualizar las características de la distribución.

El segundo análisis consistió en valorar la fiabilidad de la medida del nivel de molestia. Para ello se ha utilizado el estadístico coeficiente de correlación intraclass (ICC). Este estadístico cuantifica el grado de similitud entre las evaluaciones de una muestra de evaluadores de una misma variable (nivel de molestia).

En concreto se calculó el ICC(1,1) de una vía con una repetición (Shrout y Fleiss, 1979).

El ICC(1,1) se define como:

$$ICC(1,1) = \frac{BMS - WMS}{BMS + (k-1) \cdot WMS} \quad (4.4)$$

Donde BMS (Between groups mean square) representa la suma de cuadrados entre grupos, WMS (Within groups mean square) es la suma de cuadrados intragrupos y k es el número de evaluadores.

Mediante este modelo de ICC se calcula la fiabilidad de la medida considerando que cada estímulo puede ser valorado por un evaluador diferente, seleccionado de una población muy grande de potenciales evaluadores. La variabilidad introducida por el evaluador no se elimina, por tanto, forma parte del error de la medida.

Aunque el ICC(1,1) es el más restrictivo (Shrout y Fleiss, 1979), la razón por la que se utiliza en este análisis, es debido a que la metodología debe permitir la evaluación en un futuro de nuevos sonidos más allá del presente trabajo. Por tanto, no es posible disponer de medidas repetidas de cada sonido, es decir, cada evaluador no puede evaluar todos los sonidos.

4.4.4.5.2. Evaluación de la fiabilidad del evaluador y repetibilidad de la evaluación intrasujeto

Con las evaluaciones obtenidas por los cinco evaluadores que repitieron con una diferencia de más de una semana se estimó la fiabilidad de la evaluación para cada uno de ellos.

Para evaluar la fiabilidad se tuvieron en cuenta dos aspectos, lo consistente que es un evaluador consigo mismo (variabilidad intrasujeto) y lo consistente que es con el resto de evaluadores, es decir, la cercanía al modelo propuesto de estimación mediante el promedio de las puntuaciones de los evaluadores.

La estimación de variabilidad intrasujeto de cada uno de los evaluadores se calculó utilizando el índice de correlación lineal paramétrico de Pearson entre las respuestas de la primera sesión y las respuestas de la segunda sesión.

Para estimar la cercanía de la evaluación de un evaluador al modelo, se calculó para cada sesión de cada evaluador la correlación lineal paramétrica de Pearson entre las puntuaciones de la sesión y la valoración promedio del nivel de molestia, promedio calculado con el total de evaluadores del piloto.

La razón de que se utilice un estimador paramétrico para la correlación es que no solo interesa validar la repetibilidad en la ordenación que hacen los sujetos sino que es necesario tener en cuenta la distancia entre valoraciones al tratarse de una escala de intervalo.

4.4.4.5.3. Determinación del número necesario de evaluaciones de cada sonido. Cálculo del tamaño de muestra

A continuación, una vez validado el modelo se procedió a calcular la potencia de test, con el fin de establecer el número de valoraciones necesarias para cada sonido evaluado.

Para ello se realizó un cálculo de la potencia (Scheffe, 1959) sobre el test F aplicado al nivel de molestia como variable dependiente, para tomar una decisión en cuanto al número de valoraciones adecuado teniendo en cuenta la magnitud de las diferencias en el nivel de molestia entre sonidos que se desea discriminar.

4.4.4.5.4. Exploración de los atributos utilizados en semántica diferencial

Uno de los objetivos del estudio piloto era explorar los atributos a utilizar en una valoración de los sonidos mediante la técnica de semántica diferencial. Esta exploración tenía un doble objetivo. Por un lado, optimizar la evaluación, si es posible, evitando medir dos veces el mismo fenómeno, y por otro lado, validar si con los atributos utilizados es suficiente para explorar el proceso de percepción de los sonidos del vehículo por los pasajeros, revisando las sensaciones cualitativas expresadas por los evaluadores.

Para ello se realizaron dos tipos de análisis:

- **Análisis cuantitativo:** Este análisis se realizó con las puntuaciones de los adjetivos evaluados a través de la escala de 5 niveles. El objetivo es explorar la independencia de las valoraciones realizadas de los distintos atributos, entre sí, y respecto a la valoración del nivel de molestia con el fin optimizar el número de atributos en la valoración. Para ello se calcularon las correlaciones de todas las valoraciones en los distintos atributos entre sí y con el nivel de molestia a través del coeficiente de correlación de Pearson. Además, se realizó un ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROTADO (VARIMAX), análisis cuyo objetivo es la reducción del número de variables, para identificar los conceptos incorrelacionados que subyacen a la evaluación realizada a través de las 5 parejas de adjetivos.
- **Análisis cualitativo:** El análisis cualitativo tiene un doble objetivo. Por un lado, se validaría si los usuarios comprenden correctamente los atributos, *a priori* seleccionados, para la evaluación o por el contrario manifiestan dificultades en la evaluación de los mismos. Por otro lado, se analizaron los adjetivos que los usuarios utilizan libremente a la hora de describir los sonidos gracias a que el sujeto disponía de un apartado en el cuestionario para anotar las sensaciones que podrían describir los registros mediante sus propias palabras (adjetivos, símiles, etc.). El objetivo es encontrar comunidades entre sujetos a la hora de describir este tipo de sonidos que sugiera incluir nuevos atributos a la evaluación.

4.4.4.5.5. Valoración del protocolo

Por último, se recopilaron las respuestas de los evaluadores para conocer su opinión en cuanto a la dificultad de la valoración, duración de la sesión de evaluación y adecuación del número de sonidos a valorar por su nivel de molestia.

4.5. Definición final de la metodología

4.5.1. Procedimiento final de medida de un vehículo de alta velocidad para su caracterización psicoacústica

4.5.1.1. Introducción

La aplicación de los resultados del piloto a la definición final del procedimiento de medida consistió en:

- Definir un rango de velocidad comercial limitado para asegurar que los sonidos han sido registrados a velocidad comercial, debido a la influencia en el nivel de molestia y en la caracterización psicoacústica de los sonidos cuando el vehículo circula a una velocidad inferior.
- Definir una distribución de los puntos de registro del vehículo que permitan la comparativa entre vehículos, una vez ya conocido el número de sonidos que es

viable registrar por vehículo y aplicando las hipótesis de los factores de influencia del ruido interior para el control de los mismos.

La incorporación de estos resultados del estudio piloto al procedimiento de medida se describe en la definición final de las condiciones de medida de los vehículos del apartado 4.5.1.2 y en la distribución final de los puntos de registro en el interior de los vehículos, descrita en el apartado 4.5.1.3, respectivamente.

4.5.1.2. Definición final de las condiciones de medida de los vehículos

En el estudio piloto de un total de 18 sonidos que se lograron registrar solo se consideraron válidos 8 de los sonidos, es decir, que cumplieran con las condiciones de medida.

Para el piloto se admitió una variación de velocidad del 20% por debajo de la velocidad comercial y se analizó su influencia en la percepción.

Los resultados del estudio piloto demostraron que esta disminución de la velocidad, influía directamente sobre el nivel de molestia, además de sobre las variables psicoacústicas de los sonidos: nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*.

Con este resultado se decidió modificar las condiciones de medida la condición referente a la velocidad a la que debe circular el vehículo, exigiendo la definición de un rango acotado alrededor de la velocidad comercial para asegurar que la velocidad de circulación del vehículo, cuando se registran los sonidos, está dentro de las condiciones definidas.

Este rango se estableció en ± 5 km/h de la velocidad comercial del vehículo. Este margen es lo suficientemente amplio para que la velocidad del vehículo se mantenga dentro de los límites el tiempo suficiente para que se puedan registrar las muestras de sonido de una duración de 90 segundos y a la vez asegurar que la velocidad del vehículo no varíe de manera significativa respecto de la velocidad comercial para que afecte al sonido.

Con esta modificación, las condiciones de medida de cada vehículo fueron definidas de la siguiente manera:

- Se registrarán vehículos de alta velocidad comerciales con un nivel de mantenimiento dentro de los parámetros establecidos por el operador para su flota en servicio.
- Se registrarán vehículos circulando por un trayecto comercial con un estado de mantenimiento de la vía dentro de los parámetros establecidos por el operador.

Los registros en el interior de estos vehículos se realizarán en las siguientes condiciones:

- Los equipos de auxiliares que normalmente funcionen durante la marcha deben estar encendidos.
- Las puertas de intercomunicación entre compartimentos permanecerán cerradas.

- El vehículo estará circulando a velocidad comercial $\pm 5\text{km/h}$.
- El vehículo no puede estar en ese momento circulando por el paso de un evento discreto que afecta a su ruido interior tales como aceleraciones, frenazos, paso por túneles, núcleos urbanos, estaciones y cruzando con otros vehículos.

4.5.1.3. Distribución final de los puntos de registro en el interior de los vehículos

Para la selección de los puntos de medida en el interior del vehículo se partió de dos resultados del piloto:

- El número de registros válidos que es viable medir durante un trayecto de pruebas, que se estimó en ocho.
- Las hipótesis sobre los factores de influencia en el ruido interior según la localización dentro del vehículo.

Estas hipótesis se establecieron mediante la observación de tendencias de los factores ventana / pasillo y localización a lo largo del coche. Las hipótesis basadas en las tendencias observadas se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13: Hipótesis de los factores de influencia para la selección de los puntos de registro

Variable	Factor ventana / pasillo	Factor centro / bogie
L_A, loudness, y roughness	Débil dependencia. Aumenta en el asiento de ventana frente al de pasillo.	Débil dependencia. Aumenta en los asientos sobre bogie frente a los centrales.
Sharpness	No se observa influencia.	No se observa influencia.
Nivel de molestia	Débil dependencia. Aumenta en el asiento de ventana frente al de pasillo.	Débil dependencia. Aumenta en el asiento de ventana frente al de pasillo.

En cuanto a la distancia a la cabeza no se pudieron establecer hipótesis en el estudio piloto más allá de las encontradas por bibliografía en cuanto a la influencia del ruido aerodinámico que indica que en cabeza motora el flujo es laminar, pero debido a la viscosidad, este flujo laminar, rápidamente se convierte en flujo turbulento hasta llegar al coche de cola (Romero-Ibáñez, 2011).

Además de las hipótesis, a la hora de seleccionar los puntos de medida se tuvo en cuenta el hecho de que no todos los vehículos están compuestos por el mismo número de coches, considerando que el número mínimo de coches que compondrán los vehículos de la muestra es de cuatro, según los datos disponibles de la tabla 4.2.

En base a esta información, para poder medir posiciones equivalentes de cada vehículo que permitan su comparación en cuanto al nivel de molestia a la vez que conseguir variabilidad en la caracterización acústica de los sonidos, se definieron las siguientes indicaciones para la selección de las posiciones de medida:

- Medir dentro del primer coche, segundo coche, último coche y penúltimo coche respecto de la cabeza del vehículo. Esta distribución permite la comparativa de composiciones equivalentes entre vehículos independientemente del número de coches que lo compongan.
- Medir los dos asientos de cada coche, *a priori*, con mayor y menor nivel de molestia que coinciden, a su vez, con mayor y menor nivel de nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*. Estos asientos corresponden con el asiento de pasillo situado en el centro del coche y con el asiento de ventana situado sobre bogie.

Siguiendo estas indicaciones se identificaron las posiciones objetivo en función del coche y de los factores ventana/pasillo y centro/bogie (tabla 4.14), donde deberán localizarse los asientos a medir en cada vehículo.

Tabla 4.14: Localización de los puntos de registro en el interior de los vehículos

Nº posición	Coche (respecto de cabeza)	Localización del asiento
1	1 ^{er} Coche	Centro+Pasillo
2	1 ^{er} Coche	Bogie+Ventana
3	2 ^o Coche	Centro+Pasillo
4	2 ^o Coche	Bogie+Ventana
5	Penúltimo Coche	Centro+Pasillo
6	Penúltimo Coche	Bogie+Ventana
7	Último Coche	Centro+Pasillo
8	Último Coche	Bogie+Ventana

Por tanto cada uno de los vehículos se caracteriza a través de 8 sonidos siguiendo un diseño experimental equilibrado que considera dos factores COCHE y LOCALIZACIÓN. El factor COCHE es un factor con 4 niveles (1^{er} Coche, 2^{er} Coche, Penúltimo Coche, Último Coche) y el factor LOCALIZACIÓN es un factor con 2 niveles (Bogie+Ventana, Centro+Pasillo).

Para agilizar la toma de medidas se evitó el desplazamiento de la instrumentación por todo el vehículo en la sesión. Para ello, se realizaron las medidas en el primer y segundo coche del trayecto de ida y en el trayecto de vuelta, estos mismos coches, pasan a ser el último y penúltimo coche respectivamente al cambiar el sentido de la marcha. En la figura 4.11 se pueden visualizar la selección de puntos de registro en el interior de los vehículos teniendo en cuenta la dirección de circulación en un vehículo genérico.

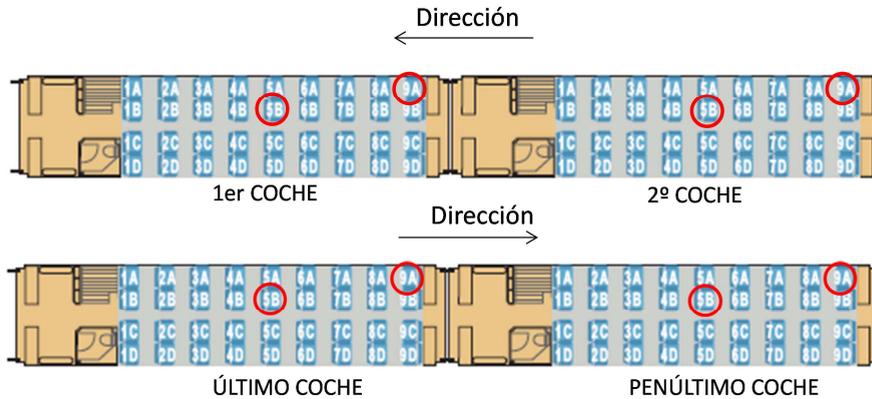


Figura 4.11: Localización de los puntos de registro en el interior un vehículo

4.5.2. Metodología final de evaluación subjetiva del nivel de molestia

4.5.2.1. Introducción

Los resultados obtenidos del estudio piloto relacionados con el avance en la metodología de evaluación subjetiva sirvieron para hacer una primera validación de la calidad de la medida, adecuación del protocolo y para terminar de definir aspectos que no estaban resueltos en la definición inicial.

En concreto, los resultados del estudio piloto, descritos en 5.2.5, aplicados a la definición de la metodología de evaluación subjetiva fueron:

- Tener una primera validación de la escala de medida del nivel de molestia, así como determinar su fiabilidad con una primera muestra de sonidos, que permita asegurar la calidad de la medida para la definición final de la metodología.
- Determinar el número necesario de evaluaciones por sonido necesario para tener una medida del nivel de molestia con una capacidad de discriminación adecuada mediante la aplicación del cálculo de potencia.
- Terminar de definir los criterios de inclusión y exclusión aplicados a la selección del evaluador, gracias al análisis de la fiabilidad asociada al mismo.
- Mantener el protocolo de medida, teniendo en cuenta la valoración positiva del mismo por parte de los evaluadores, y realizar pequeños ajustes si fuese necesario de acuerdo a dicha valoración.
- Por último, reducir el número de atributos explorados a valorar para su aplicación en semántica diferencial.

En los siguientes apartados se describe cada uno de los avances en la metodología de evaluación aquí comentados, para la definición final de la misma.

4.5.2.2. Definición del proceso de medida principal. Nivel de molestia

Con los resultados del estudio piloto se validó la metodología de medida del nivel de molestia con una muestra de sonidos reducida.

Los evaluadores utilizaron todo el rango de la escala, de 0 a 10, para valorar el nivel de molestia y las evaluaciones no estaban sesgadas hacia ningún lado de la escala. La selección de los sonidos de referencia fue adecuada a la muestra de sonidos a evaluar.

La metodología se consideró fiable con un ICC de 0,972 contando con diez evaluaciones por sonido.

El protocolo de evaluación fue bien valorado por los evaluadores. Estos consideraron que la complejidad y la duración de la sesión de evaluación eran adecuadas, sin producir cansancio.

Estos resultados permitieron aumentar la seguridad de la adecuación de la metodología, en una fase previa al estudio completo.

El análisis de los datos de evaluación subjetiva permitió la determinación del número mínimo de evaluaciones por sonido para obtener una respuesta fiable y ajustar el número de sonidos que se recomienda evaluar en una sesión de evaluación, como se describe a continuación.

Número de evaluaciones por sonido

Para el cálculo del tamaño de muestra, resultado del estudio piloto, se obtuvo que seis es el número de evaluaciones mínimo por sonido necesarias para que a través de esta metodología se encuentren diferencias estadísticamente significativas entre dos sonidos que presentan un nivel de molestia diferente en al menos de dos puntos en la escala con una potencia superior al 80%, pudiendo aumentarse la potencia a 95% si se aumenta a diez el número de evaluaciones por sonido.

En base a estos resultados, se recomienda un mínimo de seis valoraciones por sonido. Si se reduce el número de evaluadores respecto de los diez utilizados en el estudio piloto se hace necesario valorar el impacto en el ICC para el estudio completo.

Número de sonidos a evaluar por sesión

En cuanto al número de sonidos a evaluar por un evaluador en una sesión, de los resultados de valoración del protocolo por parte de los evaluadores en el ensayo piloto, éstos consideraron que siete es un número de sonidos adecuado e incluso podría aumentarse siempre que los estímulos no sean muy similares entre sí.

Para poder obtener el máximo rendimiento de las sesiones de medida se propuso fijar en ocho el número máximo recomendado de sonidos a evaluar. El aumento en un sonido no pone en riesgo el resultado de la evaluación ni la dificultad de la sesión.

Salvo la incorporación del número de evaluaciones mínimo por sonido y el número de sonidos a evaluar por sesión, no se realizó ninguna modificación en cuanto a la metodología utilizada para la medida del nivel de molestia. Se mantuvo la definición de las características del entorno de escucha definidas en 4.3.2.3.1 *Entorno de escucha*

(sala, equipamiento y visualización de la escala), el protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia con sus tres fases descrito en 4.3.2.3.2 *Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia* (fase de instrucción, familiarización y evaluación definitiva).

4.5.2.3. Selección de los evaluadores

En el estudio piloto la fiabilidad del evaluador se estimó, con cinco evaluadores, mediante la repetibilidad intrasujeto de sus propias evaluaciones entre una sesión y otra y mediante el consenso de sus evaluaciones con el resto de evaluadores.

Los resultados encontrados indicaban que uno de los evaluadores era muy repetible sin embargo sus valoraciones se alejaban de la evaluación media. Otro de los evaluadores era poco repetible en su evaluación debido a que en una de las sesiones sus valoraciones diferían de la media, sin embargo, en la otra sesión sus resultados fueron consistentes con el resto de evaluadores. Por tanto, esta falta de repetibilidad no parece una característica propia del sujeto sino de algún problema que se produjo en una sesión en concreto.

En resumen, los niveles de correlación eran superiores 0,83 excepto en el caso comentado del evaluador 6 que una sesión obtuvo 0,753 en su correlación con el resto de evaluadores. En el trabajo de Zhang *et al.* (2012) en donde se obtuvieron valores de correlación entre evaluadores entre 0,708 y 0,989, la evaluación se consideró efectiva.

Con los niveles de correlación encontrados en el piloto, en su mayoría elevados, junto con alta fiabilidad de la evaluación del nivel de molestia (ICC=0,972), se consideró que la fiabilidad del evaluador no una era fuente de variabilidad que invalide la validez de la metodología.

En base a estos resultados no se propuso añadir ningún método o test para la exclusión *a priori* de los evaluadores en base a su baja fiabilidad.

4.5.2.4. Definición del test de semántica diferencial. Otros procesos de medida

El objetivo del estudio piloto en cuanto a la valoración semántica era, por un lado, validar si los adjetivos utilizados son suficientes para explorar el proceso de percepción de los sonidos del vehículo por los pasajeros, y por otro lado, optimizar la evaluación semántica, si era posible.

En relación con el primero de los objetivos, tras realizar el análisis semántico de los adjetivos o maneras de describir los sonidos que los evaluadores utilizaron libremente en el ensayo piloto, se concluyó que la mayoría de los adjetivos descritos por los sujetos se encuentran dentro de los adjetivos utilizados en las escalas semánticas.

En cuanto a la simplificación de la evaluación semántica, tras el análisis de componentes principales realizado a partir de la información contenida en las cinco escalas semánticas, aparecen tres componentes que resumen la información de la evaluación utilizando cinco atributos en tres conceptos independientes entre sí; una componente formada por fuerte / débil, áspero / suave y relajado/estresante que explica el 41,6% de la varianza, otra formada únicamente por agudo / grave que explica el

24,7% de la varianza y otra formada por rápido / lento que explica el 20, 9% de la varianza de la evaluación.

Estos resultados, apuntan a que se podría reducir de cinco a tres el número de escalas a utilizar seleccionando una pareja de adjetivos por cada una de las tres componentes incorrelacionadas.

Además, en el piloto, los evaluadores indicaron la mayor dificultad de comprensión en la escala formada por atributos áspero / suave.

Sin embargo, teniendo en cuenta que los resultados del estudio piloto se obtuvieron con una muestra reducida de siete sonidos de un único vehículo, que no refleja la potencial variabilidad que se puede encontrar en una muestra más representativa de los vehículos de alta velocidad, se decidió prescindir únicamente de la escala áspero / suave que forma parte de la primera componente.

Por tanto, tras la incorporación de los resultados del estudio piloto, se decidió para el estudio completo:

- No ampliar la evaluación mediante la introducción de nuevas escalas.
- Explorar la adecuación para semántica diferencial de las escalas definidas por las siguientes parejas de atributos:
 - Fuerte – Débil
 - Agudo – Grave
 - Relajado – Estresante
 - Rápido – Lento

4.5.3. Procesado de la información

4.5.3.1. Introducción

Para terminar de definir el procesado de información de la metodología se tuvieron en cuenta los resultados del estudio piloto así como la definición final del procedimiento de medida del vehículo. En concreto, la aplicación en el procesado de información fue la siguiente:

- Definir una nueva caracterización psicoacústica del sonido en base a los resultados descritos en el apartado 5.2.4.1.
- Mantener el estimador definido para el nivel de molestia de un sonido.
- Para realizar la comparativa entre vehículos se definieron los factores a incluir en el modelo ANOVA que responde al control de los factores de influencia del ruido interior para la distribución de los puntos de medida, definido en el apartado 4.5.1.3.
- Para el modelo psicoacústico destinado a predecir el nivel de molestia, se realizó una primera valoración de la colinealidad entre las variables psicoacústicas y el grado de asociación lineal de las mismas con el nivel de

molestia, con el objetivo de valorar el riesgo de incumplimiento de los supuestos de la regresión lineal del modelo a obtener.

4.5.3.2. Caracterización psicoacústica del sonido

La caracterización psicoacústica del sonido en la definición inicial de la metodología estaba compuesta por las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness*, *roughness*, *tonality* y *fluctuation strength* que debía ser validada en estudio piloto.

Como resultado de dicha validación, se determinó que las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* presentaban variabilidad en la muestra de sonidos y dicha variabilidad era percibida por los evaluadores ya que estas variables presentaban correlación con el nivel de molestia.

Este análisis indicó que las variables *tonality* y *fluctuation strength* no aportaban información a la caracterización de la muestra de sonidos registrada en los vehículos de alta velocidad. Para ambas variables los valores en los sonidos de la muestra eran cercanos a cero y mostraban escasa variabilidad.

Los resultados de la variable *sharpness* mostraron, pese a que sus valores eran diferentes de 0, escasa variabilidad en los sonidos de la muestra, y no presentaba correlación con el nivel de molestia. Sin embargo, es importante que según los resultados del piloto fuera la única variable incorrelacionada del resto de variables psicoacústicas. En base a estos resultados, la variable *sharpness* se mantuvo con el objetivo de que esta variabilidad aumentase cuando aumentase la muestra de sonidos incorporando otros vehículos.

Por tanto, se decidió que la caracterización psicoacústica de los sonidos incluya las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness*, eliminando de la caracterización *tonality* y *fluctuation strength*.

4.5.3.3. Estimador del nivel de molestia

El estimador del nivel de molestia definido (valor promedio de las valoraciones realizadas por todos los evaluadores) se mantiene. Los resultados del estudio piloto mostraban una alta fiabilidad de la medida del nivel de molestia a través de la metodología propuesta.

4.5.3.4. Comparativa entre vehículos

Como se describió en la definición inicial de la metodología, el análisis estadístico seleccionado para la comparativa entre diferentes vehículos de alta velocidad fue ANOVA multifactorial con la variable a comparar como variable dependiente (nivel de molestia por sonido o variable psicoacústica).

Como factores del ANOVA se definen:

- Factor VEHÍCULO: El objetivo de incluir este factor es encontrar las diferencias estadísticamente significativas para realizar la comparativa entre los vehículos que formen parte de la base de datos.

- Factor COCHE: Factor que posee cuatro niveles según la distancia a la cabeza del coche registrado (1^{er} coche, 2^o coche, penúltimo coche y último coche).
- Factor LOCALIZACIÓN: Factor que indica la posición media dentro del coche (asiento de ventana sobre bogie y asiento de pasillo en centro del coche).

El objetivo de incluir los factores COCHE y LOCALIZACIÓN es anular su influencia sobre la variable a comparar y, de esta manera, aumentar la potencia del análisis para la comparativa entre vehículos.

La base datos de sonidos seguirá un diseño equilibrado según estos factores tal y como se describió en 4.5.1.3 *Distribución final de los puntos de registro en el interior de los vehículo.*

4.5.3.5. Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

En el estudio piloto se controlaron los supuestos de linealidad entre el nivel de molestia y cada una las variables psicoacústicas y la ausencia de colinealidad entre las variables psicoacústicas, para así tener una primera valoración del cumplimiento de los mismos.

En cuanto a la linealidad, las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* presentan una correlación lineal alta con la variable nivel de molestia, con un coeficiente de correlación de Pearson de alrededor de 0,84 en los tres casos. La variable *sharpness* no presentaba correlación con el nivel de molestia.

La colinealidad entre las variables psicoacústicas nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* es muy alta también, el coeficiente de correlación es superior a 0,9 entre variables y entre la variable nivel de presión sonora ponderado A y *loudness* supera 0,99. La variable *sharpness* es la única incorrelacionada del resto pero presenta escasa variabilidad en los sonidos de la muestra.

Hay que tener en cuenta que estos resultados se han obtenido con una muestra reducida de sonidos. En el análisis del estudio completo con la muestra definitiva de sonidos se valorarán estos supuestos para garantizar la validez del modelo de regresión obtenido.

4.5.4. Conclusiones

Siguiendo en planteamiento metodológico que se ha definido al principio del capítulo en el apartado 4.2, en la tabla 4.15 se indica la definición final de la metodología de cada uno de los aspectos a considerar.

Tabla 4.15: Estado de avance tras la definición final de la metodología de los aspectos de planteamiento metodológico

		Definición final de la metodología
Estímulo	Representatividad	Para asegurar la representatividad de los estímulos se definieron las condiciones de medida de los vehículos y la distribución de ocho localizaciones de medida dentro del vehículo atendiendo a dos factores COCHE y LOCALIZACIÓN. Con esta definición se dispone de un diseño experimental equilibrado representativo de cada vehículo.
	Adquisición	Para asegurar la validez de los resultados los estímulos deben ser naturales, evitando la equalización de los mismos. La instrumentación seleccionada para la adquisición, la cabeza maniquí HMS III desarrollada por HEAD Acoustics, permite un registro de sonidos binaural que posibilita una reproducción posterior lo más parecida al sonido escuchado en el entorno original.
	Producción/ Reproducción	Con el objetivo de maximizar la representatividad del estímulo sonoro, se limitó la intervención sobre los registros a adecuar su duración a las necesidades del protocolo de evaluación.
Jurado	Representatividad	Con el objetivo de asegurar la representatividad se establecieron los criterios de inclusión y exclusión de los evaluadores.
	Selección/ Entrenamiento	El tipo de evaluador representativo no debe poseer experiencia en este producto ni en acústica. Se estableció una fase para la familiarización como parte del protocolo, sin considerarse un entrenamiento previo. Se descartó realizar una preselección de evaluadores en base a su fiabilidad.
	Número de sujetos	El número de sujetos mínimo que debe valorar cada sonido se establece en 6.
Escala	Tipo de escala: Ordinal/Nominal /Intervalo	La escala seleccionada es una escala continua con sonidos de referencia en el 0 y en el 10. El proceso de selección de los sonidos de referencia fue validado en el estudio piloto.

	Estimulo: Presentación / producción	En protocolo de evaluación subjetiva, la reproducción de los sonidos se divide en dos fases. En la fase de familiarización, con el objetivo que los evaluadores identifiquen las características del sonido molestas a largo plazo, se estableció un orden pseudoaleatorio de reproducción de los sonidos y una duración fija de 90 segundos. En la fase de evaluación definitiva con el objetivo de la evaluación precisa de molestia de los sonidos evaluados, el orden de reproducción era indicado por el evaluador. Se limitó el mínimo tiempo de escucha de 10 segundos y el un intervalo mínimo entre la escucha de dos sonidos en 2 segundos. El protocolo fue positivamente valorado por los propios evaluadores en el estudio piloto.
Test	Rol de los sujetos	El rol principal definido para los evaluadores es valorar los sonidos en cuanto al nivel de molestia. Para ello en la fase de familiarización se permite realizar anotaciones sobre la percepción de los sonidos, con una duración y orden de reproducción fijos previamente establecidos. En la fase de evaluación definitiva el evaluador decide sobre los sonidos a reproducir para precisar la evaluación de los mismos. La dificultad fue valorada como adecuada por los propios evaluadores en el estudio piloto.
	Duración	Una vez definida la metodología de evaluación, la duración completa del test depende del número de sonidos a valorar por el evaluador. La duración fue considerada adecuada por los propios evaluadores del estudio piloto. El número de sonidos por sesión fue fijado en ocho para aumentar el rendimiento de las sesiones sin poner en riesgo la fiabilidad de la medida.
	Implementación del test	Los medios materiales para la implementación del test en cuanto al entorno de escucha y el hardware y software necesarios definidos en la metodología inicial se mantienen ya que resultaron adecuados en el estudio piloto.
Análisis de los datos	Control de la respuesta de los sujetos	La metodología inicial incluye los protocolos de inclusión y exclusión. Se descartó realizar una preselección de evaluadores por la alta fiabilidad en base a los resultados del piloto.
	Construcción de la escala/medida	La fiabilidad de la medida del nivel de molestia obtenida en el estudio fue muy alta, por tanto se mantiene la metodología.
	Validación	Mediante los resultados del estudio completo se validará la metodología final, la aplicación de los resultados a la comparativa de vehículos y el modelo psicoacústico de predicción del nivel de molestia.

Resultados/
evaluación de la
incertidumbre

El resultado directos de la aplicación de la metodología es el nivel de molestia de cada sonido (promedio de las evaluaciones). Se estableció un mínimo de 6 evaluaciones por sonido para el cálculo del promedio. Si se reduce el número de evaluadores respecto de los diez utilizados en el estudio piloto se hace necesario valorar el impacto en el ICC en el estudio completo. Los resultados derivados son la comparativa entre vehículos y el cálculo de un modelo psicoacústico de predicción de nivel de molestia siguiendo las herramientas descritas. Para cada uno de estos resultados se valorará su calidad a través de unos estadísticos propios en el estudio completo.

4.6. Definición del estudio completo

4.6.1. Objetivos del estudio completo

En la definición final de la metodología se estableció el procedimiento de medida para la caracterización acústica de un vehículo de alta velocidad a velocidad comercial y la metodología de evaluación de la percepción del nivel de molestia, objetivos 1 y 2.

El estudio completo tiene como finalidad, mediante la aplicación de estos dos objetivos, realizar una fase experimental para la caracterización psicoacústica de vehículos y un estudio de evaluación subjetiva del nivel de molestia de los sonidos registrados que permitan el cumplimiento del resto de los objetivos del presente trabajo, mediante el análisis de los datos recopilados:

- Construir una base de datos representativa de registros sonoros de vehículos de alta velocidad y su percepción del nivel de molestia, objetivo 3.
- Evaluar el control de los factores de influencia del ruido en el interior de los vehículos, objetivo 4.
- Validar la metodología de evaluación de la percepción del nivel de molestia con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos, objetivo 5.
- Analizar si existen diferencias que permitan comparar vehículos de alta velocidad en cuanto a su nivel de molestia percibido y la caracterización psicoacústica, objetivo 6.
- Calcular un primer modelo que permita predecir el nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad, objetivo 7.

A continuación se describe el estudio de campo realizado para la caracterización de los vehículos de alta velocidad, las características de la aplicación del procedimiento de evaluación subjetiva así como el procesado de datos realizado.

4.6.2. Estudio de campo para la caracterización de los vehículos de alta velocidad

4.6.2.1. Vehículos analizados y recorridos

En el estudio de campo se realizó la caracterización de un total de seis vehículos de alta velocidad para formar parte de la base de datos, incluyendo el vehículo caracterizado en el estudio piloto. Tanto los vehículos y los trayectos por los que circulaban cumplía con los requisitos impuestos en la definición de alta velocidad del presente estudio definidos en 4.3.1.2.1.

Los vehículos caracterizados, cinco eran vehículos de alta velocidad operando en España (descritos en la tabla 4.2) y un vehículo operando en territorio francés, TGV-Duplex, cuyas características se describen en la tabla 4.16 y tabla 5.16.

Tabla 4.16: Características del vehículo TGV Duplex

Vehículo	Tracción y Tipo de motor	V_{Max} km/h	Composición	Año puesta en servicio (Unidades en servicio)
TGV Duplex (Alstom)	Eléctrica (8 asíncronos)	320 km/h	M+8R+M. (2 salones)	1996 (89)

En este último vehículo, los coches están compuestos por un salón superior y otro inferior para el transporte de pasajeros, cada una de estas plantas se analizará de manera independiente.

En la tabla 4.17 se muestra los vehículos que formaron del estudio de campo, fabricante, la velocidad comercial a la que se realizaron los registros y la velocidad máxima del vehículo.

Tabla 4.17: Vehículos caracterizados en el estudio de campo

Vehículo	Fabricante	Velocidad comercial	Velocidad máxima
AVE Serie 100R Automotor eléctrico S-100	Alstom	270 km/h	300 km/h
AVE Serie 103 Automotor eléctrico S-103 (Siemens)	Siemens	350 km/h	350 km/h
Avant Serie 104 Automotor eléctrico S-104	Alstom/CAF	250 km/h	270 km/h
Avant Serie 114 Automotor eléctrico S-114 (Alstom/CAF)	Alstom/CAF	250 km/h	270 km/h
Alvia Serie 130 Automotor eléctrico S-130	Talgo/Bombardier	250 km/h	250 km/h
TGV Duplex (Alstom)	Alstom	300km/h	320 km/h

Los seis vehículos registrados pertenecían a cuatro fabricantes diferentes y circulaban a velocidad comerciales desde los 250 km/h a los 350 km/h.

Los trayectos fueron realizados en territorio español, a excepción del TGV-Duplex que fue realizado en territorio francés. Todos los registros se realizaron durante una prueba programada de dicho vehículo y el trayecto formaba parte de la ruta comercial que habitualmente realizaba este vehículo.

Los vehículos fueron caracterizados siguiendo la definición final de las condiciones de medida de los vehículos, descritas en el apartado 4.5.1.2 y en las localizaciones definidas en la distribución final de los puntos de registro en el interior de los vehículos, indicadas en el apartado 4.5.1.3. Se produjo una excepción en el registro de uno de los

vehículos, que fue registrado con las puertas de intercomunicación, que separa la zona de pasajeros con el vestíbulo, abiertas.

4.6.2.2. Sonidos validados para la base de datos

Como en el caso del estudio piloto, durante la medida experimental se siguieron las condiciones de medida definidas en la metodología y tras el estudio de campo, se realizó una revisión posterior en laboratorio con el objetivo de eliminar de la base de datos los sonidos registrados que no cumplan con las mismas. Tras este proceso, la base de datos quedó compuesta por un total de 46 sonidos validados.

A continuación, en la tabla 4.18, se describe la muestra de sonidos validados indicando con una X para cada vehículo las posiciones registradas. Para identificar cada vehículo se le asignó una letra de la A a la G, a cada planta del TGV DUPLEX se le asignó una letra diferente.

Tabla 4.18: Sonidos validados de la base de datos (n=46)

Posición (Coche, localización)	Vehículo						
	A	B	C	D	E*	F	G
1 (1 ^{er} , centro)	X	X	X	X	X	X	X
2 (1 ^{er} , bogie)	X	X	X	X	X	X	X
3 (2 ^o , centro)	X	X ¹		X	X	X	X
4 (2 ^o , bogie)	X	X		X ²	X	X	X
5 (penúl, centro)	X			X		X	
6 (penúl, bogie)	X	X		X	X	X	X
7 (últ, centro)	X	X		X	X	X	X
8 (últ, bogie)	X	X		X		X	X
Total	8	7	2	8	6	8	7

* Vehículo registrado con las puertas de intercomunicación abiertas

1 Sonido de referencia 0- Nada molesto

2 Sonido de referencia 10- Muy molesto

4.6.3. Estudio de evaluación subjetiva

4.6.3.1. Evaluación subjetiva del nivel de molestia

La evaluación subjetiva del nivel de molestia se realizó siguiendo con los medios definidos en el apartado 4.3.2.3.1 *Entorno de escucha* (sala, equipamiento y visualización de la escala) y siguiendo el protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia con sus tres fases descrito en 4.3.2.3.2 *Definición del protocolo de evaluación subjetiva del nivel de molestia* (fase de instrucción, familiarización y evaluación definitiva).

Para el diseño experimental se fijó que el nivel de molestia debía ser valorado por ocho evaluadores diferentes, superando en dos el mínimo recomendado de seis siguiendo la definición final de la metodología en el apartado 4.5.3.3 *Estimador del nivel de molestia*. Teniendo en cuenta que la fiabilidad obtenida en el ensayo piloto se realizó con diez evaluaciones por sonido fue necesario valorar el impacto en la fiabilidad de la evaluación del nivel de molestia.

Selección de los sonidos de referencia

Para la selección de los sonidos de referencia se utilizó el método descrito en el apartado 4.3.2.2 *Construcción de una escala de referencia para el nivel de molestia*. El sonido correspondiente a la posición 3 del vehículo B fue seleccionado de referencia inferior de la escala (0 - Nada molesto) y el sonido correspondiente a la posición 4 del vehículo D de referencia superior de la escala (10 - Muy molesto). En la figura 4.12 se visualiza el valor de *loudness* y *sharpness* para cada uno de ellos.

Organización de las sesiones de evaluación

Para conseguir ocho evaluaciones del nivel de molestia para cada uno de los sonidos, se necesitaba obtener un total de 368 evaluaciones individuales de sonidos, distribuidas en diferentes sesiones de evaluación.

Se realizaron un total de 46 sesiones de evaluación donde un evaluador valoraba el nivel de molestia de ocho de los sonidos, siguiendo la recomendación de no superar en ocho el número de sonidos a evaluar en una sesión indicada en el apartado 4.5.2.2, en la definición final de la metodología.

Para facilitar la evaluación de los ocho sonidos, se decidió no seleccionar los ocho sonidos que evaluaba un participante en la sesión de manera aleatoria, sino seleccionarlos de manera que fuesen, *a priori*, ser percibidos diferentes entre sí.

La selección de los sonidos para cada sesión se realizó intentando conseguir variabilidad en la percepción mediante la información de las variables psicoacústicas. Para ello, representado su nivel de *loudness* y *sharpness* (variables incorrelacionadas entre sí) se dividieron los sonidos, de manera visual, en ocho grupos que presentaban valores cercanos de *loudness* y *sharpness*. Para cada una de las sesiones de evaluación se seleccionó un sonido de cada uno de los grupos. En la figura 4.12 se muestran los sonidos según su pertenecía a los ocho grupos.

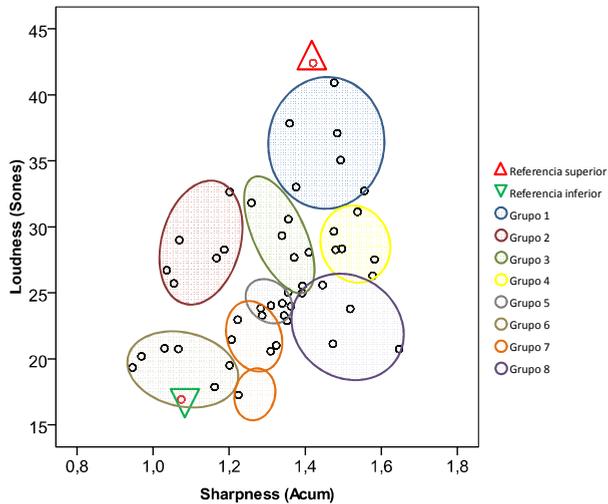


Figura 4.12: Visualización de los grupos según su nivel de loudness y sharpness

4.6.3.2. Evaluación mediante semántica diferencial

Al final de la evaluación del nivel de molestia, todos los evaluadores valoraban cuatro sonidos siguiendo la metodología descrita en 4.3.2.5 *Definición del test de semántica diferencial*. Otros procesos de medida evaluando las escalas definidas por las parejas de atributos: fuerte – débil, agudo – grave, relajado – estresante y rápido – lento, definidas en el apartado 4.5.2.4.

4.6.3.3. Sujetos participantes

En las 46 sesiones de evaluación subjetiva participaron un total de 14 sujetos. Todos los evaluadores cumplían los criterios de inclusión y exclusión definidos en el apartado 4.3.2.4. *Selección de los evaluadores*.

Los sujetos comprendían edades entre 25 y 55 años y en cuanto al género de los sujetos, participaron 7 hombres y 7 mujeres.

Todos los sujetos realizaron la evaluación subjetiva del nivel de molestia y el test de evaluación mediante semántica diferencial.

Los sujetos podían realizar varias sesiones de evaluación, según su disponibilidad, valorando diferentes sonidos en cada una de las sesiones para evitar que un sonido tuviese dos valoraciones del nivel de molestia del mismo evaluador. Las sesiones realizadas por un mismo evaluador estaban separadas en, al menos, dos días.

4.6.4. Procesado de datos en el estudio completo

El procesado de los datos recogidos en las fases experimentales tenía como fin el cumplimiento de seis de los objetivos del presente estudio. El esquema del procesado realizado se muestra en la figura 4.13.

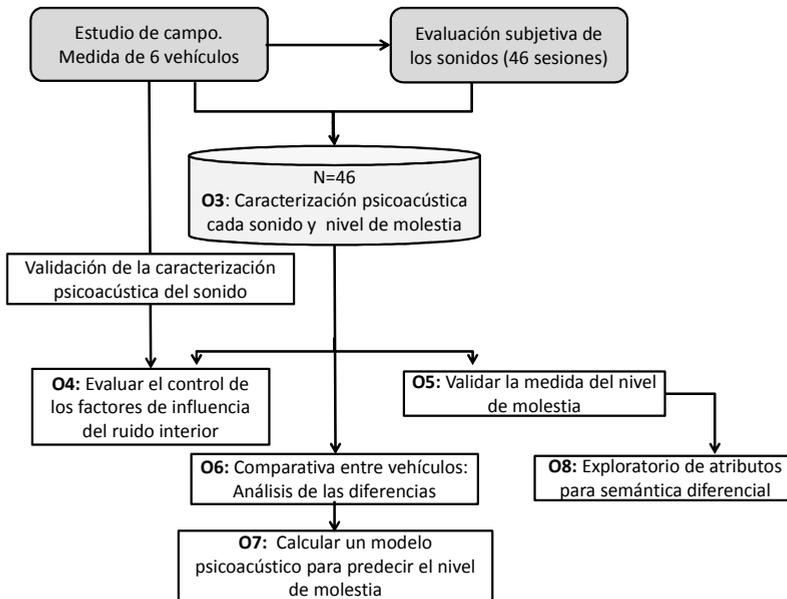


Figura 4.13: Procesado de información del estudio completo

Los datos recogidos de las fases experimentales, en gris en la figura 4.13, fueron procesados para obtener su caracterización psicoacústica validada y nivel de molestia, como se describe a continuación en los apartados 4.6.4.1 y 4.6.4.2 para formar parte de la base de datos de sonidos representativos del estudio, objetivo 3, que contenía la caracterización psicoacústica y el nivel de molestia de cada sonido.

La base de datos fue analizada para el cumplimiento del resto de objetivos del estudio.

En el apartado 4.6.4.3 se describe cómo se realizó el análisis de la evaluación para el control de los factores de influencia del ruido en el interior de los vehículos, objetivo 4.

El análisis realizado para validar la metodología de evaluación de la percepción del nivel de molestia con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados, objetivo 5, se describe en el apartado 4.6.4.4. Además, se incluye el análisis exploratorio de atributos para futuras aplicaciones de la metodología de semántica diferencial, en 4.6.4.4.1.

El cálculo de diferencias que permitió comparar vehículos de alta velocidad en cuanto a su nivel de molestia percibida y la caracterización psicoacústica, objetivo 6, se realizó conforme a lo descrito en el apartado 4.6.4.5.

Por último, mediante el análisis descrito en el apartado 4.6.4.6 se realizó el cálculo de un primer modelo para predecir el nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad a partir de las variables psicoacústicas, objetivo 7, así como el análisis para realizar una primera aproximación a la validación del mismo, descrito en el apartado 4.6.4.6.1.

4.6.4.1. Caracterización psicoacústica de los sonidos de la base de datos y validación

La caracterización psicoacústica de cada uno de los sonidos se realizó según el apartado 4.5.3.2 *Caracterización psicoacústica del sonido* de la definición final de la metodología, calculando las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness*.

Para cada sonido válido de la tabla 4.18, se calcularon dichas variables en función del tiempo (durante los 90 segundos de duración) para cada uno de los micrófonos de la cabeza maniquí y se extrajeron de las señales obtenidas el percentil 5, como estimador del nivel máximo de la variable psicoacústica, el percentil 95 como estimador del nivel mínimo o de fondo y el percentil 50 como estimador del nivel medio. El método de cálculo se mantuvo respecto al estudio piloto.

Para cada variable psicoacústica y percentil se calculó la media entre el micrófono izquierdo y derecho, para reducir el número de indicadores, ya que las correlaciones entre los resultados de los micrófonos izquierdo y derecho fueron consideradas altas para poder utilizar el valor medio como estimador de cada percentil. Tras esta reducción, la caracterización psicoacústica disponible de cada sonido es la mostrada en la tabla 4.19.

Tabla 4.19: Caracterización psicoacústica de cada sonido

Caracterización psicoacústica de cada sonido			
P5 L _A	P5 Loudness	P5 Sharpness	P5 Roughness
P50 L _A	P50 Loudness	P50 Sharpness	P50 Roughness
P95 L _A	P95 Loudness	P95 Sharpness	P95 Roughness

Validación de la caracterización psicoacústica

Para validar la adecuación de las variables seleccionadas a la caracterización psicoacústica de los sonidos del interior del vehículo se realizó un descriptivo estadístico exploratorio de cada una de ellas para conocer sus valores medios, rangos y variabilidad.

Para controlar la adecuación de las variables psicoacústicas seleccionadas como variables independientes del modelo de regresión lineal se exploró el cumplimiento de los supuestos de colinealidad entre variables psicoacústicas y linealidad de las variables con el nivel de molestia. El estadístico utilizado para este control fue el coeficiente de correlación lineal de Pearson.

4.6.4.2. Estimador del nivel de molestia de los sonidos de la base de datos

Para establecer el nivel de molestia de los sonidos validados se calculó la valoración media de cada sonido, a partir de las evaluaciones individuales realizadas por los ocho evaluadores, según el apartado 4.5.3.3 de la definición final de la metodología.

4.6.4.3. Evaluación del control de los factores de influencia en el ruido interior

La distribución final de los puntos de registro en el interior del vehículo se realizó en base a las hipótesis sobre la influencia de los factores que afectan al ruido interior para medir posiciones equivalentes entre vehículos.

Una de las hipótesis de las que se partía era que el sonido medido en el asiento de ventana localizado en un extremo de coche sobre un bogie (Bogie+Ventana) era más desfavorable en su nivel de molestia y con un valor más alto para variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* respecto al asiento de pasillo situado en el centro del coche (Centro+Pasillo). La otra de las hipótesis era que el sonido se veía afectado según la cercanía al coche de cabeza o de cola debido al ruido aerodinámico.

Dichas hipótesis dieron lugar a un diseño experimental para el registro de los vehículos que considera dos factores, COCHE y LOCALIZACIÓN. El factor COCHE es un factor con 4 niveles (1^{er} Coche, 2^{er} Coche, Penúltimo Coche, Último Coche) y el factor LOCALIZACIÓN es un factor con 2 niveles (Bogie+Ventana, Centro+Pasillo).

Para la validación de dichas hipótesis se utilizaron los ANOVA comparativos entre vehículos para la variable nivel de molestia y cada una de las variables psicoacústicas con factores VEHÍCULO, COCHE y LOCALIZACIÓN. El resultado de dichos análisis se amplió mediante un test post-hoc DHS Tukey-b para calcular las diferencias entre los niveles de los factores COCHE y LOCALIZACIÓN. Las diferencias encontradas fueron contrastadas frente a las hipótesis *a priori* de su influencia.

Varianza explicada por los factores de influencia

Adicionalmente se calculó la bondad del modelo de control de los factores de influencia mediante el uso del estadístico coeficiente de determinación, R^2 *corregido*, de los ANOVA realizados.

Este estadístico determinó el porcentaje de variabilidad explicado por los factores de control utilizados en el procedimiento de medida para el nivel de molestia y para cada una de las variables psicoacústicas.

4.6.4.4. Validación de la medida del nivel de molestia

Para la validación de la medida del nivel de molestia se realizaron dos análisis complementarios de manera similar al estudio piloto.

Primero, se realizó un análisis exploratorio mediante un histograma de valoraciones individuales en la escala propuesta del nivel de molestia para conocer las características de la distribución.

El segundo análisis consistió en valorar la fiabilidad de la medida del nivel de molestia.

Para ello, como se detalla en el estudio piloto, en el apartado 4.4.4.5.1, se ha utilizado el estadístico ICC(1,1) de una vía, con una repetición. Este es el más restrictivo al formar parte del error de la medida la variabilidad introducida por el evaluador.

El motivo de esta restricción es que la metodología debe permitir la evaluación en un futuro de nuevos sonidos más allá del presente trabajo, por tanto, no es posible disponer de medidas repetidas.

4.6.4.4.1. Exploratorio de los atributos para su aplicación en semántica diferencial

Se realizó un exploratorio, similar al realizado en el estudio piloto, de los atributos seleccionados para su aplicación en la evaluación mediante semántica diferencial. Se disponía de 176 evaluaciones para cada uno de los cuatro atributos evaluados.

Primero, se exploró la independencia de las valoraciones de los distintos atributos entre sí y respecto a la valoración del nivel de molestia. Para ello se calcularon las correlaciones de todos adjetivos entre sí y con el nivel de molestia, mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Además, se realizó un ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROTADO (VARIMAX), análisis cuyo objetivo es la reducción del número de variables, para identificar los conceptos incorrelacionados que subyacen a la evaluación realizada a través de las cuatro parejas de atributos.

4.6.4.5. Comparativa entre vehículos

El objetivo fue comparar los vehículos que forman parte de la base de datos tanto en su nivel de molestia como en su caracterización psicoacústica.

En concreto, se compararon los vehículos A, B, D, E, F y G. El vehículo D fue descartado para formar parte de esta comparativa al disponer únicamente de dos sonidos de dicho vehículo de los ocho sonidos por vehículo que requería el diseño experimental.

Como se describe en el apartado 4.5.3.4, esta comparativa se realizó mediante cinco análisis ANOVA multifactorial, uno por cada variable a comparar (nivel de molestia y las cuatro variables psicoacústicas) y los siguientes factores:

- Factor VEHÍCULO con seis niveles: A, B, D, E, F y G.
- Factor COCHE con dos niveles: asiento de Bogie+Ventana y asiento de Centro+Pasillo
- LOCALIZACIÓN con cuatro niveles: 1^{er} Coche, 2^o Coche, Penúltimo Coche, Último Coche.

Para el cálculo de las diferencias estadísticamente significativas entre vehículos se realizó un test de contraste post-hoc DHS de Tukey-b (confianza del 95%). El test post-hoc DHS de Tukey-b ha sido seleccionado ya que penaliza las comparaciones múltiples y funciona de manera adecuado cuando se aplica a un diseño experimental equilibrado de los factores (Ruiz-Maya, 1983).

Se seleccionó el percentil 50 como descriptor de variables psicoacústicas ya que debido a la alta correlación (>0,92) entre los percentiles 5, 50, y 95 de cada una de las variables psicoacústicas, que se muestra en apartado 5.3.2. del capítulo 5 *Resultados y discusión*, no se consideró necesario triplicar los análisis comparativos.

4.6.4.6. Obtención de un modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

A partir de la información disponible de los 46 sonidos validados que formaban parte de la base de datos se procedió al cálculo del modelo.

Para la obtención de un modelo de regresión lineal multifactorial se aplicó el procedimiento de cálculo del modelo llamado por pasos (*stepwise*) utilizando como variables independientes potenciales del modelo el percentil 5, 50 y 95 de las variables psicoacústicas (tabla 4.20).

Tabla 4.20: Variables independientes potenciales para el modelo de regresión por pasos del nivel de molestia

Variables			
P5 L_A	P5 Loudness	P5 Sharpness	P5 Roughness
P50 L_A	P50 Loudness	P50 Sharpness	P50 Roughness
P95 L_A	P95 Loudness	P95 Sharpness	P95 Roughness

Mediante el proceso de selección por pasos, el control de las variables que forman parte de la ecuación se realiza en base a una regla de decisión basada en criterios estadísticos. La finalidad perseguida es buscar de entre todas las posibles variables explicativas aquellas que más y mejor expliquen a la variable dependiente sin que ninguna de ellas sea combinación lineal de las restantes.

Una vez obtenido el modelo se realizó una revisión del mismo, para comprobar su validez, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La presencia de puntos de influencia. Los puntos de influencia son aquellos que afectan de forma notable al valor de la ecuación. Su detección es de importancia por si se trata de datos que no siguen la tendencia y fuese necesario corregir el análisis.
- La validación del cumplimiento de los supuestos de la regresión lineal.
- La bondad del ajuste a través del estadístico R^2 corregido.

Al final de este apartado, se detalla la técnica seguida para la detección de los puntos de influencia y validación de los supuestos de la regresión.

En el proceso de obtención del modelo, se obtuvo un primer resultado, que tras la revisión, se detectó que estaba condicionado por un punto de influencia que forzaba a la introducción en el modelo de dos variables independientes fuertemente correlacionadas. Tras la eliminación del caso, se recalculó el modelo, obteniendo un nuevo modelo que no presentaba puntos de influencia y fue validado en cuanto al cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión.

Detección de puntos de influencia

Para su detección, se calculó para cada caso de la base de datos el valor de influencia. Este valor representa una medida de la influencia potencial de cada caso al modelo de regresión. Referido a las variables independientes, es una medida normalizada del distanciamiento de un caso al centro de la distribución. Los puntos muy alejados pueden influir mucho en el modelo pero no tienen por qué hacerlo.

Como regla general los valores no problemáticos son los inferiores a 0,2 y se recomienda evitar los valores de influencia superiores a 0,5 (Pardo, 2001).

Validación del cumplimiento de los supuestos

1. Independencia de los residuos

Se utilizó el estadístico de Durbin y Watson (1951), DW, que proporciona información sobre el grado de independencia que existe entre ellos.

$$DW = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (e_i)^2} \quad (4.5)$$

Siendo los residuos $e_i = y - \hat{y}_i$

El estadístico DW varía entre 0 y 4 tomado el valor 2 cuanto los residuos son independientes. Los valores menores a 2 indican autocorrelación positiva de los residuos y los mayores a 2 negativa. Se asume independencia entre los residuos cuando su valor se encuentra entre 1,5 y 2,5.

2. Homocedasticidad de los residuos

Se evaluó el grado de cumplimiento de la homocedasticidad o igualdad de varianzas comprobando mediante la representación gráfica de los pronósticos tipificados frente a los residuos tipificados que se distribuyen como una nube de puntos, sin existir ninguna pauta de asociación.

3. Normalidad de los residuos

Se evaluó el grado de cumplimiento de la normalidad de los residuos mediante dos representaciones gráficas de su distribución y una prueba estadística:

- En forma de histograma de los residuos tipificados comparando con una distribución normal de media 0 y desviación típica 1. Para que se cumpla normalidad el histograma debe seguir la distribución normal.
- En forma de diagrama de probabilidad normal donde en el eje de abscisas se representa la probabilidad acumulada que corresponde a cada residuo tipificado y en el eje de ordenadas la probabilidad acumulada teórica que pertenece a cada puntuación típica en una curva normal de media 0 y desviación típica 1. Para que se cumpla normalidad los puntos deben alinearse sobre la diagonal del gráfico.

- Adicionalmente, se realizó la prueba estadística de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948; Lilliefors, 1967) sobre los residuos para asegurar la normalidad.

4. *Linealidad de las variables independientes con la variable dependiente*

Para la valoración del cumplimiento de linealidad se representaron los diagramas de dispersión parcial para cada variable independiente del modelo y el nivel de molestia. Estos diagramas varían de los diagramas de dispersión entre el nivel de molestia y las variables psicoacústicas, ya evaluados en los exploratorios, al no estar basados en los valores originales, sino en los residuos obtenidos al hacer una regresión con el resto de variables independientes.

5. *Colinealidad de las variables independientes*

La colinealidad entre las variables independientes de la regresión es un problema que afecta a los residuos y hace que los coeficientes de la regresión no sean estables. Sin embargo no afecta al coeficiente de determinación o bondad del modelo, como en el caso de la linealidad.

En los exploratorios realizados de las variables psicoacústicas se observó que entre ellas existe un elevado grado de correlación lineal, por tanto, este supuesto tiene un riesgo alto que no se cumpla para el modelo obtenido.

Al evaluar la existencia o no de colinealidad, la dificultad estriba en estimar cuál es el grado máximo de relación permisible entre las variables independientes ya que no existe consenso claro en el grado máximo de relación permisible entre éstas.

Al no existir un criterio claro, la valoración de la colinealidad se basó en los siguientes indicios:

- Los coeficientes de correlación entre variables independientes son muy elevados (superiores a 0,9).
- El estadístico F es significativo pero ninguno de los coeficientes lo es.
- Los coeficientes de regresión parcial están inflados tanto en positivo como en negativo adoptando valores fuera del rango entre -1 y +1.
- Existen valores de tolerancia muy pequeños ($<0,01$) que indican que esa variable puede ser explicada por una combinación del resto de variables. El valor de tolerancia es un estadístico que se obtiene restando 1 al coeficiente de determinación (R^2) que resulta al regresar la variable al resto de variables independientes.

4.6.4.6.1. *Aproximación a la validación del modelo*

Para realizar una aproximación a la validación del modelo con los datos disponibles en la base de datos se optó por un método de validación cruzada dejando uno fuera. Este tipo de validación implica separar los datos de forma que para cada iteración tengamos

una sola muestra para los datos de prueba y todo el resto conformando los datos de entrenamiento.

Para el caso de regresión lineal, se analizaron los residuos eliminados de los casos de la muestra, que se definen como el residuo de un caso cuando éste se excluye del cálculo de los coeficientes de regresión.

La evaluación de dicha validación se realizó mediante el cálculo del error típico de la estimación (S_e) calculada a partir de los residuos eliminados según la siguiente ecuación.

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{eli})^2}{n-p-1}} \quad (4.6)$$

Siendo los residuos e_{eli} los residuos eliminados, n el número de casos y p el número de grados de libertad del modelo de regresión.

El error típico calculado es un estimador del error que se cometería si se aplica el modelo calculado para predecir el nivel de molestia de nuevos sonidos que no forman parte de la base de datos utilizada en el cálculo del modelo.

Los valores de los residuos eliminados y el error típico de la estimación dejando uno fuera se compararon con los obtenidos en el modelo calculado con todos los datos para valorar la robustez del mismo.

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1. •Introducción

El presente capítulo contiene los resultados obtenidos en las fases experimentales. Se encuentra dividido en tres partes:

- Los resultados del estudio piloto realizado.
- Los resultados del estudio completo incluyendo el modelo de predicción de molestia.
- La discusión de los resultados en relación a los objetivos planteados.

5.2. Resultados del estudio piloto

5.2.1. Introducción a los resultados del estudio piloto

Los resultados del estudio piloto se presentan siguiendo el mismo esquema que el procesado de datos descrito, incluido en el apartado 4.4.4. *Procesado de datos en el estudio piloto*, incluido en el capítulo 4 *Materiales y Métodos*.

El esquema seguido se representa en la figura 5.1, donde aparecen los resultados derivados del procesado de los datos recogidos en el estudio de campo para la medida del vehículo y de la fase de evaluación subjetiva agrupados por objetivos. En la presentación de los resultados, no se ha considerado necesario incluir un apartado específico para la caracterización psicoacústica ya que los resultados se incluyen en el apartado de validación de la misma.

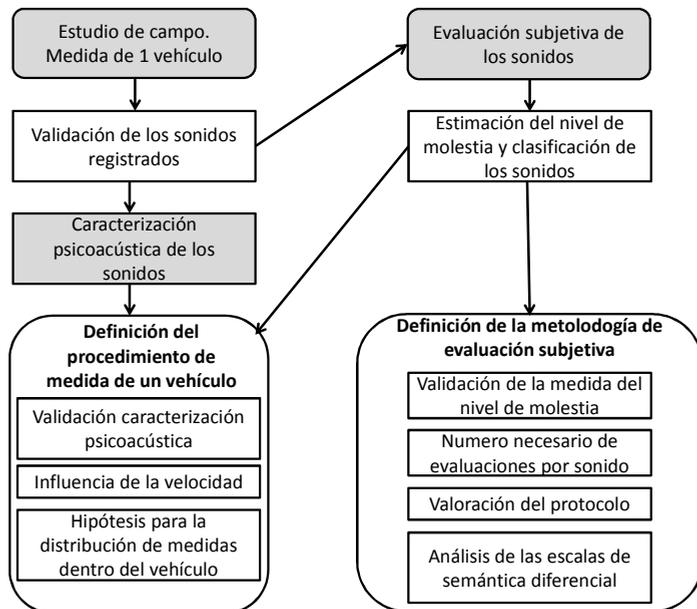


Figura 5.1: Esquema de presentación de los resultados del estudio piloto

Cada una de las cajas con fondo blanco corresponde a cada uno de los apartados que se incluyen a continuación donde se detallan los resultados del estudio piloto.

5.2.2. Validación de los sonidos registrados. Número de sonidos registrados

Para la medida experimental del vehículo del estudio de campo piloto se siguieron las condiciones de medida descritas en el apartado 4.3.1.6.

Dichas condiciones implican el registro de los sonidos con los equipos auxiliares habituales funcionando, las puertas de intercomunicación entre compartimentos cerradas y evitando registrar sonidos cuando el vehículo estuviese circulando por el paso de un evento discreto que afecte al ruido interior. Durante el estudio de campo piloto se lograron registrar un total de dieciocho sonidos.

En cuanto a la velocidad de circulación se registraron sonidos a velocidad comercial y a una velocidad un 20% inferior a la misma, ya que al tratarse de un trayecto en pruebas el vehículo circuló en periodos largos de tiempo a una de esas dos velocidades. Este hecho corresponde a un trayecto comercial donde el vehículo circula a velocidad comercial la mayor parte del trayecto. Además se registraron dos sonidos con el vehículo circulando a baja velocidad, 100 km/h, muy alejadas de la velocidad comercial, por tanto, *a priori*, carecen de validez en el estudio.

Se realizó una revisión posterior en laboratorio de los registros realizados en el vehículo con el objetivo de validar que las condiciones de medida habían sido respetadas, y así, eliminar de la muestra los sonidos registrados que no cumplan con las mismas.

Un total de diez registros fueron descartados al no cumplir las condiciones de medida. Presentaban fuentes de sonido diferentes al objeto principal del estudio tales como pitidos, silbidos o resonancias por tableteo. Por tanto, solo ocho de los registros fueron considerados válidos.

De estos ocho registros, cuatro de ellos fueron registrados a 200 km/h, un 20% por debajo de la velocidad comercial y cuatro a 250 km/h, velocidad objeto del estudio.

Por tanto, aunque se lograron registrar un total de dieciocho sonidos, *a priori*, válidos solo se consideraron como tales ocho de ellos, admitiendo una variación de velocidad del 20% por debajo de la velocidad comercial.

Sin embargo, se introdujo en la muestra uno de los sonidos registrados a 100km/h, velocidad muy inferior a la velocidad comercial, para actuar como sonido de referencia inferior, 0- Nada molesto, por las razones descritas en el apartado 4.4.2.4 *Sonidos validados para su utilización en la fase de evaluación subjetiva*.

5.2.3. Estimador del nivel de molestia de los sonidos validados y clasificación

Para cada uno de los sonidos validados se estimó su nivel de molestia mediante el promedio de las diez evaluaciones obtenidas en la evaluación subjetiva. La tabla 5.1 indica para cada sonido, la velocidad de circulación, la localización del punto de registro y la estimación obtenida del nivel de molestia.

Tabla 5.1: Estimación del nivel de molestia para cada sonido evaluado

Sonido	Velocidad Comercial	Ventana/Pasillo	Centro/Bogie	Distancia del coche a cabeza	Nivel de molestia
3	Sí	Ventana	Bogie	1er coche	8,2
6	Sí	Pasillo	Bogie	1er coche	6,6
7	Sí	Pasillo	Centro	1er coche	7,3
11	20% inferior	Pasillo	Bogie	3er coche	4,5
12	20% inferior	Pasillo	Centro	3er coche	2,6
16	20% inferior	Ventana	Entre bogie y centro	2º coche	4,0
17	20% inferior	Pasillo	Entre bogie y centro	2º coche	4,4

Los sonidos se clasificaron según su nivel de molestia teniendo en cuenta las diferencias estadísticamente significativas. Dicha clasificación se calculó mediante un test ANOVA de variable dependiente NIVEL DE MOLESTIA y factor SONIDO y realizando el test post-hoc DHS Tukey-b para conocer las diferencias entre sonidos.

Este test post-hoc, muestra como resultado los grupos homogéneos de sonidos utilizando las diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Cada uno de los grupos está formado por los sonidos que no presentan diferencias entre sí. Puede ocurrir que un sonido pertenezca a dos de los grupos.

En la figura 5.2 se indica para cada sonido su valor medio de nivel de molestia, adicionalmente, dentro de cada círculo se agrupan aquellos sonidos que no presentan diferencias estadísticamente significativas.

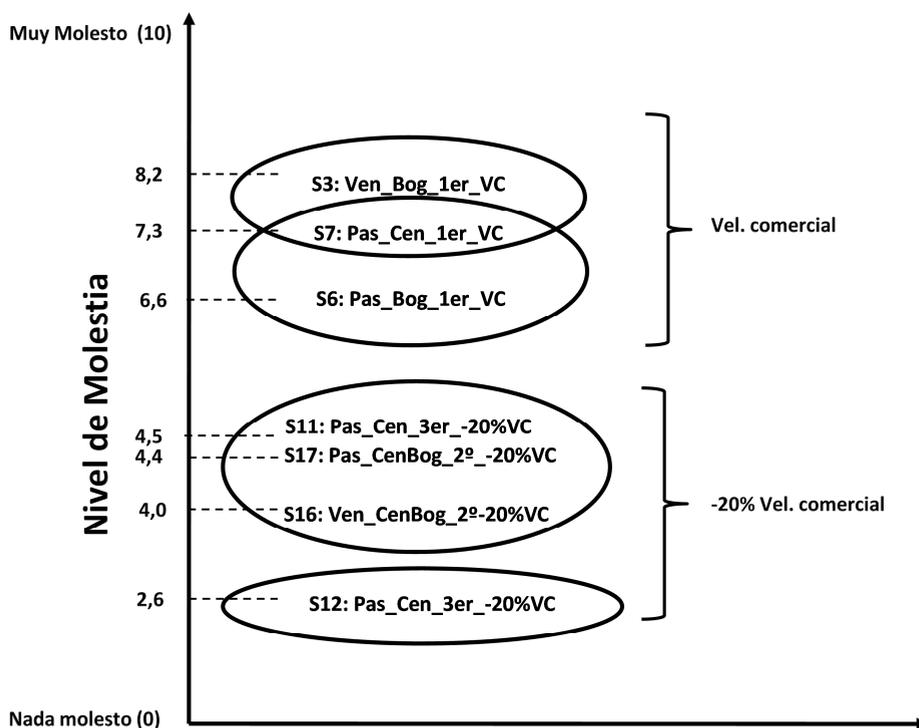


Figura 5.2: Clasificación de los sonidos según su nivel de molestia

Cada sonido está identificado con su número, el factor ventana (Ven) / Pasillo (Pas), el factor de la localización dentro del coche, sobre bogie (Bog) en el centro del coche (Cen) o entre el centro y un bogie (CenBog) y por el factor velocidad de circulación, velocidad comercial (VC) o un 20% inferior (-20%VC).

5.2.4. Resultados para la definición del procedimiento de medida de un vehículo

5.2.4.1. Exploratorio y validación de la caracterización psicoacústica del sonido.

De cada uno de los sonidos validados se calculó su caracterización psicoacústica, tal y como se describe en el apartado 4.4.4.2 *Caracterización psicoacústica de los sonidos validados*.

La tabla 5.2 muestra un descriptivo de una cada de las variables psicoacústicas que forman parte de la caracterización, siendo la muestra los siete sonidos elegidos para ser valorados por los sujetos.

Tabla 5.2: Descriptivo de las variables psicoacústicas de los sonidos validados

	L_A (dB(A))	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Fluctuation (Vacil)	Tonality (tu)
N	7	7	7	7	7	7
M*	68,5	28,6	1,3	2,0	0,1	0,3
DE**	3,4	6,0	0,1	0,3	0,1	0,0
Ran***	8,6	15,9	0,1	0,8	0,2	0,1
Mín	65,1	22,7	1,2	1,6	0,0	0,2
Máx	73,7	38,7	1,4	2,4	0,2	0,3

*Media / ** Desviación estándar / *** Rango

Los valores de nivel de presión sonora ponderado A se encuentran entre 65,1 y 73,7 dB(A) que supone un rango de variación de 8,6 dB(A) que *a priori* es suficiente para que sea percibida dicha variabilidad por parte de los pasajeros.

Los valores *loudness* en la muestra abarcan desde 22,7 a 38,7 sones, obteniéndose un rango de 16 sones. La variación entre los sonidos es *a priori* suficiente para ser percibida por los pasajeros. No obstante, los valores máximos de *loudness* que pueden obtenerse en otros sonidos de naturaleza distinta pueden ser mayores de 100 sones.

Los valores de *sharpness* de los siete registros a evaluar están entre 1,2 y 1,4 acum. La baja variabilidad puede ser debida a que los sonidos fueron registrados en un único vehículo. En sonidos de otra naturaleza los valores de *sharpness* pueden llegar a ser de 4 acum aproximadamente, por tanto, es probable que los sujetos no aprecien diferencias debidas a este parámetro por su baja variabilidad.

Los valores *roughness* en la muestra abarcan desde 1,6 a 2,4 asper, presentando un rango de 0.82 asper. La variación del parámetro en la muestra es *a priori* suficiente para ser percibida por los pasajeros. En sonidos de naturaleza totalmente distinta se pueden encontrar valores máximos de *roughness* mayores a 5 asper.

Los valores obtenidos en el cálculo de *fluctuation strength* son muy cercanos a cero, con una valor máximo de 0,2 vacil, por tanto, podemos afirmar que el sonido interior del

vehículo no presenta cambios del volumen en el tiempo que puedan ser percibidos por los pasajeros. Por este motivo no se incluyó como variable de la caracterización psicoacústica de los sonidos de los vehículos.

Los sonidos tienen una componente tonal inferior a 0,3 tu, por lo que se consideran valores bajos debido a que la señal exhibe un espectro liso. Por otra parte, la variabilidad del parámetro tonalidad en los registros estudiados es también demasiado pequeña para que afecten en los sujetos a la hora de encontrar diferencias entre los sonidos. Por lo tanto, podemos afirmar que los sonidos en el interior del vehículo no son tonales y, por tanto, la variable *tonality* no se incluyó como variable de la caracterización psicoacústica de los sonidos de los vehículos.

Por estos motivos, las variables *fluctuation strength* y *tonality* fueron eliminadas de los análisis posteriores.

A continuación, se exploró el cumplimiento de los supuestos del modelo determinando la colinealidad entre las variables psicoacústicas, así como, su grado de dependencia lineal con el nivel de molestia.

Para determinar la colinealidad entre las diferentes variables psicoacústicas se calculó el grado de correlación lineal, utilizando el coeficiente de correlación paramétrico de Pearson. La tabla 5.3 muestra las correlaciones de Pearson entre el percentil 50 de las diferentes variables.

Tabla 5.3: Correlaciones entre variables psicoacústicas de los sonidos evaluados

	P50 L _A	P 50 Loudness	P50 Sharpness	P50 Roughness
P50 L _A	1	,995(**)	,065	,915(**)
P 50 Loudness	,995(**)	1	,112	,938(**)
P50 Sharpness	,065	,112	1	,264(*)
P50 Roughness	,915(**)	,938(**)	,264(*)	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Las variables *loudness*, *roughness* y nivel de presión sonora ponderado A están fuertemente correlacionadas entre sí. La variable *sharpness* tiene menor dependencia respecto del resto de variables psicoacústicas, pero hay que tener en cuenta su poca variabilidad en los sonidos del piloto.

Para evaluar la linealidad de cada una de las variables psicoacústicas con el nivel de molestia, se utilizó el mismo coeficiente de correlación de Pearson. A continuación, la tabla 5.4 muestra el grado de asociación de cada una de las variables con el nivel de molestia.

Tabla 5.4: Correlación de las variables psicoacústicas con el nivel de molestias

Variable	Nivel de molestia
P50 L_A	,834(**)
P 50 Loudness	,846(**)
P50 Sharpness	,221
P50 Roughness	,855(**)

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

De la tabla anterior se desprende que los parámetros psicoacústicos: *loudness*, *roughness* y nivel de presión sonora ponderado A obtenidos a partir de los sonidos del estudio, presentan un grado de asociación lineal alto con el nivel de molestias. Sin embargo, la variable *sharpness*, no exhibe una correlación significativa.

Tras este análisis descriptivo, se decidió que la caracterización psicoacústica de los sonidos incluyese las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness*, excluyendo a las variables *tonality* y *fluctuation strength* de la caracterización. Pese a que la variable *sharpness* presentaba poca variabilidad en los sonidos registrados se mantiene con la hipótesis de que esta variabilidad aumente cuando aumente la muestra de sonidos incorporando otros vehículos.

Por último, en la tabla 5.5 se muestra la caracterización psicoacústica de cada uno de los sonidos que fueron valorados por los evaluadores.

Tabla 5.5: Caracterización psicoacústica de los sonidos evaluados

Sonido	LA (dB(A))	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)
3,0	73,0	32,8	1,2	2,3
6,0	69,9	27,7	1,2	2,1
7,0	70,0	28,1	1,2	2,1
11,0	66,8	22,7	1,2	1,7
12,0	64,3	19,8	1,1	1,5
16,0	64,3	20,5	1,2	1,8
17,0	64,5	20,7	1,2	1,8

5.2.4.2. Influencia de la disminución de la velocidad comercial

Se realizó un análisis exploratorio para observar las diferencias entre sonidos en función de la velocidad tanto en su caracterización psicoacústica como en el nivel de molestia percibido. No se optó por un análisis estadístico debido a la escasa muestra de sonidos. En concreto, de los sonidos validados, tres fueron registrados con el vehículo circulando a velocidad comercial y cuatro a una velocidad un 20% inferior.

Influencia de la velocidad en la caracterización psicoacústica del sonido

La tabla 5.6 muestra un descriptivo de cada una de las variables psicoacústicas que forman parte de la caracterización, separados por la velocidad de circulación.

Tabla 5.6: Descriptivo de las variables psicoacústicas de los sonidos según la velocidad

		L_A	Loudness	Sharpness	Roughness
		(dB(A))	(Sones)	(Acum)	(Asper)
-20% Vel. comercial	N	4	4	4	4
	M	65,0	20,9	1,2	1,7
	DE	0,6	0,6	0,0	0,1
	Rango	2,5	2,8	0,1	0,3
	Mín	64,3	19,8	1,1	1,5
	Máx	66,8	22,7	1,2	1,8
Vel. comercial	N	3	3	3	3
	M	71,0	29,6	1,2	2,2
	DE	1,0	1,6	0,0	0,1
	Rango	3,0	5,1	0,0	0,2
	Mín	69,9	27,7	1,2	2,1
	Máx	73,0	32,8	1,2	2,3

Como se ha comentado con anterioridad, las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* se encontraban fuertemente correlacionadas. Por tanto, la influencia de la velocidad sobre cada una de estas variables afecta en forma similar al resto de variables, por lo que se comentarán los resultados de las tres variables al mismo tiempo.

En la figura 5.3, figura 5.4 y figura 5.5 se representan para cada sonido, en función de la velocidad de circulación, el percentil 50 de las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*, respectivamente.

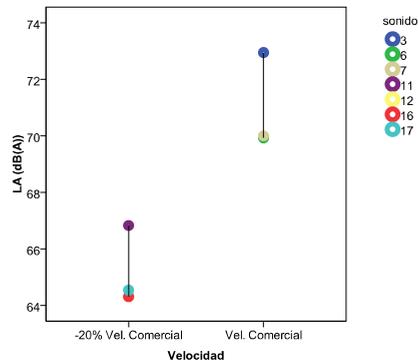


Figura 5.3: P50 nivel de presión sonora en función de la velocidad

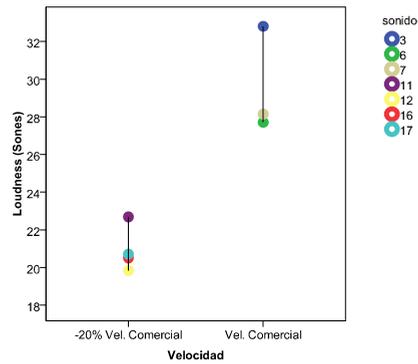


Figura 5.4: P50 Loudness en función de la velocidad

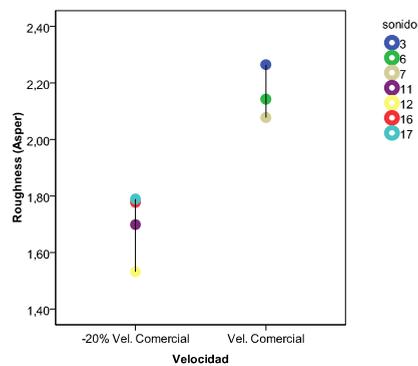


Figura 5.5: P50 Roughness en función de la velocidad

La velocidad de circulación influye en las variables niveles de presión sonora ponderado A, loudness y roughness. Cuando el vehículo circula a velocidad comercial (sonidos 3,

6 y 7) el valor para estas variables es siempre superior que cuando el vehículo circula a una velocidad un 20% inferior (sonido 11, 12, 16 y 17).

El valor de la variable percentil 50 de *sharpness* se representa en la figura 5.6 para cada sonido separado por la velocidad de circulación.

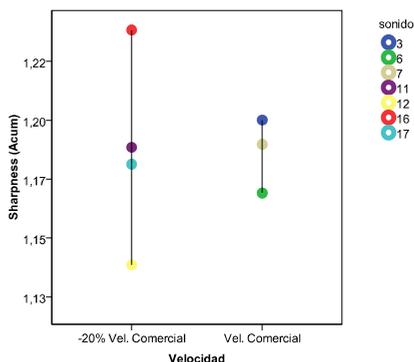


Figura 5.6: P50 *Sharpness* de los sonidos en función de la velocidad

En este gráfico se puede observar que no existe una dependencia de la velocidad en la variable *sharpness* en la muestra de sonidos del piloto, aunque como se ha comentado la variabilidad para esta variable es muy baja.

Influencia de la velocidad en el nivel de molestia

La velocidad tiene influencia en el nivel de molestia de los sonidos como se observa en la clasificación de sonidos representada en la figura 5.2.

Todos los sonidos registrados a velocidad comercial (sonidos 3, 6 y 7) son percibidos más molestos que todos los sonidos registrados a una velocidad un 20% inferior (sonido 11, 12, 16 y 17). Además, las diferencias entre la molestia percibida entre cualquiera de los sonidos registrados a velocidad comercial con respecto a cualquiera de los sonidos a una velocidad un 20% inferior es estadísticamente significativa (figura 5.2).

La puntuación media de los sonidos según si se circula a velocidad comercial o a una velocidad un 20% inferior se muestra en la tabla 5.7, siendo la diferencia de 3,5 puntos en la escala de nivel de molestia.

Tabla 5.7: Media de la estimación de molestia de los sonidos según su velocidad

Velocidad	Nº de sonidos	Nº de evaluaciones	Media
-20% Vel. Comercial	4	40	3,9
Vel. Comercial	3	30	7,3

En cuanto a la magnitud de las diferencias estadísticamente significativas encontradas entre sonidos concretos (figura 5.2), los sonidos a velocidad comercial y una velocidad un 20% inferior se diferencian en su nivel de molestia en al menos 2,1 puntos. Esta diferencia se encuentra entre los sonidos 6, sonido mejor valorado a velocidad comercial y el sonido 11, sonido peor valorado a una velocidad un 20% inferior.

5.2.4.2.1. Elaboración de hipótesis para la distribución de los puntos de registro dentro del vehículo

Para la elaboración de las hipótesis *a priori* se tuvo en cuenta la influencia en la caracterización psicoacústica y el nivel de molestia del factor ventana / pasillo y del factor de localización a lo largo del coche, centro / bogie, mediante la comparativa de parejas de sonidos que presentaban una diferencia en un factor de influencia mientras que el resto permanecía constante. Debido a la reducida muestra de sonidos a comparar no se realizó un análisis estadístico.

En concreto, con los sonidos evaluados se pudieron realizar las siguientes comparativas para valorar la influencia del factor ventana / pasillo. Comparando el sonido 3 frente al 6 y el sonido 16 frente al 17 se puede explorar la influencia factor ventana/pasillo, a velocidad comercial y a una velocidad un 20% inferior, respectivamente, manteniendo fijo el factor centro/bogie y el factor distancia al coche de cabeza.

En la tabla 5.8 se muestran los valores de las variables psicoacústicas y del nivel de molestia para las parejas que se comparan según el factor ventana/pasillo.

Tabla 5.8: Sonidos para explorar la influencia del factor ventana/pasillo

Sonido	LA (dB(A))	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Nivel de molestia
A velocidad comercial, 1^{er} coche y localización sobre bogie					
3 (Ventana)	73,0	32,8	1,2	2,3	8,2
6 (Pasillo)	69,9	27,7	1,2	2,1	6,6
A velocidad un 20% inferior a la velocidad comercial, 2^o coche y localización entre centro y bogie					
16 (Ventana)	64,3	20,5	1,2	1,8	4,0
17 (Pasillo)	64,5	20,7	1,2	1,8	4,4

Para valorar la influencia del factor centro/bogie se realizaron las siguientes comparativas. Comparando el sonido 6 frente al 7 y el sonido 11 frente al 12 se puede explorar la influencia del factor localización a lo largo del coche centro/bogie a velocidad comercial y a una velocidad un 20% inferior, respectivamente, manteniendo fijo el factor ventana/pasillo y el factor distancia al coche de cabeza.

En la tabla 5.9 se muestran los valores de las variables psicoacústicas y del nivel de molestia para las parejas que se comparan según el factor bogie/centro.

Tabla 5.9: Sonidos para explorar la influencia del factor bogie/centro

Sonido	LA (dB(A))	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Nivel de molestia
A velocidad comercial, 1^{er} coche y en asiento de pasillo.					
6 (Bogie)	69,9	27,7	1,2	2,1	6,6
7 (Centro)	70,0	28,1	1,2	2,1	7,3
A velocidad un 20% inferior a la velocidad comercial, 3^{er} coche y en asiento de pasillo					
11 (Bogie)	66,8	22,7	1,2	1,7	4,5
12 (Centro)	64,3	19,8	1,1	1,5	2,6

Influencia de la posición de medida en la caracterización psicoacústica del sonido

Como se ha comentado con anterioridad, las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* se encuentran muy correlacionadas entre sí en los sonidos evaluados en el estudio piloto. Por tanto, la influencia de estos factores sobre una de estas variables afectará en forma similar al resto de variables, por lo que se comentarán las tres variables psicoacústicas al mismo tiempo:

- Influencia del factor ventana/pasillo: A velocidad comercial se produce una diferencia entre las variables nivel de presión sonora ponderada A, *loudness* y *roughness* entre asientos contiguos en el coche 1. En la ventana (sonido 3) los parámetros son superiores que en el pasillo (sonido 6). A una velocidad un 20% inferior, los parámetros dB(A), *loudness* y *roughness*, presentan niveles muy similares entre asientos contiguos de ventana (sonido 16) y pasillo (sonido 17) en el coche 2.
- Influencia del factor centro/bogie: A velocidad comercial, las variables nivel de presión sonora ponderada A, *loudness* y *roughness*, presentan similares niveles entre asientos de la zona central (sonido 7) y de la zona delantera, sobre bogie (sonido 6). A una velocidad un 20% inferior los valores de dB(A), *loudness*, y *roughness*, son inferiores en la zona central (registro 12) que en la zona trasera, sobre bogie (sonido 11) en el coche 3.

Para la variable *sharpness*, debido a su incorrelación con el resto de variables psicoacústicas, se exploró la influencia de la posición de medida de manera independiente, concluyendo con las siguientes observaciones:

- Influencia del factor ventana/pasillo: Tanto a velocidad comercial como a una velocidad un 20% inferior, en el mismo coche y en asientos contiguos no se observan diferencias en los valores de *sharpness* debidas a este factor.
- Influencia del factor centro/bogie: A velocidad comercial, en el mismo coche (coche 1) y en asientos contiguos (registros 6 y 7) no se observan diferencias en los valores de *sharpness* debidas a este factor. A una velocidad un 20% inferior,

en un mismo coche (coche 3) la variable *sharpness* registrada en el centro del coche (registro 12) es ligeramente inferior a la obtenida en un extremo del coche sobre bogie (registro 11).

Influencia de la posición de medida en el nivel de molestia

Para explorar la influencia de la posición de la medida en el nivel de molestia se ha utilizado la clasificación de los sonidos según su nivel de molestia de la figura 5.2, que refleja si los sonidos son percibidos diferentes mediante un test estadístico.

- Influencia del factor ventana/pasillo: A velocidad comercial, en el mismo coche (coche 1), en asientos contiguos, el sonido realizado en el asiento de la ventana (sonido 3) presenta un nivel de molestia más alto que en el asiento del pasillo (sonido 6). A una velocidad un 20% inferior, en un mismo coche (coche 2) no aparecen diferencias en cuanto al nivel de molestia entre asientos contiguos (sonido 16 y 17).
- Influencia del factor centro/bogie: A velocidad comercial no se aprecian diferencias del nivel de molestia según este factor. El nivel de molestia obtenido en la parte central del coche (sonido 7) no es estadísticamente diferente del obtenido en el extremo sobre bogie (sonido 6). A una velocidad un 20% inferior, en un mismo coche (coche 3) el nivel de molestia en el centro del coche (sonido 12) es inferior al obtenido en el extremo del coche sobre bogie (sonido 11).

Hipótesis de la influencia de la posición de medida

De las observaciones realizadas se concluyó con las hipótesis de influencia de la posición de medida en la caracterización psicoacústica del sonido y en el nivel de molestia percibido descritas en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Hipótesis de la influencia de la posición de medida

Variable	Factor de influencia	
	Ventana / pasillo	Centro / bogie
L_A, loudness, y roughness	Débil dependencia. Aumenta en el asiento de ventana frente al de pasillo.	Débil dependencia. Aumenta en los asientos sobre bogie frente a los centrales.
Sharpness	No se observa influencia.	No se observa influencia.
Nivel de molestia	Débil dependencia. Aumenta en el asiento de ventana frente al de pasillo.	Débil dependencia. Aumenta en el asiento sobre bogie frente al central.

5.2.5. Resultados para la definición la metodología de la evaluación subjetiva

5.2.5.1. Validación de la escala para la medida de nivel de molestia

Para el exploratorio y validación de la evaluación del nivel de molestia se utilizaron las valoraciones que realizaron los diez evaluadores de los siete sonidos durante la sesión de evaluación contando con un total de 70 evaluaciones. De aquellos evaluadores que repitieron la sesión en dos ocasiones se han utilizado las valoraciones de la primera sesión, para evitar el efecto de cualquier sesgo al realizar la sesión por segunda vez.

La distribución de los valores de las valoraciones del nivel de molestia en la escala se representa en el histograma de la figura 5.7.

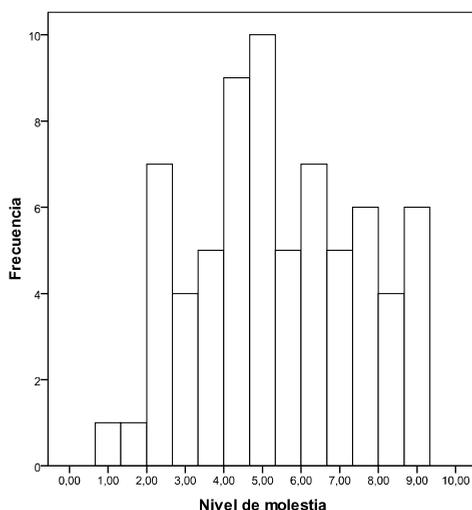


Figura 5.7: Histograma de las valoraciones individuales del nivel de molestia (N=70)

Los valores descriptivos de dicha variable se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11: Estadísticos descriptivos las valoraciones individuales del nivel de molestia

N	M	DE	Rango	Mín	Máy
70	5,3	2,1	8,2	1	9,1

Como podemos observar en la figura 5.7. los evaluadores utilizaron todo el rango de la escala, de 0 a 10 para valorar el nivel de molestia de los sonidos y la media de las valoraciones incluida en la tabla 5.11 es de 5,3 muy próxima a 5 punto central de la escala de medida. Por tanto, las evaluaciones no estaban sesgadas hacia ningún lado de la escala.

Ninguno de los sonidos fue valorado con un nivel de molestia superior a 10 ni inferior a 0, observando el valor mínimo y máximo de las valoraciones en la tabla 5.11, por tanto, la selección de los sonidos de referencia se consideró adecuada para la muestra de sonidos a evaluar.

Para valorar la fiabilidad de la medida se calculó el ICC(1,1). El valor de ICC obtenido utilizando la escala y metodología seleccionada fue de 0,972 para la medida de las estimaciones promedio del nivel de molestia de los sonidos.

No existen reglas universalmente aplicables sobre lo que se considera una fiabilidad pobre, adecuada o buena. En general, valores de ICC por debajo de 0,4 representan baja fiabilidad, valores superiores al 0,75 indican una repetibilidad excelente y valores entre 0,4 y 0,75 pueden ser tomados como adecuados (Fleiss, 1986).

Por tanto, con el valor obtenido de ICC se consideró en el estudio piloto que la metodología propuesta para la medida del nivel de molestia era adecuada.

5.2.5.2. Evaluación de la fiabilidad del evaluador y repetibilidad de la evaluación intrasujeto

Con las evaluaciones obtenidas por los cinco evaluadores que repitieron la evaluación con una diferencia de más de una semana, se ha calculado lo consistente que es un evaluador consigo mismo mediante el índice de correlación lineal paramétrico de Pearson, entre las respuestas de la primera sesión y las respuestas de la segunda sesión de cada evaluador. Además, se calculó para cada uno de estos cinco evaluadores la cercanía de su evaluación en cada una de las sesiones a la evaluación del nivel de molestia de cada sonido, utilizando el índice de correlación lineal paramétrico de Pearson entre las respuestas de cada una de las sesiones y la valoración media de todos los evaluadores.

La tabla 5.12 muestra los coeficientes de correlación calculados para cada uno de los evaluadores.

Tabla 5.12: Coef. correlación de Pearson de las valoraciones de cada evaluador en las diferentes sesiones consigo mismo y con la valoración promedio

Nº	Coef. Correl	Coef. Correl	Coef. Correl
Evaluador	Sesión 1/Sesión 2	Val. media/Sesión 1	Val. Media/Sesión 2
1	0,911**	,970**	,932**
2	0,962**	,962**	,975**
4	0,991**	,858*	,860*
5	0,888**	,961**	,960**
6	0,834*	,753	,928**

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Como se observa en la tabla 5.12, tres de los evaluadores tuvieron correlaciones altas (>0,9) en sus valoraciones entre la primera y la segunda sesión, es decir, fueron muy

consistentes en sus respuestas consigo mismos. Dos evaluadores tenían en la correlación entre sus propias puntuaciones un valor por debajo 0,9. El evaluador 6 fue el menos consistente con un valor de correlación entre sesiones de 0,834.

El evaluador 4, siendo el más consistente con sus propias evaluaciones se alejaba del modelo más que otros evaluadores, presentando coeficientes de correlación en sus valoraciones en la sesión 1 y 2 con la valoración media inferiores a 0,9; 0,858 y 0,860 respectivamente. Por tanto, aunque pueda considerarse fiable desde el punto de vista de la repetibilidad de sus respuestas, variabilidad intrasujeto, su valoración de la molestia se aleja de la percepción de la mayoría de los sujetos.

Para el evaluador 6, el menos consistente consigo mismo, podemos observar que se aleja del modelo solo en la sesión 1, donde obtiene un coeficiente de correlación bajo (0,753) de sus valoraciones con la valoración media. Sin embargo, en la segunda sesión sus respuestas eran consistentes con la media. La falta de fiabilidad de este evaluador viene provocada por la baja fiabilidad de sus respuestas en una de las sesiones, por tanto, parece que no se deriva de un problema propio del evaluador sino una circunstancia que se dio en la primera sesión en cuanto a su estado de ánimo o por falta de interés o concentración.

En resumen, los niveles de correlación eran superiores 0,83 excepto en el caso comentado del evaluador 6 que en una sesión obtuvo 0,753 en su correlación con el resto de evaluadores. Hay que señalar que la variabilidad entre evaluadores está incluida en el cálculo de la fiabilidad del nivel de molestia ($ICC=0,972$), siendo ésta muy fiable.

5.2.5.3. Determinación del número necesario de evaluaciones de cada sonido. Cálculo del tamaño de muestra

A continuación se muestra el cálculo de la potencia de test, con el fin de establecer el número de valoraciones necesarias para cada sonido evaluado.

Para el cálculo de la potencia, se fijó como objetivo que el número de evaluaciones por sonido en la metodología definitiva permitiese encontrar diferencias estadísticamente significativas al menos dos puntos en la escala de molestia, con una probabilidad mínimo del 0,8 (potencia superior al 80%). Se consideró que dos puntos en la escala de molestia era el mínimo suficiente para detectar sonidos percibidos netamente diferentes en su nivel de molestia.

Se calcularon varios supuestos para los cálculos de potencia (Scheffe, 1959) utilizando los datos de la muestra piloto. Para los cálculos se utilizaron las tablas de potencia del test F (E. S. Pearson, Pearson y Hartley, 1954).

Se calculó el número de evaluaciones necesarias para encontrar diferencias estadísticamente significativas entre dos sonidos que se diferencian en dos puntos en su nivel de molestia con una potencia de 0,81 y 0,95 y en un punto con una potencia de 0,81.

La estimación de la dispersión, desviación típica de cada nivel, necesaria para el cálculo, se hizo mediante la raíz cuadrada de la varianza de los residuos del ANOVA con variable dependiente el nivel de molestia y factor sonido, realizado en el apartado

5.2.3 para la clasificación de los sonidos según su nivel de molestia, obteniendo un valor de dispersión de 1,07.

Tabla 5.13: Tabla para el cálculo de la potencia ($\alpha=0,05$)

Potencia ($\alpha=0,05$)	Dispersión σ	D	Φ	J Sujetos	I niveles	γ_1	γ_2
0,81	1,07	1	2,25	24	2	1	46
0,95	1,07	2	2,90	10	2	1	18
0,81	1,07	2	2,25	6	2	1	10

Dónde:

α : nivel de significación crítico

σ : Dispersión. Desviación típica alrededor de la media de cada nivel

D: Nivel de precisión prefijado (mínima diferencia entre medias que se desea detectar, es la precisión del experimento)

J : Numero de observaciones para cada nivel I : Número de niveles del factor (2 sonidos)

γ_1 : Parámetro de las tablas de potencia de Pearson *et al.* (1954) ($\gamma_1 = I - 1$)

γ_2 : Parámetro de las tablas de potencia de Pearson *et al.* (1954) ($\gamma_2 = I*(J-1)$)

Φ : Parámetro de las tablas de potencia de Pearson *et al.* (1954)

($\Phi = (D/\sigma)*RAIZ(J/(2*I))$)

Como se muestra en la tabla 5.13, con seis evaluaciones por sonido sería suficiente para encontrar diferencias de dos puntos en el nivel de molestia con una potencia de test aceptable, superior al 80% y diez evaluaciones por sonido si deseamos aumentar la potencia al 95%. El número de evaluaciones necesarias ascendería considerablemente a veinticuatro, si las diferencias que buscamos son de un punto con una potencia de test superior al 80%.

5.2.5.4. Exploratorio de los atributos para su aplicación en semántica diferencial

5.2.5.4.1. Análisis cuantitativo

Para explorar la independencia de las valoraciones realizadas de los diferentes atributos, se calculó la correlación entre ellas. Además se calculó la correlación con el nivel de molestia para cada uno de ellas. Para el cálculo de las correlaciones se disponía de un total de 54 valoraciones de sonidos según los distintos atributos, resultado del estudio piloto.

Tabla 5.14: Coeficiente de correlación de Pearson entre las escalas semánticas y nivel de molestia (N=54)

	Nivel de molestia	Fuerte / Débil	Áspero / Suave	Agudo / Grave	Relaj. / Estres.	Rápido / Lento
Nivel de molestia	1	-,571**	-,472**	,422**	,440**	,023
Fuerte / Débil	-,571**	1	,612**	-,515**	-,646**	,216
Áspero / Suave	-,472**	,612**	1	-,309*	-,602**	,093
Agudo / Grave	,422**	-,515**	-,309*	1	,204	,100
Relajado / Estresante	,440**	-,646**	-,602**	,204	1	-,116
Rápido / Lento	,023	,216	,093	,100	-,116	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Como muestra la tabla 5.14, las valoraciones en la mayoría de atributos presentan cierto grado de correlación entre sí, a excepción de la escala relajado / estresante que no presenta correlación con la escala agudo / grave y la escala rápido / lento que no presenta correlación con el resto de atributos siendo, por tanto, el más independiente.

Respecto a la correlación con el nivel de molestia, las valoraciones en el atributo fuerte / débil son las más correlacionadas (-0,571), seguida de áspero / suave (- 0,472), relajado / estresante (0,440), y agudo / grave (0,422). Las valoraciones rápido / lento no están correlacionadas con el nivel de molestia.

A continuación, la tabla 5.15 muestra el resultado del ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROTADO (VARIMAX) que agrupa los atributos más correlacionados a la hora de evaluar los sonidos.

Tabla 5.15: Matriz de comunalidades de las componentes principales

	Componente 1 Varianza (41,6%)	Componente 2 Varianza (24,7%)	Componente 3 Varianza (20,9%)
Fuerte / Débil	,718		
Áspero / Suave	,843		
Agudo / Grave		,966	
Relaj. / Estres.	-,908		
Rápido / Lento			,991

Como resumen de la valoración en cinco atributos, aparecen tres componentes independientes y explican un total de 87,2% de la varianza total. La componente formada por fuerte / débil, áspero / suave y relajado / estresante, explica el 41,6% de la varianza, la componente formada únicamente por agudo / grave explica el 24,7% de la varianza y la componente formada por rápido / lento explica el 20,9%.

5.2.5.4.2. Análisis cualitativo

Comprensión de adjetivos utilizados en la evaluación semántica

En la realización de la evaluación de semántica diferencial cinco de los diez evaluadores tuvieron problemas en cuanto al significado de los adjetivos propuestos. En la tabla 5.16 se exponen las dificultades que ha tenido cada uno de los sujetos.

Tabla 5.16: Dificultades indicadas por los evaluadores en la comprensión de las escalas semánticas

Dificultades en la comprensión de los adjetivos	
Evaluador 1	Indicó que consideraba que los adjetivos “relajado”, “suave” y “débil” están relacionados. Indicó que no comprende el significado de “áspero”.
Evaluador 3	Indicó que tenía dificultades en la distinción entre “agudo” y “grave”.
Evaluador 4	Indicó que no entendía bien el significado del adjetivo “áspero”. Indicó que la evaluación de algunos de los sonidos en la escala “relajado – estresante” le resultó difícil. En cuanto a la evaluación de la escala semántica “rápido-lento” indicó que al esperar la escucha de otros sonidos que pudiese considerar más rápidos, evaluó los sonidos más lentos de lo que realmente eran.
Evaluador 5	Indicó que tuvo dificultades al realizar la evaluación de la escala “áspero - suave”, además indicó que esta escala tiene dependencia con la escala “fuerte – débil”.
Evaluador 8	Indicó que no entendía bien el significado del adjetivo “áspero”. El sujeto dice que al no comprenderlo bien lo asocia a ruidos chirriantes

Como resumen de las principales dificultades de comprensión en la evaluación podemos indicar que los atributos con más dificultades en su comprensión han sido: “áspero” (4 sujetos), “suave” (2 sujetos) y “relajado” (2 sujetos).

Descripción libre de los sonidos por parte de los evaluadores

La tabla 5.17 indica los adjetivos o maneras de describir los sonidos que los evaluadores utilizaron libremente.

Tabla 5.17: Descripción libre de cada sonido por parte de los evaluadores

Descripción libre los sonidos por parte de los evaluadores	
Sonido 1	Similar al agua (evaluadores 1 y 2). Lluvia cayendo suave (evaluador 10). Monótono (evaluadores 2, 6 y 10). Suave (evaluadores 1 y 6). Poco molesto (evaluadores 4 y 7).
Sonido 3	Al cabo de un tiempo molestaría (evaluador 6), soportable durante poco tiempo (evaluador 8). Bastante molesto (evaluador 1), molesto (evaluadores 5 y 6).
Sonido 6	Grave (evaluador 1 y 2).
Sonido 7	Molesto (evaluadores 4 y 7). Grave (evaluadores 1 y 2).
Sonido 8	Ruidoso (evaluador 2 y 6). Chispas (evaluadores 1 y 3). Molesto (evaluadores 1 y 6). Ruido de motor (evaluadores 3 y 5), ruido de aparato eléctrico (evaluador 10). Insoportable (evaluadores 8 y 9). Produce dolor de cabeza (evaluadores 6 y 10). Estresante (evaluadores 2 y 10).
Sonido 11	Sin comentarios
Sonido 12	Penetrante (evaluador 2), se hace con el tiempo más molesto (evaluadores 3 y 6). Parecido al registro 11 (evaluadores 1 y 4). Agudo (evaluadores 1, 2 y 4). Suave (evaluadores 1, 2, 5 y 6).
Sonido 16	Los evaluadores distinguen un ruido sobre el ruido de fondo (evaluador 3: chisporroteo, evaluador 6: vibración). Registro que al rato taladra (evaluador 8), taladrar (evaluador 9). Molesto (evaluadores 2 y 6).
Sonido 17	Molestia por ruidos distintos al ruido de fondo (evaluador 3: repiqueteo, evaluador 4: ruiditos molestos y pitido intermitente, evaluador 8: chasquidos de fondo). Grave (evaluadores 1, 2 y 6).

Como resumen de la tabla 5.17 podemos indicar que la mayoría de los adjetivos descritos por los sujetos se encuentran entre los adjetivos utilizados en la escala semántica, son sinónimos o se limitan a describir el sonido en comparación con otro proceso o producto. Por tanto, no se detecta ningún nuevo adjetivo común entre los sujetos que sea distinto a los propuestos en la evaluación por semántica diferencial.

5.2.6. Valoración del protocolo

En este apartado se describen las valoraciones de los evaluadores y sus comentarios en cuanto a los siguientes aspectos referentes a la sesión de evaluación.

Grado de dificultad

De los diez evaluadores que han participado, dos consideraron el grado de dificultad de la evaluación como difícil, mientras que el resto, ocho, la consideraron normal. De estos ocho evaluadores que la consideran de dificultad normal, cinco de ellos matizan que algunos registros son más difíciles de valorar debido a su similitud.

Respecto a la comprensión de las instrucciones de ensayo, ocho de los diez evaluadores de ellos indican que no tienen dificultad en su comprensión. No obstante, los dos evaluadores con mayor edad sí indicaron que tuvieron dificultades con la comprensión de las mismas y se requirió una segunda explicación. Posteriormente cuando se realizó la evaluación no presentaron ningún tipo de dificultad.

En cuanto a las diferencias entre sesiones, solo uno de los cinco evaluadores que repitieron la evaluación consideró que le había resultado más difícil el ensayo en la segunda sesión. El resto indicó que la dificultad era la misma que en la primera sesión.

Número de sonidos a evaluar en cuanto a su nivel de molestia

De los diez evaluadores participantes, cinco de ellos opinan que el número de sonidos evaluados en cuanto a su nivel de molestia es el correcto. Uno de los evaluadores indicó que eran demasiados sonidos a evaluar, este evaluador fue uno de los que indicó que la evaluación era difícil.

En cuanto a la posibilidad de utilizar más o menos registros que los actuales, los cuatro evaluadores restantes indicaron que hubiesen podido clasificar uno o dos sonidos más, siempre y cuando éstos se diferenciaran apreciablemente del resto de sonidos. Tres de los evaluadores, exponen que la utilización de más sonidos no añadiría dificultad, siempre y cuando todos ellos fueran distintos entre sí. El problema radicaría en que algunos de los sonidos fueran sensiblemente iguales, por ello recomiendan utilizar sonidos sensiblemente diferentes.

De los cinco evaluadores que repitieron la sesión, dos consideraron en la primera sesión que el número de registros era correcto, en la segunda sesión opinaron que podrían clasificar más registros.

Duración de la sesión

La duración promedio de la sesión de evaluación completa fue de aproximadamente una hora. La sesión con mayor duración fue de 1 hora y 20 minutos, mientras que la sesión más corta fue de 33 minutos.

No se detectaron diferencias relevantes en la duración de entre la primera y la segunda sesión en aquellos evaluadores que realizaron dos sesiones.

En cuanto a la valoración subjetiva por parte de los evaluadores respecto a la duración, todos los evaluadores indican que la duración es adecuada y no produce cansancio. Uno de los evaluadores opinó que podría aumentarse la duración del ensayo siempre y cuando se realizara un pequeño descanso.

5.3. Resultados del estudio completo

5.3.1. Introducción a los resultados del estudio completo

Los resultados del estudio completo se presentan siguiendo el esquema descrito en el apartado 4.6.4 *Procesado de datos en el estudio completo*, incluido en el capítulo 4 *Materiales y métodos*.

El esquema seguido se representa en la figura 5.8 donde se incluyen los resultados derivados la explotación de los datos de la base datos de sonidos, objetivo 3, recopilados en la fase experimental.

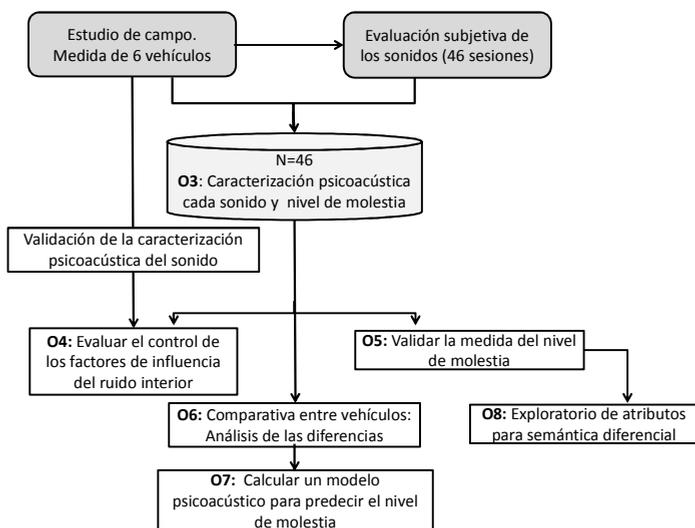


Figura 5.8: Esquema de presentación de los resultados del estudio completo

El primer resultado que se incluye, en el apartado 5.3.2 es un exploratorio y validación de la caracterización psicoacústica realizada de los sonidos de la base de datos.

A partir de dicha validación, se presentan los resultados para el cumplimiento del resto de objetivos del presente estudio.

En el apartado 5.3.3 se presentan los resultados de la evaluación para control de los factores de influencia del ruido en el interior de los vehículos realizado mediante el procedimiento de medida del sonido en el interior de vehículos de alta velocidad, objetivo 4.

La validación de la metodología de evaluación de la percepción del nivel de molestia, objetivo 5, se describe en el apartado 5.3.4. incluyendo los resultados del análisis exploratorio de atributos para futuras aplicaciones de la metodología de semántica diferencial, en 5.3.4.1.

En el apartado 5.3.5, se presenta el resultado de la comparativa de vehículos de alta velocidad en cuanto a su nivel de molestia percibida y la caracterización psicoacústica, objetivo 6.

Por último, en el apartado 5.3.6, se presentan los resultados del cálculo de un primer modelo de predicción del nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad, objetivo 7, así como una primera aproximación a la validación del mismo, descrita en el apartado 5.3.6.1.

5.3.2. Exploratorio y validación de la caracterización psicoacústica del sonido

Para cada sonido válido de la base de datos, se calcularon las variables incluidas en la caracterización psicoacústica, nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness*.

Se calcularon en función del tiempo (durante los 90 segundos) para cada uno de los micrófonos de la cabeza maniquí y se extrajeron de las señales obtenidas el percentil 5, 95 y 50.

A continuación, se calcularon las correlaciones entre los resultados de los micrófonos izquierdo y derecho obteniendo unas correlaciones para los tres percentiles superiores a 0,937 para el nivel de presión sonora ponderado A, superiores a 0,939 para el *loudness*, superiores a 0,851 para el *sharpness* y superiores a 0,920 para el *roughness*, que fueron consideradas altas. En base a este resultado, para cada variable psicoacústica y percentil se calculó la media entre el micrófono izquierdo y derecho, para reducir el número de variables.

Para validar la adecuación de las variables seleccionadas a la caracterización psicoacústica de los sonidos del interior del vehículo se realizó un descriptivo de cada una de ellas, que se muestra en la tabla 5.18, para conocer sus valores medios, rangos y variabilidad en la base de datos.

Tabla 5.18: Descriptivo de la caracterización psicoacústica de los sonidos de la base de datos

	P5 L_A (dB(A))	P50 L_A (dB(A))	P95 L_A (dB(A))	P5 Loudness (Sones)	P50 Loudness (Sones)	P95 Loudness (Sones)
N	46	46	46	46	46	46
M	70,0	68,9	67,9	30,8	27,1	24,1
DE	3,4	3,5	3,5	7,1	6,2	5,6
Ran	15,2	15,3	15,5	31,1	27,7	24,1
Mín	63,0	62,0	61,0	19,2	16,8	14,9
Máx	78,2	77,4	76,4	50,4	44,5	39,1

	P5 Sharpness (Acum)	P50 Sharpness (Acum)	P95 Sharpness (Acum)	P5 Roughness (Vacil)	P50 Roughness (Vacil)	P95 Roughness (Vacil)
N	46	46	46	46	46	46
M	1,5	1,3	1,2	2,4	2,2	2,1
DE	,2	,2	,2	,3	,3	,3
Ran	,7	,6	,5	1,4	1,4	1,3
Mín	1,1	1,0	,9	1,7	1,6	1,5
Máx	1,8	1,6	1,5	3,2	3,0	2,8

Comparando este descriptivo con el realizado con los sonidos utilizados en el estudio piloto, tabla 5.2, se comprobó, para la variable percentil 50, que la media de las variables se mantiene. El rango se vio aumentado en todas las variables, así como el valor máximo y mínimo, siendo un indicador del aumento de variabilidad en las variables psicoacústicas al introducir nuevos sonidos provenientes de diferentes vehículos a la base de datos de sonidos.

Para cada una de variables, se calculó la correlación entre los tres percentiles 5, 50 y 95 obteniendo unas correlaciones superiores a 0,98 para nivel de presión sonora ponderado A, para el *loudness* y para el *roughness*, y superiores a 0,92 para el *sharpness*.

Para controlar la colinealidad entre las diferentes variables se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para el percentil 50, no se incluyeron más percentiles ya que debido a la alta correlación que presentan los percentiles 5, 50 y 95 entre sí, para las cuatro variables, uno de los percentiles ya mostraría la tendencia. En la tabla 5.19 se muestran los coeficientes.

Tabla 5.19: Correlaciones entre variables psicoacústicas de los sonidos de la base de datos (n=46)

	P50 L_A	P50 Loudness	P50 Sharpness	P50 Roughness
P50 L_A	1	,974**	,253	,847**
P 50 Loudness	,974**	1	,388**	,894**
P50 Sharpness	,253	,388**	1	,613**
P50 Roughness	,847**	,894**	,613**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* estaban fuertemente correlacionadas con correlaciones superiores a 0,85. La variable *sharpness*

es la variable que tiene menor dependencia respecto del resto de variables psicoacústicas.

Para controlar la linealidad con el nivel de molestias de cada una de las variables psicoacústicas y los diferentes percentiles que podían formar parte del modelo de regresión se calculó el coeficiente de correlación de Pearson con el nivel de molestias para cada una de ellas que se muestra en la tabla 5.20.

Tabla 5.20: Correlaciones entre el nivel de molestia y las variables psicoacústicas

	L_A	Loudness	Sharpness	Roughness
P5	,817**	,851**	,613**	,887**
P50	,823**	,863**	,653**	,884**
P95	,828**	,868**	,676**	,877**

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

Las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* presentan un grado de asociación lineal elevado con el nivel de molestia, superior al 0,8 para todos los percentiles. La variable *sharpness* es la que presenta una linealidad menor con el nivel de molestia.

5.3.3. Validación de control de los factores de influencia en el ruido interior (distribución de las posiciones de medida dentro del vehículo)

La comprobación de la influencia se realizó mediante los mismos ANOVA de comparativa de vehículos analizando las diferencias encontradas para los factores LOCALIZACIÓN y COCHE en las variables de la caracterización psicoacústica y el nivel de molestia.

Los resultados mostraron que existían diferencias estadísticamente significativas entre los niveles del factor LOCALIZACIÓN en las cuatro variables utilizadas para la caracterización psicoacústica y en el nivel de molestia. La tabla 5.21 muestra las medias marginales resultado del ANOVA para cada nivel del factor así como las magnitudes de las diferencias encontradas.

Tabla 5.21: Medias marginales de los niveles del factor LOCALIZACIÓN y diferencias

Localización	P50 L_A (dB(A))*	P50 <i>Loudness</i> (Sones)*	P50 <i>Sharpness</i> (Acum)*	P50 <i>Roughness</i> (Asper)*	Nivel de molestia*
Media Bogie+Ventana	70,0	29,0	1,4	2,4	6,1
Media Centro+Pasillo	67,3	24,0	1,3	2,1	4,2
Diferencias	2,7	5,0	0,1	0,3	1,9

*Existen diferencias estadísticamente significativas en la variable para este factor

Para el factor COCHE, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las variables nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*. La tabla 5.22 muestra las medias marginales resultado del ANOVA para cada nivel del factor.

Tabla 5.22: Medias marginales de los niveles del factor COCHE

Coche (distancia a la cabeza)	P50 L _A (dB(A))*	P50 Loudness (Sones)*	P50 Sharpness (Acum)	P50 Roughness (Asper)	Nivel de molestia
1er Coche	69,0	27,4	1,3	2,3	5,6
2º Coche	69,8	28,5	1,3	2,3	5,2
Penúltimo Coche	69,0	26,6	1,3	2,2	5,0
Último Coche	66,8**	23,7**	1,4	2,1	4,8

*Existen diferencias estadísticamente significativas para la variable para este factor

** Este coche se diferencia del resto de coches

Para este factor las diferencias encontradas entre niveles del factor son para el nivel de presión sonora ponderado A y *loudness* entre el último coche y resto de coches, presentando el último coche valores inferiores para las dos variables que el resto de coches.

Varianza explicada por los factores de influencia

Se calculó la bondad del modelo de control de los factores de influencia mediante el uso del estadístico coeficiente de determinación, R^2 corregido, de los ANOVA con factor VEHÍCULO, COCHE y LOCALIZACIÓN.

Este estadístico, mostrado en la tabla 5.23, determinó el porcentaje de variabilidad explicado por los factores de control utilizados en el procedimiento de medida para nivel de molestia y para cada una de las variables psicoacústicas.

Tabla 5.23: Varianza explicada por los factores para cada una de las variables analizadas

	P50 L _A (dB(A))*	P50 Loudness (Sones)*	P50 Sharpness (Acum)	P50 Roughness (Asper)	Nivel de molestia
R² corregido (%)	65,7%	59,9%	56,2%	65,4%	70,4%

5.3.4. Validación de la medida de nivel de molestia

Análisis exploratorio de la medida de nivel de molestia

Para conocer las características de la distribución se realizó un análisis exploratorio mediante un histograma de las valoraciones individuales y valoraciones medias por sonido en la escala propuesta del nivel de molestia que se muestra en la figura 5.9.

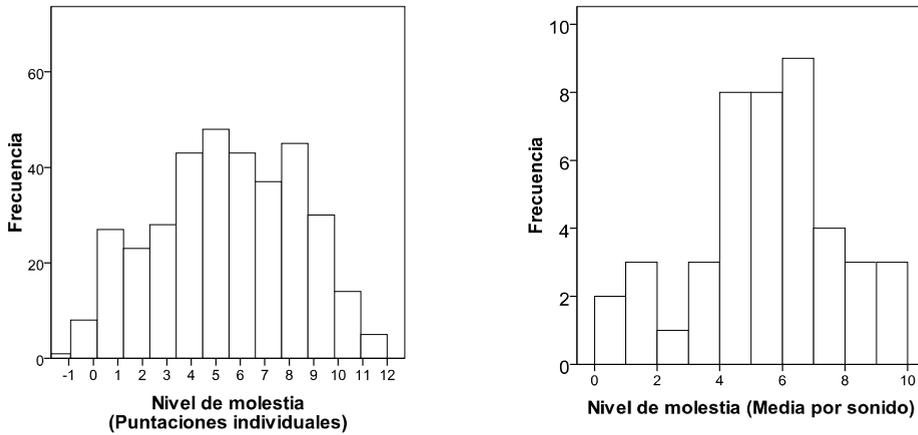


Figura 5.9: Histograma del nivel de molestia (izq) valoraciones individuales N=352 (dcha) valoración media por sonido

Como podemos observar en la figura 5.9 los evaluadores utilizaron todo el rango de la escala, de 0 a 10, para valorar el nivel de molestia de los sonidos y la media de las valoraciones, incluido en la tabla 5.24, es de 5,44 muy próxima a 5 punto central de la escala de medida. Por tanto, al igual que en los resultados del estudio piloto las evaluaciones no estaban sesgadas hacia ningún lado de la escala.

Tabla 5.24: Estadísticos descriptivos de las valoraciones individuales del nivel de molestia

N	M	DE	Rango	Mín	Máx
352	5,4	2,8	12,8	-1,0	11,8

Tabla 5.25: Estadísticos descriptivos de las valoraciones medias por sonido del nivel de molestia

N	M	DE	Rango	Mín	Máx
44	5,4	2,3	9,50	,28	9,8

Al contrario de lo que ocurría en el estudio piloto, en el estudio completo algunos sonidos fueron valorados por algún evaluador con un nivel de molestia superior a 10 e inferior a 0, observando el valor mínimo y máximo de las valoraciones en la tabla 5.24, sin embargo, observando la tabla 5.25 para las puntuaciones medias de los sonidos ningún sonido presentó un nivel de molestia superior fuera de la escala de 0 a 10. En base a estos resultados se comprobó que la selección de los sonidos de referencia fue adecuada para la muestra de sonidos a evaluar.

Fiabilidad de la medida del nivel de molestia

Para valorar la fiabilidad de la medida se calculó el ICC(1,1). El valor de ICC obtenido para la escala y metodología seleccionada fue de 0,930 para la medida promedio del nivel de molestia de los sonidos.

Este valor de ICC sigue siendo considerado alto (Fleiss, 1986), aunque inferior al obtenido en el estudio piloto (0,972).

5.3.4.1. Resultado del exploratorio de las escalas semánticas

Para explorar la independencia de las valoraciones realizadas en los diferentes atributos se calculó la correlación entre ellas. Además se calculó la correlación de dichas valoraciones con el nivel de molestia. Para el cálculo de las correlaciones se disponía de un total de 176 evaluaciones resultado del estudio completo.

Tabla 5.26: Coeficiente de correlación de Pearson entre las escalas semánticas y nivel de molestia (N=176)

	Nivel de molestia	Fuerte / Débil	Agudo / Grave	Relaj. / Estres.	Rápido / Lento
Nivel de molestia	1	-,762**	-,009	,762**	-,328**
Fuerte /Débil	-,762**	1	-,066	-,732**	,390**
Agudo /Grave	-,009	-,066	1	-,125	,014
Relajado /Estresante	,762**	-,732**	-,125	1	-,367**
Rápido /Lento	-,328**	,390**	,014	-,367**	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Como muestra la tabla 5.26 los atributos fuerte / débil y relajado /estresante son los atributos cuyas valoraciones se encuentran más correlacionadas entre sí, con un nivel de correlación de mínimo -0,732. El resto de atributos se encuentran menos correlacionados entre sí, encontrándose agudo / grave incorrelacionado con el resto.

Respecto a la correlación con el nivel de molestia, las valoraciones de los atributos fuerte /débil y relajado /estresante son las más correlacionadas (-0,762 y 0,762, respectivamente). La valoración del atributo rápido / lento está poco correlacionada con el nivel de molestia, con un valor de correlaciones de -0,367 y la valoración de agudo / grave no presenta ninguna correlación con el nivel de molestia.

A continuación, la tabla 5.27 muestra el resultado del ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES ROTADO (VARIMAX) que agrupa los atributos con alta correlación en sus valoraciones.

Tabla 5.27: Matriz de comunalidades de las componentes principales

	Componente 1 Varianza (50,4%)	Componente 2 Varianza (25,6%)	Componente 3 Varianza (17,9%)
Fuerte / Débil	,911		
Agudo / Grave		,996	
Relaj. / Estrés.	-,916		
Rápido / Lento			,997

Como resumen de las cuatro parejas de atributos, aparecen tres componentes principales y explican un total de 93,9% de la varianza. La componente formada por fuerte / débil y relajado / estresante, explica el 50,4% de la varianza, la componente formada únicamente por agudo / grave que explica el 25,6% de la varianza y otra componente formada por rápido / lento que explica el 17,9%.

5.3.5. Comparativa entre vehículos

La comparativa de vehículos se realizó, como se describe en el apartado 4.6.4.5, con resultado del ANOVA multifactorial considerando los factores LOCALIZACIÓN y COCHE para anular su influencia y el factor VEHICULO. Se replicó este análisis por cada una de las variables a comparar, nivel de molestia y las cuatro variables psicoacústicas.

Como resultado del ANOVA se obtuvo que existían diferencias estadísticamente significativas entre los vehículos para las cuatro variables que forman parte de la caracterización psicoacústica y para el nivel de molestia.

Para conocer las diferencias entre vehículos el test post-hoc DHS Tukey-b muestra como resultados los grupos homogéneos de vehículos utilizando las diferencias estadísticamente significativas entre vehículos. Cada uno de los grupos está formado por los vehículos que no presentan diferencias entre sí. Puede ocurrir que un vehículo pertenezca a dos grupos.

Nivel de presión sonora ponderado A

Las diferencias encontradas entre vehículos para el nivel de presión sonora ponderado A (tabla 5.28) fueron un grupo formado únicamente por el vehículo B que es el que presenta menor nivel de presión sonora ponderado A. Le sigue un grupo formado por los vehículos G, F, A y E y con mayor nivel de presión sonora ponderado A aparece un grupo formado por E (que pertenece también al grupo anterior) y D.

Tabla 5.28: Medias marginales y grupos homogéneos según el nivel de presión sonora ponderado A resultado del test post-hoc DHS Tukey-b.

Nivel de presión sonora ponderado A				
Vehículo	Media	Grupo 1	Grupo 2	Grupo3
B	65,0	x		
G	68,0		x	
F	68,1		x	
A	68,5		x	
E	70,3		x	x
D	72,2			x

En la figura 5.10 se representan los grupos de vehículos según su nivel de presión sonora ponderado A.

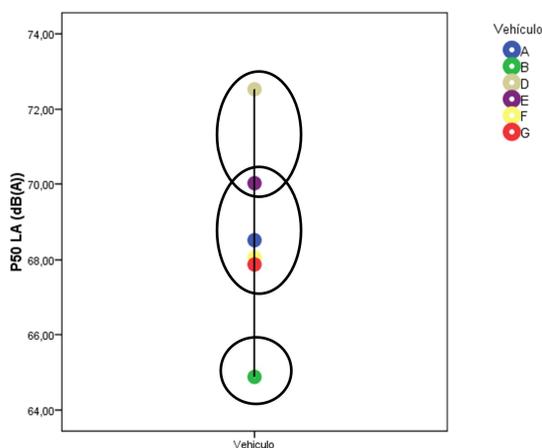


Figura 5.10: Grupos de vehículos según su nivel de presión sonora ponderado A

Loudness

Las diferencias encontradas entre vehículos según la variable *loudness* (tabla 5.29) fue un grupo formado únicamente por el vehículo B es el que presenta menor valor de *loudness*. Le sigue un grupo formado por los vehículos G, F, A y E y con mayor *loudness* aparece un grupo formado por E, A (que pertenecen también al grupo anterior) y D. Los grupos por los vehículos según su *loudness* son muy similares a los formados por el nivel de presión sonora ponderado A, la única diferencia que aparece es en el vehículo A que por su nivel de presión sonora ponderado A pertenece únicamente al grupo intermedio y según el *loudness* pertenece a dos grupos, el intermedio y de mayor *loudness*.

Tabla 5.29: Medias marginales y grupos homogéneos según el *loudness* resultado del test-post-hoc DHS Tukey-b.

Vehículo	Media	Loudness		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo3
B	20,0	x		
G	25,6		x	
F	25,9		x	
A	27,4		x	x
E	29,0		x	x
D	31,9			x

En la figura 5.11 se representan los grupos de vehículos según *loudness*.

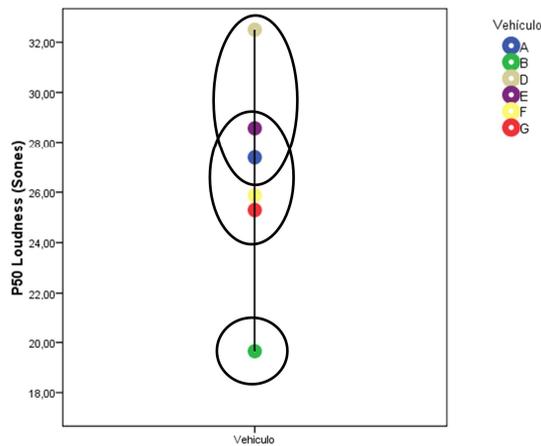


Figura 5.11: Grupos de vehículos según su *loudness*

Sharpness

Las diferencias encontradas entre vehículos según la variable *sharpness* (tabla 5.30) fueron: un grupo formado por los vehículos B y D con menor valor de *sharpness*, le sigue un grupo formado por los vehículos D (que pertenece al grupo anterior), G y E, y por último, con mayor nivel de *sharpness* aparece un grupo formado por G, E (que ambos pertenecen también al grupo anterior), A y F.

Tabla 5.30: Medias marginales y grupos homogéneos según el *sharpness* resultado del test post-hoc DHS Tukey-b

Vehículo	Sharpness			
	Media	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
B	1,1	x		
D	1,2	x	x	
G	1,3		x	x
E	1,4		x	x
A	1,4			x
F	1,5			x

En la figura 5.12 se representan los grupos con su nivel de *sharpness*.

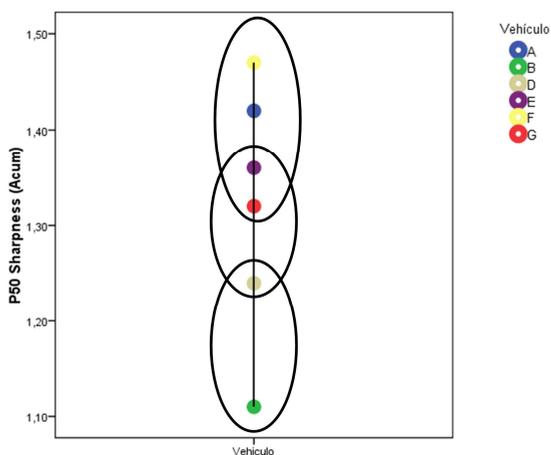


Figura 5.12: Grupos de vehículos según su *sharpness*

Roughness

Las diferencias encontradas entre vehículos según la variable *roughness* (tabla 5.31) son un grupo formado únicamente por el vehículo B con menor *roughness* respecto al otro grupo formado por el resto de vehículos (F, G, A, E, D).

Tabla 5.31: Medias marginales y grupos homogéneos según el *roughness* resultado del test post-hoc DHS Tukey-b

Vehículo	Roughness		
	Media	Grupo 1	Grupo 2
B	1,7	x	
F	2,2		x
G	2,3		x
A	2,4		x
E	2,4		x
D	2,4		x

En la figura 5.13 se representan los grupos según el nivel de *roughness*.

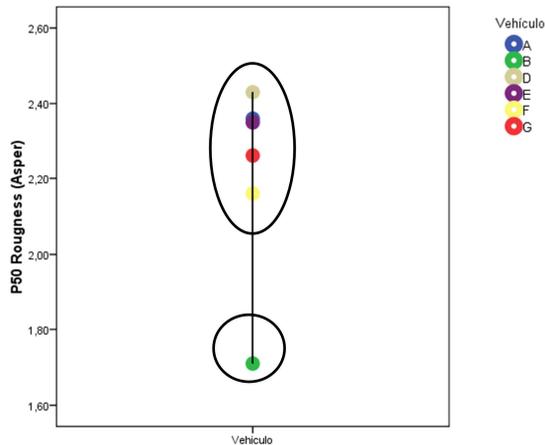


Figura 5.13: Grupos de vehículos según su *roughness*

Nivel de molestia

Como resultado del ANOVA se obtuvo que existían diferencias estadísticamente significativas entre los vehículos para el nivel de molestia.

En la tabla 5.32 se muestran las medias marginales del resultado del ANOVA para cada una de las variables así como los grupos resultado del test post-hoc DHS Tukey-b.

Tabla 5.32: Medias marginales estimadas del nivel de molestia

Vehículo	Nivel de molestia	Grupo 1	Grupo 2	Grupo3
B	1,6	x		
G	4,8		x	
F	5,7		x	x
A	5,9		x	x
D	6,0		x	x
E	7,3			x

Las diferencias encontradas entre vehículos según el nivel de molestia fueron un grupo formado únicamente por el vehículo B, con menor nivel de molestia. Le sigue un grupo formado por los vehículos G, F, A y D y con mayor nivel de molestia y finalmente aparece un grupo formado por F, A, D (que pertenecen también al grupo anterior) y E.

En la figura 5.14 se representan los grupos según su nivel de molestia.

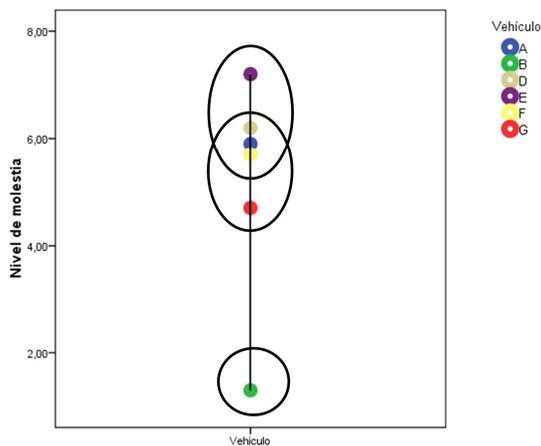


Figura 5.14: Grupos de vehículos según su nivel de molestia

5.3.6. Obtención de un modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

Como se describe en capítulo 4 *Materiales y métodos* para la obtención de un modelo de predicción se calculó un modelo de regresión múltiple por pasos utilizando como variables independientes potenciales del modelo el percentil 5, 50 y 95 de las variables psicoacústicas.

Mediante este método se calculó un primer modelo de regresión que, tras su revisión, se detectó que estaba condicionado por un punto de influencia que forzaba a la introducción en el modelo de dos variables independientes fuertemente correlacionadas.

Como muestra la tabla 5.33 este modelo tenía como variables independientes el percentil 5 del nivel de presión sonora ponderado A, y el percentil 5 y 95 de la variable *sharpness*. En el exploratorio realizado para la validación de la caracterización psicoacústica se determinó que la correlación entre los tres percentiles de la variable *sharpness* era superior a 0,92, por tanto, estas variables están muy correlacionadas entre sí.

Tabla 5.33: Descripción del modelo de regresión rechazado

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados			Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta	t	Sig.	Toleran.	FIV
(Constante)	-40,451	2,341		-17,279	,000		
P5 Sharpness	9,222	1,545	,787	5,970	,000	,118	8,510
P95 L_A	,555	,036	,781	15,354	,000	,788	1,268
P95 Sharpness	-4,335	2,072	-,285	-2,093	,043	,110	9,080

Para este modelo se calculó para cada caso de la base de datos el valor de influencia (figura 5.15) y se detectó que para el sonido 6 este valor era cercano a 0,5, por tanto, un potencial punto de influencia del modelo.

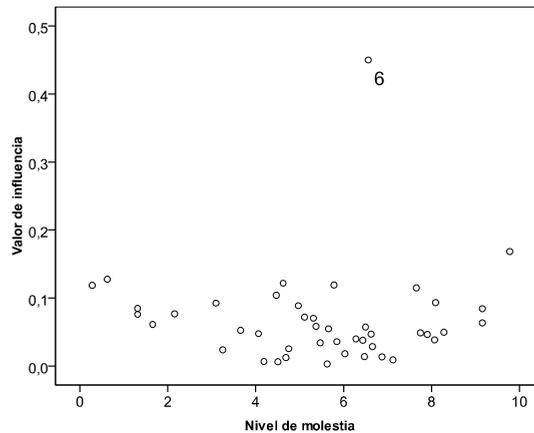


Figura 5.15: Valores de influencia de los sonidos del modelo rechazado

Para comprobar la causa de la influencia, se representó en un diagrama de dispersión las variables percentil 5 y 95 de la variable *sharpness* para ver si este sonido se alejaba de la tendencia general de los datos.

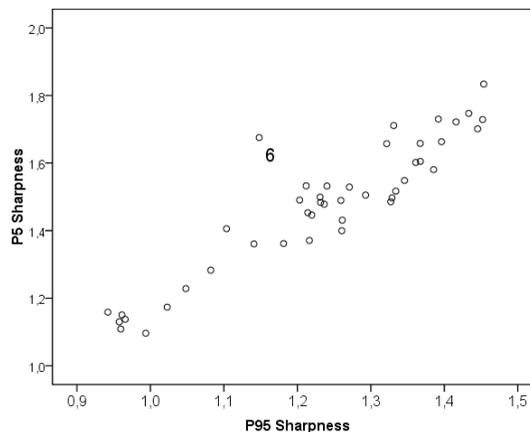


Figura 5.16: Diagrama de dispersión del percentil 5 *sharpness* frente al percentil 95 *sharpness*

En la figura 5.16 se identifica que el punto que representa el sonido 6 presenta un valor anormalmente alto del percentil 5 *sharpness* respecto a su percentil 95. Este hecho condiciona la validez del modelo obtenido y por tanto se decidió repetir el análisis eliminando este sonido de la base de datos para la obtención del modelo.

El modelo finalmente obtenido predice el nivel de molestia a través de las variables el percentil 95 de nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness* para cada sonido.

$$\text{Nivel de molestia} = -39,202 + ,526 \cdot \text{P95 } L_A + 6,066 \cdot \text{P5 Sharpness} \quad (5.1)$$

La descripción de los coeficientes del modelo obtenido eliminando el punto de influencia se muestra en la tabla 5.34.

Tabla 5.34: Descripción del modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados		Estadísticos de colinealidad		
	B	Error típ.	Beta	t	Sig.	Tolerancia	FIV
(Constante)	-39,202	2,317		-16,920	,000		
P5 Sharpness	6,066	,559	,512	10,857	,000	,981	1,019
P95 L_A	,526	,034	,739	15,663	,000	,981	1,019

La bondad del modelo se resume en la tabla 5.35.

Tabla 5.35: Resumen del modelo

R	R2	R2 corregido	Error típico	Durwin-Watson
0,955	0,913	0,908	0,704	1,650

Este modelo de regresión presenta un R^2 de 0,913 y un R^2 *corregido* de 0,908, por tanto, el modelo explica una variabilidad del 90,8% del nivel de molestia a partir del valor de percentil 95 de nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness*. La correlación entre el valor del nivel observado y predicho del nivel de molestia de un sonido es de 0,955 y el error típico de la estimación es de 0,704.

En la figura 5.17 se representa el nivel de molestia valorado por los evaluadores frente al nivel de molestia predicho por el modelo.

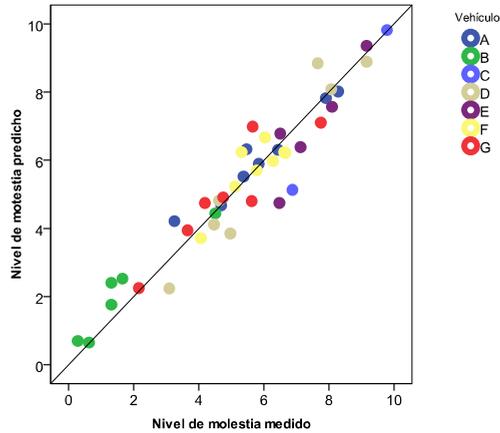


Figura 5.17: Nivel de molestia observado frente al predicho

En la revisión del modelo, cuyos resultados se muestran a continuación, se comprobó la ausencia de puntos de influencia y la validación de los supuestos de la regresión lineal que garantizan la validez del modelo.

Detección de puntos de influencia

Se calcularon, para este modelo, el valor de influencia de cada uno de los sonidos del modelo. Como muestra la figura 5.18, ninguno de los sonidos presentaba un valor de influencia superior a 0,2, nivel por debajo del cual no se considera que los casos sean puntos de influencia. Por tanto, no se detectó un potencial punto de influencia que pudiese estar condicionando el modelo obtenido.

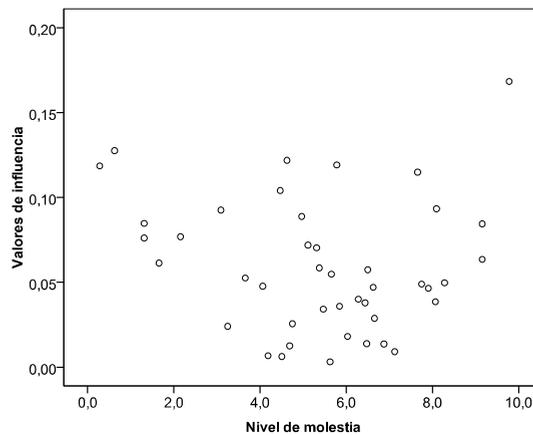


Figura 5.18: Valores de influencia de los sonidos del modelo

Validación del cumplimiento de los supuestos:

1. Independencia de los residuos

Se calculó el estadístico de Durbin-Whatson (1951), incluido en la tabla 5.35, que proporciona información sobre el grado de independencia que existe entre los residuos. El estadístico para el modelo tenía un valor de 1,650, dentro del rango entre 1,5 y 2,5 que asegura la independencia de los residuos.

2. Homocedasticidad de los residuos

Para valorar la homocedasticidad o igualdad de varianzas de los residuos se representó en un diagrama de dispersión, que se muestra en figura 5.19, los pronósticos tipificados frente a los residuos tipificados.

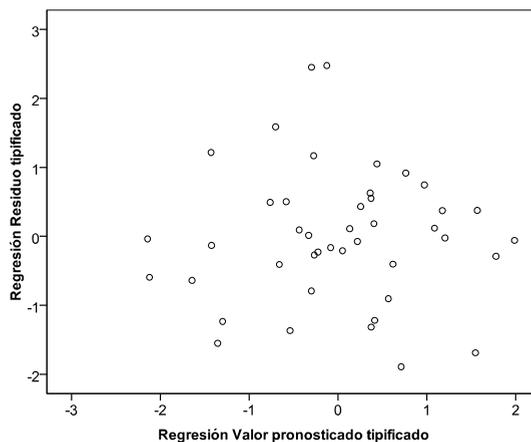


Figura 5.19: Diagrama de dispersión de los valores pronóstico tipificados y los valores tipificados del residuo de la regresión

Como se observa en la representación los puntos distribuyen como una nube sin que exista ninguna pauta de asociación. Adicionalmente se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables, obteniendo una correlación no significativa de 0,000.

Estos resultados comprueban que se cumple la homocedasticidad de los residuos.

3. Normalidad de los residuos

Se evaluó el grado de cumplimiento de la normalidad de los residuos mediante su representación gráfica en forma de histograma de los residuos tipificados comparados con una distribución normal de media 0 y desviación típica 1 (figura 5.20) y en forma de diagrama de probabilidad normal (figura 5.21), en el cual, para que se cumpla normalidad los puntos deben alinearse sobre la diagonal del gráfico.

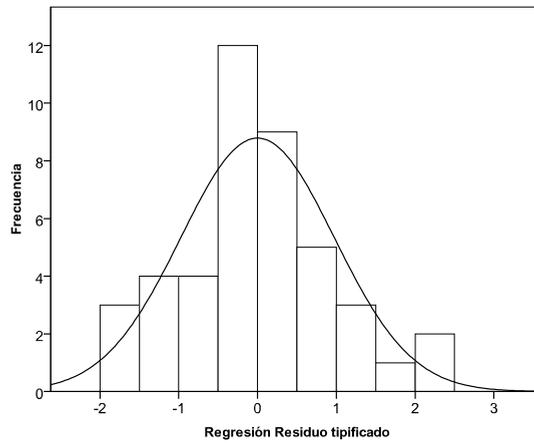


Figura 5.20: Histograma de los residuos tipificados comparando con una distribución normal

La distribución de los residuos se puede considerar que es bastante simétrica respecto del valor medio 0, con una distribución similar a la de la variable normal, sin embargo, presenta más frecuencia en los valores centrales presentando la distribución de registros una forma más apuntada que la distribución normal.

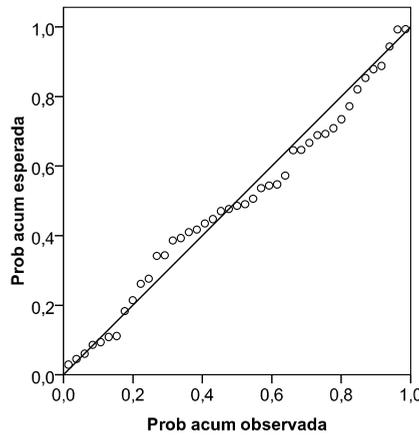


Figura 5.21: Diagrama de probabilidad normal de los residuos tipificados

En el gráfico de probabilidad normal de la figura 5.21 se observa que en general los valores se ajustan a la recta, existiendo ciertas zonas donde los valores se alejan de la misma.

Respecto a la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, los resultados se muestran en la tabla 5.36.

Tabla 5.36: Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Estadístico	gl	Sig.
,082	43	,200*

El nivel de significación del test de normalidad es superior a 0,05, por tanto, la distribución de los residuos no es significativamente diferente a una distribución normal.

Con la observación de los gráficos para valorar la normalidad, figura 5.20 y figura 5.21, y el resultado positivo de la prueba de normalidad de normalidad, tabla 5.36, se asumió la normalidad de los residuos de la regresión.

4. Linealidad de la variables independientes con la variable dependiente

Para la valoración del cumplimiento de linealidad se representaron los diagramas de dispersión parcial de las variables independientes del modelo, el percentil 95 de nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness*. Estos diagramas al estar basados en los residuos obtenidos al hacer una regresión con el resto de variables independientes valoran la linealidad de cada variable eliminado la influencia de la otra variable independiente.

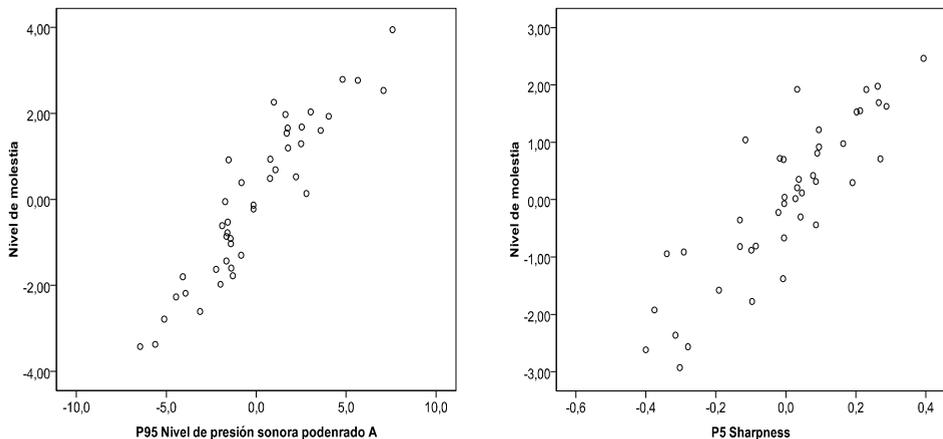


Figura 5.22: Diagramas de dispersión parcial entre el nivel de molestia y los residuos de las variables independientes del modelo

Como se observa en los diagramas de dispersión parcial, la dependencia con el nivel de molestia y los residuos de las dos variables independientes del modelo es claramente lineal y positiva, cumpliendo el supuesto de linealidad del modelo de regresión.

5. Colinealidad de las variables independientes

Como ya se comentó en materiales y métodos, para la colinealidad, no existe consenso claro en el grado máximo de relación permisible entre las variables independientes, por tanto, la valoración se basó en la comprobación de una serie de indicios que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 5.37: Comprobación de los indicios de colinealidad

Indicio de colinealidad	Comprobación
Los coeficientes de correlación entre variables independientes son muy elevados (superiores a 0,9).	Se calculó el coeficiente de correlación entre el percentil 95 de nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable <i>sharpness</i> resultando no significativo. Por tanto podemos afirmar que no existe correlación.
El estadístico F es significativo pero ninguno de los coeficientes lo es.	Los dos coeficientes son significativos (la descripción de los coeficientes del modelo se muestra en la tabla 5.34).
Los coeficientes de regresión parcial están “inflados” tanto en positivo como en negativo adoptando valores fuera del rango entre -1 y +1.	Los coeficientes de regresión parcial son de 0,512 para el percentil 95 de nivel de presión sonora ponderado A y de 0,739 para el percentil 5 de la variable <i>sharpness</i> . Ambos inferiores a 1 (tabla 5.34).
Existen valores de tolerancia muy pequeños (<0,01).	Los valores de tolerancia son de 0,981 (tabla 5.34).

En base a estas comprobaciones se confirmó el cumplimiento del supuesto de no colinealidad de las variables predictoras.

Aunque, en los exploratorios realizados de las variables psicoacústicas se vio que entre ellas existe un grado de correlación lineal muy elevado entre muchas de las variables psicoacústicas, las dos variables que forman parte del modelo no lo están. El percentil 95 del nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness*, no están correlacionadas entre sí. Este hecho simplificó la valoración de la colinealidad ya que no hubo que tomar decisiones del grado de colinealidad que se podía permitir al modelo.

5.3.6.1. Aproximación a la validación del modelo

Para la realización de la validación cruzada se calculó el residuo eliminado, es decir, para un caso cuando éste se excluye del cálculo de los coeficientes de regresión.

En la figura 5.23 se representa para cada caso de manera comparada el residuo eliminado de cada observación frente al residuo del modelo completo donde ese caso ha sido utilizado para el cálculo de los coeficientes.

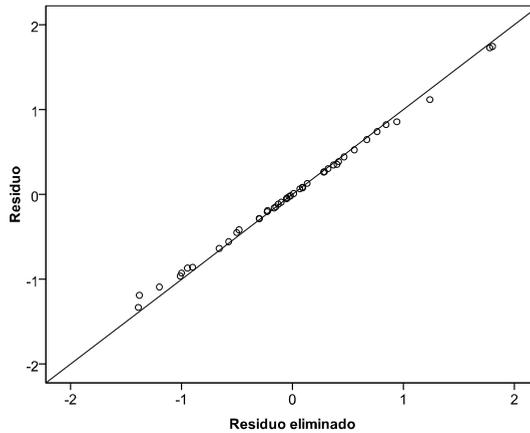


Figura 5.23: Diagrama de dispersión del residuo eliminado y el residuo del modelo completo

Se observa en la figura 5.23 que ambos residuos tiene un valor muy similar al ajustarse los valores de los casos a una recta de pendiente 1.

El error típico de la estimación calculado a partir de los residuos eliminados fue de 0,750.

Para el modelo completo el valor del error típico de la estimación incluido en la tabla 5.35 es de 0,704, ligeramente inferior al obtenido en la validación cruzada.

5.4. Discusión

5.4.1. Procedimiento de medida para la caracterización psicoacústica de los vehículos y control de los factores que afectan al ruido interior

El procedimiento de medida para la caracterización de los vehículos era un objetivo parcial necesario para la obtención del modelo de predicción del nivel de molestia de los pasajeros en condiciones de circulación comerciales, así como para la comparativa de diferentes vehículos ferroviarios de alta velocidad en cuanto a su calidad sonora.

Teniendo en cuenta las condiciones elegidas que establece el uso de sonidos de fondo de vehículos de alta velocidad circulando a su velocidad comercial y la reproducción fiel de los sonidos registrados en el interior del vehículo, en los estudios revisados no se siguen dichas condiciones, siendo necesario el diseño y puesta a punto del procedimiento de medida.

Para su diseño, el primer paso fue acotar la definición de alta velocidad que recoge el Real Decreto 1434/2010, demasiado amplia, para establecer su alcance en el presente trabajo siguiendo las recomendaciones de la UIC (2015).

A continuación, se clasificaron los factores que afectan al ruido del interior de los vehículos para su control a partir de la información recopilada en la revisión bibliográfica.

El control de dichos factores se basó principalmente en las recomendaciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 3381:2011 que especifica las condiciones necesarias para obtener unos resultados reproducibles y comparables para las mediciones de los niveles y espectros de ruido interior de todos los tipos de vehículos que circulan sobre carriles aplicadas a las condiciones experimentales del presente trabajo.

El control de los factores se trasladó al procedimiento de medida estableciendo unas condiciones que determinan en qué contexto han de realizarse las medidas y determinando una distribución de los puntos en el interior.

Las condiciones de medida de cada vehículo buscaban la representatividad de los sonidos registrados. Indican los requisitos que se debían cumplir que aplicaban tanto al vehículo, vía, estado de mantenimiento de ambos, el recorrido, velocidad de circulación para ser considerada velocidad comercial, así como a las condiciones que se debían de dar en interior. De esta manera, se minimizó la influencia de los factores que afectan al ruido de fondo interior, basadas en el definición de ruido de fondo realizada por Poisson, Dubois *et al.* (2011).

En cuanto a la localización de las posiciones a medir dentro del vehículo, la norma UNE-EN ISO 3381:2011 propone unas posiciones de medida y considera de 5 a 7 medidas en cada uno de los coches del vehículo. El número de medidas propuesto por esta norma no era viable debido a las restricciones impuestas del estudio experimental que limita el tiempo disponible en la medición y, en consecuencia, el número de localizaciones que es factible medir.

Por esta razón, en base a las localizaciones propuestas por la norma, se diseñó una experimentación piloto. El objetivo fue establecer hipótesis de la influencia de ciertas posiciones en la calidad sonora, tanto a nivel de percepción de molestia como de las variables psicoacústicas, además de conocer el número de registros que es viable realizar por vehículo en el tiempo disponible. Las hipótesis formuladas en base a los resultados fueron:

- En asientos contiguos el sonido registrado en el asiento de ventana presentaba un nivel de molestia mayor frente al de pasillo, al igual que un mayor nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*.
- En asientos similares localizados en el extremo del coche, sobre un bogie o el centro del coche, aquellos localizados en el extremo presentaban un nivel de molestia mayor frente al localizado en el centro, al igual que un mayor nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*.
- En cuanto a la distancia a la cabeza no se pudo establecer hipótesis en el estudio piloto más allá de las encontradas por bibliografía de la influencia del ruido aerodinámico que indica que en cabeza motora el flujo es laminar, pero debido a la viscosidad, este flujo laminar, rápidamente se convierte en flujo turbulento hasta llegar al coche de cola (Romero, Cerdá, Giménez, Marín, y Sanchis, 2003.).

Estas hipótesis dieron lugar a una distribución de ocho posiciones de medida por vehículo, cuyo objetivo era medir posiciones equivalentes entre vehículos que permitan la comparativa de su calidad sonora.

La distribución establecía la medida dentro del primer coche, segundo coche, último coche y penúltimo coche respecto de la cabeza del vehículo. Esta distribución permite la comparativa entre composiciones equivalentes de vehículos, independientemente del número de coches que compongan cada vehículo.

Dentro de cada coche se estableció medir las localizaciones de los dos puntos, *a priori*, con mayor y menor nivel de molestia que coincide a su vez con mayor y menor nivel de nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness*. Estos asientos corresponden con el asiento de pasillo situado en el centro del coche y con el asiento de ventana situado sobre bogie.

Por tanto, el control de cada sonido registrado del estudio de campo se realizaba mediante la identificación del VEHÍCULO, LOCALIZACIÓN (Ventana+Bogie / Pasillo+Centro) y COCHE (1er coche, 2 coche, último coche y penúltimo).

Tras el estudio de campo se comprobaron las hipótesis establecidas:

Para la LOCALIZACIÓN, se comprobó que el asiento en el centro del coche y de pasillo, sí que era más favorable en cuanto a su nivel de molestia, presentando un nivel de molestia inferior en 1,9 puntos frente al asiento de ventana en el extremo del vehículo sobre el bogie. En cuanto a su caracterización psicoacústica también este asiento presentaba valores inferiores de nivel de presión sonora ponderado A de 2,7dB(A), de *loudness* de 5,0 sones, de *sharpness* de 0,1 acum y de *roughness* de 0,3 asper.

En cuanto a la influencia de la distancia a la cabeza, COCHE, no se encontraron diferencias en cuanto al nivel de molestia en los diferentes coches. Las diferencias encontradas fueron entre el último coche y resto de coches, en el nivel de presión sonora ponderado A y *loudness* presentando el último coche valores inferiores en al menos 2,2 dB(A) y 2,9 sones, respectivamente, frente al resto de coches.

La influencia del vehículo, factor VEHÍCULO, se comprobó, existiendo diferencias entre los vehículos tanto en el nivel de molestia como en sus variables psicoacústicas. Las diferencias encontradas se detallan en el apartado de la discusión 5.4.4 Comparativa entre vehículos.

Para evaluar el control del ruido interior realizado mediante la aplicación del procedimiento de medida se calculó la variabilidad explicada por los tres factores de control VEHÍCULO, LOCALIZACIÓN y COCHE tenidos en cuenta en el diseño experimental.

Para el nivel de molestia estos factores explican el 70,4% de variabilidad, que se considera un porcentaje elevado de varianza explicada, dado la multitud de factores de que influyen en el ruido interior y en su percepción. De la caracterización psicoacústica el diseño experimental explicaba el 65,7% del nivel de presión sonora ponderado A, 59,9% del *loudness*, 56,2% del *sharpness* y 65,4% del *roughness*, valores de variabilidad explicada considerados adecuados.

El diseño experimental realizado no se pudo comparar con el realizado por otros autores por falta de información al respecto en los distintos trabajos revisados.

En cuanto a los valores de la caracterización psicoacústica de los vehículos de alta velocidad, a la hora de comparar los resultados con otros autores, existe la limitación de que las condiciones de medida de los vehículos (velocidad de circulación, ecualización de los sonidos...) son distintas de las condiciones elegidas en el presente estudio por tanto las muestras de sonidos analizadas no son directamente comparables.

Quedó patente en el capítulo de revisión bibliográfica que la velocidad del vehículo tiene una gran influencia en el ruido interior. Su influencia no solo afecta a la percepción, sino a la naturaleza del propio sonido. El espectro del sonido registrado en el interior varía en función de la velocidad, debido a la diferente contribución de las fuentes sonoras del ruido que varían en función de la velocidad y que hacen variar dicho espectro (Choi *et al.*, 2011).

A continuación, se contrastan los principales resultados de la caracterización psicoacústica de los vehículos de alta velocidad en relación a otros trabajos teniendo en cuenta dicha limitación.

Uno de los primeros resultados relevantes del estudio piloto fue la eliminación de las variables *tonality* y *fluctuation strength* de la caracterización psicoacústica. El valor para los sonidos de la muestra era casi nulo, por tanto, estas variables no describían una característica medible para los sonidos de ruido de fondo.

En el estudio de Choi *et al.* (2011) se mide la variable *fluctuation strength*. En el trabajo no se da detalles de los valores adoptados por esta variable, solo indica que para una muestra de seis sonidos dicha variable se encuentra incorrelacionada con el nivel de

molestia y con el nivel de presión sonora, y para otra muestra de ocho sonidos utilizada en su estudio tampoco se correlaciona con el nivel de ruido percibido. Yang *et al.*, 2011, incluye ambas variables en su análisis sin detallar su variabilidad pero son descartadas por su incorrelación con el nivel de molestias, este trabajo tampoco da detalles de los valores adoptados.

De la muestra de sonidos de la base de datos, las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* muestran una alta correlación, superior en todos los casos a 0,85 (tabla 5.19), siendo la variable *sharpness* la más incorrelacionada.

La alta correlación entre nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*, se deja patente en todos los trabajos revisados ya sea de manera cualitativa como calculando un estadístico que demuestre dicha relación.

En la figura 5.24 se representa para los sonidos de la base de datos la relación entre el percentil 50 de dichas variables, ajustándose a la linealidad con un coeficiente de correlación de 0,974 (n=46).

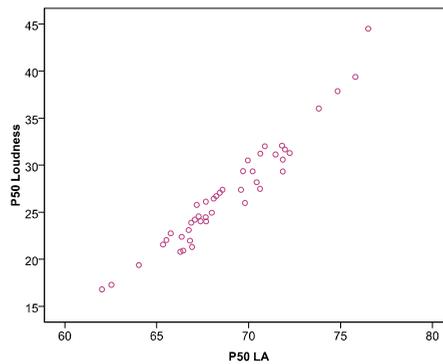


Figura 5.24: Diagrama de dispersión de *loudness* frente al nivel de presión sonora ponderado A de los sonidos de la base de datos (n=46)

Choi *et al.* (2011) cuantificaron la correlación para una muestra de seis sonidos en 0,983, con vehículos a diferentes velocidades. Sin embargo, en la primera parte del mismo trabajo se representa la relación entre *loudness* y nivel de presión sonora ponderado A de dos vehículos diferentes (figura 2.8). La muestra de sonidos representada incluye diferentes velocidades (desde 100 km/h hasta 315km/h), con diferentes vías y paso por túneles. De la representación, los autores concluyeron que el *loudness* del sonido interior aumenta más rápidamente con el aumento de velocidad que el nivel de presión sonora ponderado A.

En la figura 5.25 se representan conjuntamente los sonidos de la base de datos del presente trabajo junto a los medidos en el trabajo de Choi *et al.* (2011)

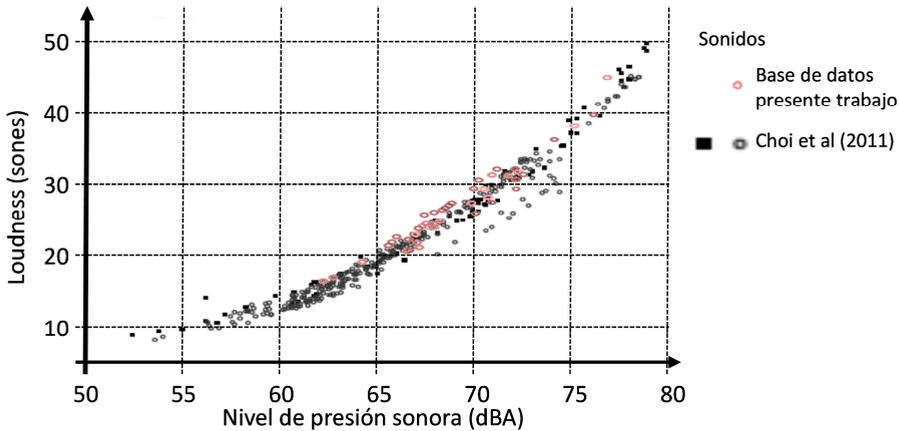


Figura 5.25: Diagrama de dispersión de *loudness* frente al nivel de presión sonora ponderado A de los sonidos de la base de datos del presente trabajo y los sonidos incluidos en el trabajo de Choi *et al.* (2011)

Como se observa en la figura 5.25 la variación de nivel de presión sonora y *loudness* en la base de datos de sonidos del presente trabajo es más acotada frente a la representada por Choi *et al.* (2011). En la base de datos se encuentran sonidos desde 62 dB(A) a unos 77 dB(A) frente a los sonidos de Choi *et al.* (2011) que presentan valores mínimos de 53 dB(A), seguramente debido a las condiciones de medida menos restrictivas.

En cuanto a la relación entre el nivel de presión sonora ponderado A y el *loudness* en la representación de los sonidos de Choi *et al.* (2011) sigue una tendencia más exponencial que los sonidos del presente trabajo, haciendo para los sonidos con mayor nivel de ruido, a partir de 75 dB(A) que las diferencias en *loudness* se amplifiquen frente a las diferencias en nivel de presión sonora ponderado A y al revés para los sonidos por debajo de 60dB (A).

Sin embargo, en la representación de la figura 5.25 los sonidos de nuestra base de datos frente a los de Choi *et al.* (2011) no se muestran como valores anómalos de la distribución. Por tanto, pese a que la relación entre estas dos variables en nuestra base de datos sea más lineal que la representada por Choi *et al.* (2011) parece debido al menor rango de variabilidad de los sonidos impuesto por unas condiciones de medida más restrictivas.

En cuanto a las variables *sharpness* y *roughness* se dispone de pocos datos para comprobar valores o tendencias similares en otros trabajos.

En el mismo trabajo de Choi *et al.* (2011) se calcula para una muestra de seis sonidos la correlación con el nivel de presión sonora ponderado A de ambas variables. Ninguna de ellas aparece correlacionada de manera significativa con el nivel de presión sonora.

Estos resultados coinciden con los encontrados en esta investigación para la variable *sharpness* pero no para el *roughness*. En nuestro estudio, el *roughness* aparece fuertemente correlacionada con el nivel de presión sonora y con el *loudness*, con una

correlación de 0,847 y 0,894 respectivamente. Como se ha comentado la diferente velocidad de circulación y su gran influencia en el espectro de sonidos pueden ser la causa de la diferencia encontrada en los valores de *roughness*.

Choi *et al.* (2011) indica de estos seis sonidos su valor de *sharpness*, así como de otros ocho sonidos utilizados con otro objetivo. Los valores varían entre 1,1 acum y 1,93 acum, similares a los encontrados para los sonidos de base de datos del presente estudio que varían entre 0,9 acum y 1,8 acum. De la variable *roughness* no se aportan valores concretos.

Como conclusión, el procedimiento de medida desarrollado para la caracterización psicoacústica de los vehículos permite un control de los factores que afecta al ruido interior adecuado teniendo en cuenta la multitud de factores y su interrelación. Este procedimiento se adecua a las condiciones experimentales y respeta las condiciones elegidas. Para su diseño fue necesario el establecimiento de hipótesis que fueron validadas una vez recopilados los datos de la experimentación.

Los valores resultado de dicha caracterización psicoacústica son coincidentes en líneas generales con los existentes en la literatura pero se carece de estudios con los que compararse de manera directa. Se hace necesaria una vigilancia de futuros estudios en este ámbito para comparar la caracterización psicoacústica de manera más precisa.

5.4.2. Metodología de evaluación subjetiva del nivel de molestia

La metodología de evaluación subjetiva se definió principalmente mediante la aplicación de los métodos de evaluación disponibles en el estado del arte adaptados a las necesidades concretas del presente estudio.

En la definición de la metodología se abordaron los siguientes aspectos:

- La escala de medida.
- El entorno de escucha y el protocolo de medida.
- Selección de los evaluadores.

Como escala se seleccionó para la evaluación una escala continua, donde 0 era “Nada molesto” y 10 “Muy molesto”, aunque los evaluadores era libres de valorar sonidos fuera del rango de 0 a 10. Para los valores de 0 y 10 se seleccionaban dos sonidos de referencia, respectivamente, para controlar la variabilidad debida al evaluador (Yost; 1996; Shrivastav *et al.*, 2012).

Para la realización de la evaluación se utilizó una sala que cumplía las recomendaciones principalmente recogidas del trabajo de Otto *et al.* (2001) en cuanto a las condiciones de temperatura, humedad, nivel de ruido exterior y aspecto, recreando el interior de un vehículo mediante la utilización de una bancada de vehículo de alta velocidad. Además se instaló frente al evaluador una pizarra magnética para que tuviese siempre visible la escala con las evaluaciones realizadas.

Se utilizó un equipo de reproducción que permite la escucha binaural de los registros, cumpliendo la condición elegida de reproducir fielmente los sonidos registrados.

El protocolo de medida se separó en tres fases. La primera fase era de instrucción, donde se informaba al evaluador en qué consistía la evaluación. Una fase de familiarización, donde se reproducían de manera secuencial los diferentes sonidos durante 90 segundos cada uno y se realizaba la primera evaluación y, por último, la fase de evaluación definitiva donde el evaluador escuchaba de nuevo los sonidos que consideraba necesarios y los comparaba para establecer la evaluación final de los mismos.

La duración de la reproducción de los sonidos y las pausas entre éstos definidas en el protocolo se determinaron en base a las recomendaciones de los estudios revisados, tal y como se indica en *Presentación de los estímulos sonoros y duración* incluido en el apartado 4.3.2.3.2. Hay que destacar que siguiendo la recomendación de Nordtest (2002) que indica que la duración de un sonido debe de ser suficiente para dar una impresión estable del producto o proceso cuyo sonido está siendo evaluado y que raramente es necesario superar los dos minutos de duración, en la fase de familiarización la duración de los sonidos se fijó en 90 segundos de duración. En los trabajos revisados de la duración de los sonidos no superaba los 14 segundos, sin embargo se optó por una exposición larga al sonido para que los evaluadores identifiquen los sonidos que le resulten molestos en el largo plazo. En un vehículo en condiciones reales los pasajeros están expuestos a este sonido durante largos periodos de tiempo.

En cuanto a la selección de los evaluadores, una de las condiciones elegidas era que el nivel de molestia debe ser evaluado por un colectivo de usuarios de tren. Con este fin, se definió un protocolo de inclusión / exclusión con el objetivo de seleccionar usuarios representativos de los pasajeros de este tipo de vehículos y que viajen con una frecuencia determinada en este medio de transporte. Se excluyó como participantes a los profesionales del sector, para evitar sesgos en la evaluación (Otto *et al.*, 2001; Nordtest, 2002), así como a personas con problemas auditivos.

Se realizó un estudio piloto contando con diez evaluadores para la valoración de nueve sonidos y realizar una primera valoración de la fiabilidad de la medida y a su vez recopilar los datos experimentales necesarios para continuar con la definición de la metodología.

Los resultados del piloto indicaron una muy buena fiabilidad de la medida ($ICC(1,1)=0,972$), junto con un uso de la escala y sus referencias adecuado.

El protocolo de evaluación fue valorado de manera positiva por los propios evaluadores en el estudio piloto, concluyendo que la complejidad y la duración de la sesión de evaluación son adecuadas, sin producir cansancio.

Como resultado del estudio piloto, se estableció en seis el número de evaluaciones mínimo por sonido mediante un cálculo de potencia de test. Este número mínimo corresponde al objetivo de discriminar sonidos que se diferencian en 2 puntos en su nivel de molestia con una potencia superior al 80%.

En cuanto a la fiabilidad de los evaluadores, Otto *et al.* (2001) afirmó que es de esperar que el 10% de los evaluadores presenten baja fiabilidad. En el estudio piloto se realizó un experimento para valorar la fiabilidad de los evaluadores en la cual se analizó dicha

fiabilidad desde dos puntos de vista. En primer lugar, se cuantificó la consistencia del evaluador con sus propias evaluaciones realizando dos sesiones de evaluación en momentos diferentes con los mismos sonidos. Al tratarse de un método de evaluación directa era imposible valorar la consistencia del evaluador en una única sesión como realizó Zhang *et al.* (2012) en su estudio con el método de comparaciones por pares. Se cuantificó también la fiabilidad del evaluador respecto al grado de acuerdo de sus evaluaciones individuales respecto a las del conjunto de los evaluadores. Con los resultados extraídos del estudio piloto se valoró que la falta de fiabilidad de los evaluadores no afecta de manera significativa a la fiabilidad de la medida del nivel de molestia, por tanto, no se realizó ninguna acción para controlar dicha fuente de variabilidad.

Revisados estos aspectos en el estudio piloto, la metodología se aplicó en el estudio completo para la valoración del nivel de molestia de los 46 sonidos de la base de datos. Cada uno de estos sonidos fue valorado por ocho evaluadores, superando en dos el mínimo de evaluaciones necesario por sonido. Se realizaron un total de 46 sesiones de individuales de evaluación donde un evaluador valoraban ocho de los sonidos.

El análisis de datos de este estudio permitió validar la metodología desarrollada.

En la validación se comprobó el uso adecuado de la escala y del método para la selección de los sonidos de referencia. Las valoraciones se distribuyeron a lo largo de toda la escala sin que existiera un sesgo hacia ninguno de los extremos (figura 5.9), uno de los problemas identificados por Otto *et al* (2001). Ninguno de los sonidos fue valorado con un nivel de molestia medio fuera de la escala de 0 a 10 (tabla 5.25), validando así la correcta selección de los sonidos de referencia.

Por último, se calculó la fiabilidad de la medida del nivel de molestia mediante el coeficiente de correlación intraclase (ICC) obteniendo un valor de $ICC=0,930$, siendo un valor considerado alto. Como ya se ha comentado, en general, valores de ICC superiores al 0,75 indican una repetibilidad excelente (Fleiss, 1986).

El trabajo de Zhang *et al.* (2012) es el más enfocado a la cuantificación de fiabilidad de la medida subjetiva utilizando el método de comparaciones pareadas para la evaluación subjetiva de vehículos de alta velocidad. Se calcula la efectividad de la evaluación a través de las correlaciones de las valoraciones entre los diferentes evaluadores. La utilización del ICC para valorar la fiabilidad es más completa, tal y como se vio en su definición (ec. 4.4), pues considera tanto el consenso de los evaluadores en la valoración de los sonidos (variabilidad intragrupo) como la variabilidad en las valoraciones medias de los sonidos (variabilidad intergrupo).

En base a los resultados expuestos, se puede concluir que la metodología de evaluación del nivel de molestia es adecuada por su elevada fiabilidad junto con un nivel de dificultad y duración adecuado según la valoración de los propios evaluadores. Hay que destacar que la metodología aplicada permite medir el nivel de molestia para nuevos sonidos representativos de la muestra para una futura ampliación de la base de datos.

Para futuras investigaciones, como complemento a la medida del nivel de molestia, se exploraron las parejas de un atributo y su antónimo más adecuadas para la valoración de sonidos mediante semántica diferencial.

Tras una revisión de los atributos más frecuentemente utilizados se seleccionaron como potenciales parejas fuerte / débil, áspero / suave, relajado / estresante, agudo /grave y rápido / lento, debido a poseen un carácter connotativo o denotativo claro y *a priori* no se consideran sinónimos.

Tras los análisis de la valoración semántica realizada en el estudio piloto y en el estudio completo se seleccionaron las parejas más adecuadas para formar parte de la evaluación semántica. Estas fueron fuerte / débil, agudo /grave y rápido / lento.

La evaluación de áspero / suave fue descartada tras el estudio piloto. Esta pareja de atributos presentaba dificultades para su comprensión por parte de los evaluadores. Además, se comprobó que la valoración de fuerte / débil, áspero / suave y relajado / estresante estaba muy correlacionada, gracias a un análisis de componentes principales realizada con 54 valoraciones semánticas de sonidos.

Por otro lado, mediante un estudio semántico cualitativo realizado en el estudio piloto no se detectó ningún otro atributo susceptible de ser incluido en la evaluación semántica.

En el estudio completo se realizó una evaluación semántica utilizando fuerte / débil, relajado / estresante, agudo /grave y rápido / lento donde se recopilaron un total de 176 valoraciones semánticas de sonidos. Mediante un análisis de componentes principales se corroboró la alta correlación en la evaluación de fuerte / débil y relajado / estresante, concluyendo que solo uno de ellos podría formar parte de un estudio de semántica diferencial aplicado a este tipo de sonido.

5.4.3. Modelo psicoacústico para predecir el nivel de molestia

El modelo de predicción de molestias se calculó a través de la técnica de regresión lineal múltiple. Se seleccionó esta técnica de uso extendido ya que presenta la ventaja de fácil interpretación frente a las redes neuronales y que necesita de menos datos para la obtención de un modelo robusto (Otto *et al.*, 2001). Además, el procedimiento clásico de regresión obtiene mejores resultados que las redes neuronales si se cumplen las condiciones de aplicación (Pitarque *et al.*, 1998). Dichas condiciones de aplicación fueron comprobadas tras la obtención del modelo y, en la medida de lo posible, fueron controladas previamente mediante el exploratorio de los datos de las fases experimentales.

En cuanto a las potenciales variables predictoras para formar parte del modelo se utilizaron las variables más frecuentemente utilizadas por los autores para la búsqueda de indicadores del confort del ruido de fondo en vehículos de alta velocidad: nivel de presión sonora ponderado A (Letouneaux *et al.*, 2000; Pariziet *et al.*, 2002; Bouillet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014), *loudness* (Pariziet *et al.*, 2002; Bouillet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014), *sharpness* (Pariziet *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014) *roughness* (Pariziet *et al.*,

2002; Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014), *fluctuation strength* (Pariziet *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014) y *tonality* (Pariziet *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2014).

Como se concluyó tras la revisión bibliográfica, los modelos previos calculados o los indicadores encontrados por otros autores, carecían de validez externa para las condiciones impuestas para este modelo. La falta de representatividad era debida principalmente a que incluyen sonidos registrados a diferentes velocidades de circulación que no son representativas del trayecto, tienen en cuenta la variabilidad provocada por solo por uno o dos vehículos o modifican artificialmente los sonidos para generar nuevos estímulos a partir de los registros realizados en el interior del vehículo.

Por tanto, los resultados del presente estudio y los estudios anteriores no pueden ser directamente comparables debido a estas diferencias en las condiciones de los sonidos de la muestras.

El modelo predice el nivel de molestia en una escala de 0 a 10 utilizando como variables predictoras el percentil 95 del nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness*. La variabilidad del nivel de molestias explicada por estas dos variables es de 90,8%, calculado a partir del R^2 corregido del modelo de regresión.

$$\text{Nivel de molestia} = -39,202 + 0,526 \cdot P95 L_A + 6,066 \cdot P5 \text{ Sharpness}$$

Mediante una validación cruzada se estimó en 0,750 el error típico de la estimación de molestias de nuevos sonidos representativos de vehículos de alta velocidad.

De estas dos variables el nivel de presión sonora ponderado A tiene más peso en la regresión que la variable *sharpness*, valorado a través de sus coeficientes *Beta tipificados* de la regresión lineal. Tal y como se muestra en la descripción de los coeficientes del modelo (tabla 5.34) este coeficiente tipificado es de 0,739 para el percentil 95 nivel de presión sonora ponderado A y 0,512 para el percentil 5 de *sharpness*.

Este resultado coincide con la totalidad de autores que conceden a nivel de presión sonora ponderado A junto con el *loudness* una alta capacidad de predicción del confort acústico como estimador principal de confort acústico en vehículos (Letouneaux *et al.*, 2000; Pariziet *et al.*, 2002; Bouillet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, Choi *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2014). Como se vio en la revisión bibliográfica, sobre estas dos variables en los trabajos anteriores existía controversia en el valor aportado por el *loudness* frente al nivel de presión sonora ponderado A para este tipo de sonidos.

Hay que tener en cuenta que en los sonidos del presente estudio, la correlación entre las variables *loudness* y nivel de presión sonora ponderado A, en la base de datos del presente estudio era muy elevada (0,974) por tanto, el parámetro *loudness* no está aportando prácticamente información adicional.

Los resultados mostraron que la correlación con el nivel de molestias de la variable *loudness* es ligeramente superior a la del nivel de presión sonora ponderado A, siendo la primera de 0,863 y la segunda de 0,823 (tabla 5.20). Por tanto, la inclusión en el modelo del nivel de presión sonora frente al *loudness* es debido a la complementariedad con el *sharpness* en mejorar capacidad de predicción del modelo y no a la capacidad de predicción del nivel molestia de la propia variable de manera independiente.

Para la comparativa de la correlación obtenida de estas dos variables con el nivel de molestia en la tabla 5.38 se incluyen los valores de correlación obtenidos en estudios anteriores. En dichos estudios se cuantificó la correlación del nivel de presión sonora ponderado A y *loudness* con la calidad sonora medida a través de la molestia, confort o preferencia.

Tabla 5.38: Valores de correlación con la calidad sonora percibida del nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*

Variable	Valores de correlación con la calidad sonora (autor)
Nivel de presión sonora ponderado A	R=-0,98 ; n=8 sonidos. (Pariziet <i>et al.</i> , 2002)
	R= 0,935; n=30 sonidos (Boullet <i>et al.</i> , 2007)
	R= 0,865; n=6 sonidos (Choi <i>et al.</i> , 2011)
	R= -0,457*; n=26 sonidos (Yang <i>et al.</i> , 2014)
Loudness	R= 0,987 n=30 sonidos (Boullet <i>et al.</i> , 2007)
	R= 0,939; n=6 sonidos (Choi <i>et al.</i> , 2011)
	R= -0,485*; n=26 sonidos (Yang <i>et al.</i> , 2014)

*sonidos ecualizados con igual *loudness*

Boullet *et al.* (2007) y Choi *et al.* (2011) obtuvieron una correlación con la calidad sonora ligeramente superior en el *loudness* que el nivel de presión sonora ponderado A. Pariziet *et al.* (2002) encontró una correlación muy elevada en el nivel de presión sonora ponderado A concluyendo que no era necesario la utilización del *loudness*. Las correlaciones obtenidas por Yang *et al.* (2014) no son comparables al tratarse de sonidos ecualizados para igualar su *loudness*.

El trabajo Boullet *et al.* (2007) calcula un modelo de predicción para el nivel de molestia. El modelo predice el logaritmo de la molestia a partir de la variable *loudness*, medida en phons. Este modelo presenta un coeficiente de correlación (R= 0,987; n=30 sonidos) ligeramente superior al obtenido por el modelo resultado del presente trabajo (R=0,955). Boullet *et al.* (2007) consigue una alta predicción del nivel de molestia a partir de una única variable. Teniendo en cuenta que la muestra de sonidos utilizada por Boullet *et al.* (2007) fue registrada a diferentes velocidades (desde 150 km/h a 320 km/h) y que los sonidos fueron ecualizados para atenuar la contribución de la excitación paramétrica, los resultados a partir esta muestra no son directamente comparables con los obtenidos en el presente trabajo.

Sin embargo, hay que destacar que la variable *roughness* en el presente estudio es la variable que presenta mayor correlación, de manera independiente, con el nivel de molestia, 0,887, para el percentil 5 de dicha variable. Para este resultado es importante destacar que para los sonidos de la base de datos, las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* están muy correlacionados, con un valor de correlación de esta última 0,894 con la variable *loudness* y 0,847 con el nivel de presión sonora ponderado A.

En los resultados del estudio piloto la variable *roughness* ya se mostraba como la variable con mayor correlación con el nivel de molestia y su alta correlación con el nivel de presión sonora ponderado A y *loudness* era ya patente.

En el trabajo de Choi *et al.* (2011) la variable *roughness* no muestra correlación con el nivel de presión sonora ponderado A ni con el nivel de molestia. Esta diferencia puede ser debida a que se trata de una correlación realizada con 6 sonidos, con velocidades desde 100 km/h hasta 315 km/h.

La variable *sharpness* aparece en el modelo complementando al nivel de presión sonora ponderado A en la predicción del confort.

En los resultados exploratorios de nuestro trabajo, esta variable también aparece como las menos correlacionada respecto del resto ya que solo presenta una pequeña correlación con la variable *roughness* (0,264) y presenta correlación con el nivel de molestias de 0,676, para la variable percentil 95 que aparece en el modelo.

Esta variable fue apuntada por Choi *et al.* (2011) como predictor secundario del confort, por motivos similares a los encontrados en este trabajo, debido a su correlación con el nivel de molestias (0,755) y falta de correlación respecto al nivel de presión sonora.

En el trabajo de Yang *et al.* (2014) la correlación con el nivel de molestia de esta variable, en los sonidos evaluados mediante una ecualización que iguale el *loudness* de los sonidos, es la más elevada, presentando un valor de correlación de 0,739. En este trabajo no se cuantifica la correlación entre variables psicoacústicas.

Como conclusión, podemos afirmar que se ha obtenido un modelo de predicción del nivel de molestia del ruido percibido por los pasajeros de un vehículo de alta velocidad a partir de variables psicoacústicas en condiciones de circulación comerciales. La capacidad de predicción es alta y utiliza dos variables psicoacústicas como predictoras del confort.

La aplicación de este modelo permitirá estimar el nivel de molestia, con un error controlado, de sonidos de vehículos circulando a alta velocidad sin necesidad de una evaluación subjetiva.

5.4.4. Comparativa entre vehículos

Los resultados del estudio de campo permitieron analizar las diferencias estadísticamente significativas entre los vehículos medidos para cada una de las variables que componen la caracterización psicoacústica y su nivel de molestias y así poder comparar los vehículos entre sí.

Con el diseño del estudio de campo actual, donde cada modelo ha sido medido una sola vez, el factor VEHÍCULO tiene anidados factores que influyen en el ruido interior más allá de los propios del vehículo.

Estos factores son aquellos que dependen del estado de mantenimiento del vehículo, del recorrido y de la vía y su estado de mantenimiento como se muestra en la tabla 4.8.

Dichos factores han sido controlados mediante las condiciones de medida establecidas con el objetivo de que los sonidos registrados sean representativos. Sin embargo, conocer su influencia queda fuera de los objetivos de este estudio.

La variable nivel de presión sonora equivalente A, es la variable psicoacústica que más discrimina entre vehículos. Clasifica los vehículos en tres grupos diferentes y solo uno de los vehículos pertenece a dos de los grupos de manera simultánea. La diferencia máxima entre medias marginales entre vehículos es de 7,2 dB(A), teniendo el vehículo con mayor nivel de presión sonora ponderado A un valor de 72,2 dB(A) y el menor de 65 dB(A). El análisis comparativo detectó vehículos con una diferencia mínima de 3 dB (A), que supone un 19,6 % sobre el rango de variación de esta variable en los sonidos de la base de datos. El vehículo B, es el vehículo con menor nivel de presión sonora ponderado A presentado diferencias estadísticamente significativas con el resto de los vehículos. Los vehículos D y E presentan el mayor nivel para esta variable, el vehículo D posee la máxima diferencia respecto al resto de vehículos fuera de su grupo.

La variable *loudness* ordena a los vehículos en el mismo orden que la variable nivel de presión sonora equivalente A, pero tiene una capacidad de discriminación ligeramente inferior. Separa los vehículos en tres grupos pero en este caso dos vehículos pertenecen a grupo con mayor *loudness* y al grupo intermedios de manera simultánea. La diferencia máxima entre medias marginales entre vehículos es de 11,9 sones, teniendo el vehículo con mayor *loudness* 31,9 sones y el menor 20,0 sones. El análisis comparativo detectó vehículos con una diferencia mínima de 5,6 sones, que supone un 20,2 % sobre el rango de variación de esta variable en los sonidos de la base de datos. El vehículo B, también es el vehículo con menor *loudness* presentando diferencias estadísticamente significativas con el resto de los vehículos y los vehículos D, E y A presentan mayor nivel, siendo el vehículo D el que muestra la máxima diferencia respecto del resto de vehículos fuera de su grupo.

La variable *sharpness* separa a los vehículos en tres grupos pero ningún grupo es independiente del resto, sino que todos los grupos comparten algún vehículo con otro grupo. La ordenación de los vehículos según su *sharpness* no coincide con la ordenación dada por el nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*, sin embargo, el vehículo B, también es el vehículo con menor *sharpness* presentando diferencias estadísticamente significativas con el resto de los vehículos, excepto con el D. Los vehículos con mayor nivel de *sharpness* son los vehículos F, A, E y G, presentando los vehículos F y A diferencias estadísticamente significativas con el resto de vehículos fuera de su grupo. La diferencia máxima significativa entre medias marginales entre vehículos es de 0,4 acum, teniendo el vehículo con mayor *sharpness* 1,1 acum y el menor 1,5 acum. El análisis comparativo detectó vehículos con una diferencia mínima de 0,2 acum, que supone un 25,0 % sobre el rango de variación de esta variable en los sonidos de la base de datos.

La variable *roughness* es la variable que peor discrimina entre los vehículos. Separa los vehículos en dos grupos, uno formado por un único vehículo el B y otro formado por el resto de vehículos. La diferencia máxima entre medias marginales entre vehículos es de 0,7 asper, teniendo el vehículo con mayor *roughness* 1,7 asper y el menor 2,4 asper. El análisis comparativo detectó vehículos con una diferencia mínima de 0,5 asper, que

supone un 35,7% sobre el rango de variación de esta variable en los sonidos de la base de datos. El vehículo B, también es el vehículo con menor *roughness* presentando diferencias estadísticamente significativas con el resto de los vehículos. El vehículo D presenta la mayor diferencia en *roughness* respecto del B.

La variable nivel de molestia divide los vehículos en tres grupos. La diferencia máxima entre medias marginales entre vehículos es de 5,7 en su nivel de molestia, teniendo el vehículo menos molesto 1,6 puntos en la escala y los más molestos 7,3 puntos (escala de 0 a 10). El análisis comparativo detectó vehículos con una diferencia mínima de 2,5 puntos, que supone un 26,3% sobre el rango de variación de esta variable en los sonidos de la base de datos. El vehículo B, aparece como el vehículo con menor nivel de molestia presentando diferencias estadísticamente significativas con el resto de los vehículos. Los vehículos E, D, A y F presentan un mayor nivel de molestia, presentando el vehículo E la máxima diferencia respecto a los vehículos fuera de su grupo. Hay que tener en cuenta que dicho vehículo tuvo que ser registrado con las puertas de intercomunicación de la sala con el vestíbulo abiertas debido a un problema técnico.

El vehículo B, mejor valorado en cuanto a su nivel de molestia, es el que presenta en todas las variables psicoacústicas un nivel menor que el resto de vehículos.

El vehículo E, peor valorado, no presenta un nivel más alto en ninguna de las variables psicoacústicas. El vehículo D, segundo peor valorado, presenta el mayor nivel de presión sonora ponderado A, de *loudness* y de *roughness*. Sin embargo, para la variables *sharpness* presenta el segundo menor valor de los vehículos analizados. El bajo nivel de *sharpness* de este vehículo explica su mejor valoración respecto del vehículo E.

Es necesario destacar que la velocidad comercial de cada vehículo variaba entre un mínimo de 250 km/h y un máximo de 350km/h, sin embargo, las diferencias encontradas en las variables psicoacústicas y en el nivel de molestias entre vehículos no son atribuibles a las variaciones de velocidad comercial de los mismos.

Mediante estos resultados se ha validado la viabilidad de la comparativa entre vehículos mediante la aplicación del procedimiento de medida definido que posee un claro interés industrial. Este hecho, permitirá en futuras investigaciones comprobar hipótesis que afecten al vehículo completo. Tal y como se describirá el apartado 6.4 *Futuras líneas de trabajo* aislar la influencia del diseño del vehículo del resto de factores anidados en el diseño experimental actual podrían abordarse con nuevo estudio de campo con un diseño experimental adecuado. La investigación sobre la influencia de elementos de diseño del vehículo en la calidad sonora es la base para la generación de criterios de diseño para nuevo material rodante que mejore el confort acústico percibido por los pasajeros.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Introducción

En lo que sigue se presentan de forma ordenada las conclusiones que se extraen de esta tesis. Dado que el trabajo incluye aspectos metodológicos, se ha añadido un apartado sobre las conclusiones extraídas referentes a la metodología.

Así mismo, se incluye un apartado final en el que se plantean futuras líneas de trabajo derivadas de los resultados alcanzados.

6.2. Conclusiones

1. Las variables psicoacústicas nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness* caracterizan de manera adecuada la variabilidad del ruido de fondo de los vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial. Las variables *tonality* y *fluctuation strength* fueron descartadas de la caracterización debido a que presentaba valores casi nulos. Las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* presentan entre sí una alta correlación.
2. Se ha constatado que existe una relación significativa entre las variables psicoacústicas y el nivel de molestia. Las variables nivel de presión sonora ponderado A, *loudness* y *roughness* presentan mayor grado de relación con el nivel de molestias que la variable *sharpness*.
3. Se ha obtenido un modelo de predicción de molestia a partir de las variables el percentil 95 del nivel de presión sonora ponderado A y el percentil 5 de la variable *sharpness*. El modelo presenta una capacidad de predicción del 90,8%.
4. La predicción del nivel de molestia realizada con este el modelo de nuevos ruidos de fondo representativos no incluidos en la muestra actual se ha estimado en 0,750 error típico de la estimación.
5. La aplicación de la metodología de medida del vehículo y del nivel de molestia ha permitido comparar los vehículos en cuanto a su nivel de molestia y caracterización psicoacústica. Las variables nivel de presión sonora y *loudness* son las que poseen mayor capacidad de discriminación entre los diferentes vehículos. Hay que destacar que los vehículos llevan anidados otros factores de influencia en el ruido asociados al trayecto y al estado de mantenimiento.

6.3. Conclusiones sobre la metodología

6. Los sonidos registrados son representativos del ruido de fondo de vehículos de alta velocidad circulando a velocidad comercial. La aplicación de las condiciones de medidas incluidas en el procedimiento de medida para la caracterización acústica de los vehículos aseguran su representatividad.
7. El procedimiento de medida desarrollado para la caracterización acústica permite la comparativa entre diferentes vehículos de alta velocidad mediante la medida de posiciones equivalentes entre vehículos.

8. Dentro de un coche, el ruido de fondo que se escucha en el asiento situado en el centro del coche junto al pasillo provoca un mayor nivel de molestia que el asiento situado en un extremo del coche sobre un bogie junto a la ventana. El menor nivel de molestia de esta posición viene acompañado de un menor nivel de presión sonora ponderado A, *loudness*, *sharpness* y *roughness*.
9. La distancia del coche a la cabeza tractora no influye en el nivel de molestia de los pasajeros. Sin embargo, sí que influye en las variables nivel de presión sonora ponderado A y *loudness*. El ruido de fondo registrado en el interior del último coche presenta un menor nivel que el resto de los coches para ambas variables.
10. La metodología desarrollada para la medida subjetiva del nivel de molestia presenta una alta fiabilidad y permite la medida del nivel de molestia de nuevos sonidos comparable con los sonidos de la base de datos, lo cual posibilita la ampliación de la misma.
11. Para una valoración del ruido de fondo de los vehículos que complemente la medida del nivel de molestias a través de la aplicación de la semántica diferencial se considera adecuada la utilización de los atributos fuerte / débil, agudo /grave y rápido / lento, debido a la independencia en su valoración.

6.4. Futuras líneas de trabajo

Como se ha expuesto a lo largo del presente trabajo, el objetivo principal era realizar una aproximación metodológica a la obtención de un modelo psicoacústico que permitiera predecir el nivel de molestias de los pasajeros en condiciones de circulación comerciales, así como realizar una comparativa de diferentes vehículos ferroviarios de alta velocidad en cuanto a su calidad sonora.

Una vez alcanzado dicho objetivo, la metodología y herramientas desarrolladas suponen las bases para, en un futuro, poder utilizarlas con diferentes objetivos que permitan avanzar en el conocimiento de la calidad sonora para este tipo de vehículos.

Ejemplo de ello es la aplicación de la metodología propuesta realizada para cálculo de un modelo de predicción del nivel de molestias para el ruido de fondo de la zona de los vestíbulos en vehículos de alta velocidad.

Como continuación al presente trabajo se propone una validación del modelo calculado. Para ello, es necesario realizar un nuevo estudio de campo para obtener una nueva muestra de sonidos representativos de vehículos de alta velocidad con la que comprobar la capacidad de predicción del modelo con una muestra diferente que asegure la validez externa del modelo.

Como futuras líneas de investigación a desarrollar por el Instituto de Biomecánica de Valencia, se plantea la generación de criterios de aceptación a partir de variables psicoacústicas. Los criterios de aceptación son una herramienta clave para los operadores, ya que permitiría asegurar el confort del pasajero mediante la inclusión de requisitos de calidad sonora ante nuevos contratos de adquisición de material rodante, así como establecer planes de mantenimiento en función de los niveles de calidad acústica de los vehículos.

Otra de las futuras líneas a desarrollar, es generar conocimiento sobre la influencia en la calidad sonora de cada uno de los modelos de vehículo de manera directa aislándola del resto de factores de influencia. La comparativa entre vehículos realizada tiene anidados factores que influyen en el ruido interior más allá de los propios del vehículo. Dichos factores son aquellos que dependen del estado de mantenimiento de vehículo y de la vía. El objetivo es la generación de criterios de diseño basados en la calidad sonora para nuevo material rodante cada vez más confortables para el pasajero.

Para ello, se hace necesario continuar la investigación en la puesta a punto de un diseño experimental del estudio de campo que permita analizar la influencia de dichos factores. Para la consecución de este objetivo, la colaboración de un operador ferroviario es imprescindible debido a la necesidad de un estudio de campo intensivo con variabilidad en la infraestructura y el acceso a la información de los planes de mantenimiento de los vehículos.

Bibliografía

- Accolti, E., y Miyara, F. (2009). Herramientas para el estudio de la percepción, valoración y efectos en el ser humano en relación al contenido espectral y envolvente temporal del ruido. Presentado en las Jornadas Regionales de Acústica AdAA, Rosario, Argentina.
- Aures, W. (1984). Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale. Ein Beitr. zur gehörbezogenen Schallanalyse. *Disertación TU Munchen*.
- Ayala Botto, M., Sousa, J. M. C., y da Costa, J. M. G. S. (2005). Intelligent active noise control applied to a laboratory railway coach model. *Control Engineering Practice*, 13(4), 473-484. <http://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.04.009>
- Beckenbauer, T., Stemplinger, I., y Seiter, A. (1996). Basics and use of DIN 45681 detection of tonal components and determination of a tone adjustment for the noise assessment. En *International congress on noise control engineering* (pp. 3271–3276).
- Blauert, J., y Jekosch, U. (1997). Sound-quality evaluation—a multi-layered problem. *Acta acustica united with acustica*, 83(5), 747-753.
- Boulet, I., Rabau, G., Meunier, S., y Poisson, F. (2007). Psychoacoustical indicators of acoustical comfort inside trains for background noise and emergent signals. *19th International Congress on Acoustics Madrid, 2-7 Septiembre 2007*.
- Carlsson, U.; Orrenius, U. (2013). Attractive Train Interiors: Minimizing annoying sound and vibration. *KTH Railway Group and Bombardier Transportation*, ISSN 1651-7660.
- Campos Méndez, J.; de Rus Mendoza, G.; Barrón de Angoiti, I. (2009). El transporte ferroviario de alta velocidad. Una visión económica. *Documentos de Trabajo 3. Fundación BBVA*.
- Choi, S., Park, B., Park, J., Park, C., y Paik, J. S. (2011). Acoustic comfort indicator for the assessment of interior noise in Korean high-speed trains. Presentado en 9th World Congress on Railway research, Lille, Francia.
- David, H. A. (1963). *The method of paired comparisons* (Vol. 12). Oxford: University Press.
- Durbin, J., y Watson, G. S. (1951). Testing for serial correlation in least squares regression. II. *Biometrika*, 159–177.
- Ecorys Research and Consulting (2012). Sector Overview and Competitiveness Survey of the Railway Supply Industry. Recuperado a partir de <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom>

- España (2010). Real Decreto 1434/2010, de 5 de noviembre, sobre interoperabilidad del sistema ferroviario de la Red Ferroviaria de interés general. BOE, 6 de noviembre de 2010, num 269, (pp. 93210 – 93236).
- EURAIL mag Business y Technology (2008). Reducing Interior Noise. Methods, materials y acoustic specifications. Issue 18.
- Euroexpress (2015) Portal de noticias de la UE. (última visita 1 de junio 2015) <http://www.euroexpress.es/index.php/noticias/2013/1/30/el-transporte-ferroviario-se-liberalizara-a-partir-de-2019/>
- Fastl, H. (1997). The psychoacoustics of sound-quality evaluation. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(5), 754–764.
- Fastl, H. (2005). Psycho-acoustics and sound quality. En *Communication acoustics* (pp. 139–162). Springer.
- Fastl, H., y Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Ferguson, S., Cabrera, D., Beilharz, K., y Song, H. J. (2006). Using psychoacoustical models for information sonification. En *Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display (ICAD2006)*. London, UK: Georgia Institute of Technology International Community on Auditory Display.
- Fleiss, J. L. (1986). Chapter 1. Reliability of measurement. *The design and analysis of clinical experiments*. New York. Wiley & Sons., 1–32.
- García, J. J., Iturbe, J., y Planas, J. L. (2000). Exhaust Noise Design based on Psycho-acoustic Parameters. En *FISITA World Automotive Congress*. Recuperado a partir de <http://210.101.116.115/fisita/pdf/H208.pdf>
- Genuit, K. (2004). The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the NVH-engineers. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 1(1-2), 158–168.
- Glasberg, B. R., y Moore, B. C. (2002). A model of loudness applicable to time-varying sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(5), 331–342.
- Gonzalez, A., Ferrer, M., De Diego, M., Pinero, G., y Garcia-Bonito, J. J. (2003). Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control. *Journal of Sound and Vibration*, 265(3), 663–679.
- Guski, R. (1997). Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(5), 765–774.
- Hardy, A. E. J. (2000). Measurement and assessment of noise within passenger trains. *Journal of sound and vibration*, 231(3), 819–829.

- Harris, C. M. (1995). *Manual de medidas acústicas y control del ruido* (1ª ed., Vol. 1). España: McGraw-Hill.
- Hogstrom, C. (2002). Sound quality of air conditioning systems of trains. En *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2002, pp. 94–99). Institute of Noise Control Engineering.
- Ikeda, M. (2002). Study of the aerodynamic noise characteristics of bluff bodies as a pantograph member. En *Proceedings of Forum Acusticum 2002*. Sevilla, España.
- Ingham, R., Otto, N., y McCollum, T. (1999). Sound quality metric for diesel engines. *SAE Technical Paper*. Recuperado a partir de <http://papers.sae.org/1999-01-1819/>
- Kaczmarek, T., Hafke, H., Preis, A., Sandrock, S., Griefahn, B., y Gjestland, T. (2006). The tram bonus. *Archives of Acoustics*, 31(4), 405–412.
- Kasper, K., Fingerhuth, S., Klemenz, M., Fiedler, J., De Doncker, R. W., y Vorländer, M. (2005). Psychoacoustic quantities and their relevance for sound-quality optimization of switched reluctance machines. En *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on* (p. 9–pp). IEEE.
- Klemenz, M., y Vorländer, M. (2005). The role of psychoacoustics for the optimisation of railbound-vehicle interior sound.
- Kolmogorov, A. N. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *G. Inst. Ital. Attuari*, vol. 4, 1933.
- Krylov, V. V. (2001). *Noise and vibration from high-speed trains*. Thomas Telford.
- Kuwano, S., Namba, S., y Okamoto, T. (2004). Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 277(3), 491–500.
- Lebart, L., Morineau, A., y Fenelon, J. P. (1979). *Traitement des données statistiques (méthodes et programmes)*. Francia: Dunod.
- Leth, L., y Stegemann, B. (2006). Acoustics performance management in the development of railway vehicles. En *Proceedings of 6th European Conference on Noise Control*.
- Leth, S. (2010). Silent trains for the future—an industrial approach for low noise design. Presentado en The 24th International Conference on Noise and Vibration engineering, Leuven, Belgium.
- Letourneaux, F., Guerrand, S., y Poisson, F. (1998). Confort acoustique et vibratoire automobile et ferroviaire Presentado en séminaire, jeudi 3 et vendredi 4 décembre 1998, Courbevoie, France: Société des Ingénieurs de l'Automobile.

- Letourneaux, F., Guerrand, S., y Poisson, F. (2000). Assessment of the acoustical comfort in high-speed trains at the SNCF: integration of subjective parameters. *Sound and Vibration*, 231(3), 839–846.
- Likert, R. (1932). Technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 140, 1-55.
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399–402.
- Lyon, R. H. (2003). Product sound quality-From perception to design. *Sound and vibration*, 37(3), 18–23.
- Ma, H., y Yano, T. (2005). Railway bonus for noise disturbance in laboratory settings. *Acoustical science and technology*, 26(3), 258–266.
- Möller, V. H., y Wahlström, P. (1997). *Acoustic comfort on trains*. ADTRANZ technical report, from a memory of Master of Science. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Moore, B. C. (2004a). Loudness, Pitch and Timbre. En *Blackwell Handbook of Sensation and Perception*. E. Bruce Godstein. Blackwell Publishing, (pp. 408–439).
- Moore, B. C. (2004b). Basic Auditory Processes. En *Blackwell Handbook of Sensation and Perception*. E. Bruce Godstein. Blackwell Publishing, (pp. 379–407).
- Moore, B. C., Glasberg, B. R., y Baer, T. (1997). A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(4), 224–240.
- Mzali, M., Dubois, D., Polack, J-D., Letourneaux, F., y Poisson, F. (2000). Auditory comfort on board of trains: passengers' point of view. In *Proceedings of Inter-Noise 2000*. (pp. 397-402). Nice, France.
- Nordtest ACOU 111 (2002) *Human Sound Perception – Guidelines for listening tests*. Recuperado a partir de www.nordicinnovation.net/nordtestfiler/acou111.pdf.
- Otto, N., Amman, S., Eaton, C., y Lake, S. (2001). Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *Sound and Vibration*, 35(4), 24–47.
- Pardo, A. R. M. (2001). *SPSS 10.0 Guía Para El Análisis De Datos*. Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Parizet, E., Guyader, E., y Nosulenko, V. (2008). Analysis of car door closing sound quality. *Applied Acoustics*, 69(1), 12–22.

- Parizet, E., Hamzaoui, N., y Jacquemoud, J. (2002). Noise assessment in a high-speed train. *Applied acoustics*, 63(10), 1109–1124.
- Parizet y Mouret. (2002). Amélioration du réalisme de la restitution d'enregistrements binauraux par l'utilisation d'une enceinte additionnelle pour les basses fréquences. Presentado en 5ème Congrès Français d'Acoustique, Lausanne, Suisse.
- Patsouras, C., Fastl, H., Widmann, U., y Hözl, G. (2002). Psychoacoustic evaluation of tonal components in view of sound quality design for high-speed train interior noise. *Acoustical Science and Technology*, 23(2), 113–116.
- Pearson, E. S., Pearson, K., y Hartley, H. O. (1954). *Biometrika tables for statisticians. Biometrika tables for statisticians. Cambridge [Eng.] Published for the Biometrika Trustees at the University Press, 1954-, 1.*
- Pearson, K. (1894). Contributions to the mathematical theory of evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A*, 71–110.
- Pitarque, A., Ruiz, J. C., y Roy, J. F. (1998). Redes neurales vs modelos estadísticos: Simulaciones sobre tareas de predicción y clasificación. *Psicológica: Revista de metodología y psicología experimental*, 19(3), 387–398.
- Poisson, F., Coste, O., Bouvet, S., y Vincent, N. (2011). Transfer path analysis within the TGV Duplex driver cab, platforms, upper and lower rooms from 150 to 360 km/h. Presentado en 9th World Congress on Railway research, Lille, France.
- Poisson, F., Dubois, F., Gallais, C., y Tallote, C. (2011). Acoustic comfort inside trains: research to develop indicators of background noise and temporal and spectral emergences. Presentado en 9th World Congress on Railway research, Lille, France.
- RENFE. *Nuestros trenes*. Recuperado 15 de junio 2015, a partir de http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/aves102_ficha.html
- Romero-Ibáñez, A. (2011). *Estudio de la reducción del ruido aerodinámico de trenes de alta velocidad con pantallas acústicas. Tesis*. Universidad de Cantabria. Recuperado a partir de <http://bucserver01.unican.es/xmlui/handle/10902/1104>
- Romero, J., Cerdá, S., Giménez, A., Marín, A., y Sanchis, A. (2003). Valoración de la calidad sonora del ruido exterior de trenes de alta velocidad utilizando descriptores psicoacústicos. Presentado en Tecni Acustica, Bilbao, España.
- Rossi, G. B., Crenna, F., y Panero, M. (2005). Panel or jury testing methods in a metrological perspective. *Metrologia*, 42(2), 97.
- Ruiz-Maya, L. (1983). *Métodos estadísticos de investigación. Introducción al análisis de la varianza*. Instituto nacional de estadística, Madrid.

- Scheffe, H. (1959). *The analysis of variance* (Vol. 72). John Wiley & Sons.
- SHIFT²RAIL STRATEGIC MASTER PLAN (2014) Version 1.0 24 September 2014.
- Shrivastav, R., Eddins, D. A., y Anand, S. (2012). Pitch strength of normal and dysphonic voices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), 2261–2269.
- Shrout, P. E., y Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. *Psychological bulletin*, 86(2), 420.
- Smirnov, N. (1948). Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *The annals of mathematical statistics*, 279–281.
- Stevens, S. S. (1956). The direct estimation of sensory magnitudes: Loudness. *The American journal of psychology*, 1–25.
- Terhardt, E., Stoll, G., y Seewann, M. (1982). Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 71(3), 679–688.
- Thompson, D. (2008). *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier.
- Tukey, J. W. (1953). *The problem of multiple comparisons*. Ditto: Princeton University.
- UIC (2015). *High Speed - International Union of Railways (UIC)*. Recuperado 27 de septiembre de 2015, a partir de <http://www.uic.org/highspeed>.
- von Bismarck, G. (1974). Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, 30(3), 159–172.
- Vorländer, M. (2006). How acoustic experts talk to «normal people». En *Proceedings Techniacustica 2006*.
- Widmann, U., y Holzl, G. (1997). Evaluation of the indoor sound of a modern car and a high speed train by means of psychoacoustic parameters. En *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 1997, pp. 325–330). Institute of Noise Control Engineering.
- Yost, W. A. (1996). Pitch strength of iterated rippled noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3329–3335.
- Zeitler, A., y Hellbrück, J. (2001). Semantic attributes of environmental sounds and their correlations with psychoacoustic magnitude. En *Proc. of the 17th International Congress on Acoustics [CDROM], Rome, Italy* (Vol. 28).

- Zhang, X., Liu, Y., y Zhang, C. (2012). Sound Quality Subjective Evaluation Analysis of Noise Inside High-speed Trains. En *Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012)*.
- Zwicker, E., y Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag.
- Zwicker, E., Fastl, H., y Dallmayr, C. (1984). Basic-Program For Calculating The Loudness Of Sounds From Their 1/3-Oct Band Spectra According To Iso-532-B. *Acustica*, 55, 63-67.

NORMATIVA CITADA

- ANSI S3.6: 1996. *Specification for Audiometers*.
- DIN 45681:2005. *Acoustics - Determination of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions*.
- ISO/TS 15666:2003. *Acoustics - Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys*.
- ISO-532 B:1975. *Acoustics – Method for Calculating Loudness Level*.
- ISO 3745:2003. *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms*.
- UNE-EN ISO 3381:2011. *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Medición del ruido en el interior de vehículos sobre carriles*.
- UNE-EN 13725:2004. *Calidad del aire. Determinación de la concentración de olor por olfatometría dinámica*.

Publicaciones relacionadas con la tesis

Contribuciones a Congresos

Autores: O. GIBERT¹; J. SAPENA¹; MATEO², B.; PALOMARES², N.

¹ Alstom Transport, ² Instituto de Biomecánica de Valencia

Título: Development of a prediction model of acoustic discomfort in high-speed train passenger cars.

Tipo de participación: Ponencia

Congreso: European Conference on Noise (EURONOISE 2009)

Publicación: Proceedings of the Institute of Acoustics

Lugar celebración: Edinburgh, Scotland,

Fecha: 26/10/2009 - 28/10/2009

Autores: SAPENA¹, J.; GIBERT¹, O.; MATEO², B.; PALOMARES², N.

¹ Alstom Transport, ² Instituto de Biomecánica de Valencia

Título: Desarrollo de un modelo de predicción de disconfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: 6º Congreso de Innovación Ferroviaria

Publicación: Ponencias 6º Congreso de Innovación Ferroviaria. Depósito Legal: M-11498-2011. 231-245 págs.

Lugar celebración: Málaga

Fecha: 30/03/2011 - 01/04/2011

Autores: O. GIBERT¹; J. SAPENA¹; MATEO², B.; PALOMARES², N.

¹ Alstom Transport, ² Instituto de Biomecánica de Valencia

Título: Train vestibules interior noise: development of an acoustic discomfort model

Tipo de participación: Ponencia

Congreso: 40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2011 (INTERNOISE 2011)

Publicación: Conference Proceedings (Vol. 2011, No. 2, pp. 4441-4447). Institute of Noise Control Engineering. ISBN: 978-1-61839-280-0

Lugar celebración: Osaka, Japan,

Fecha: 04/09/2011 - 07/09/2011

Publicaciones o Documentos Científico-Técnicos

Autores: MATEO¹, B.; PALOMARES¹, N.; HUERTAS¹, P.; SOLAZ¹, J.S.; SIGNES¹, E.; GIBERT², O.; SAPENA², J.; RUIZ¹, J.R.

¹ Instituto de Biomecánica de Valencia, ² Alstom Transport

Título: Cómo predecir el exceso de ruido en vehículos de alta velocidad

Revista: Revista de Biomecánica

Número: 56

Volumen: Páginas: 11-14 págs de 117 págs. Fecha: 01/06/2011

Editorial: Instituto de Biomecánica de Valencia

Lugar de publicación: Valencia

ISBN/ISSN: ISSN: 1575-5622

Autores: GIBERT¹, O.; SAPENA¹, J.; MATEO², B.; PALOMARES², N.

¹ Alstom Transport, ² Instituto de Biomecánica de Valencia

Título: Desarrollo de un modelo de predicción de disconfort acústico en coches de vehículos de alta velocidad

Revista: Vía Libre Técnica

Número: 2

Volumen: Páginas: pp: 33-38 Fecha: 01/12/2011

Editorial: Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Lugar de publicación: Madrid

ISBN/ISSN: ISSN: 2174-0194