



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

MÉTRICAS DE CALIDAD SONORA
APLICADAS A PRODUCTOS INDUSTRIALES
Y DE CONSUMO

Pedro Poveda Martínez



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE

**INSTITUTO DE FÍSICA APLICADA A LAS CIENCIAS Y LAS TECNOLOGÍAS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Métricas de calidad sonora aplicadas a productos industriales y de consumo



PEDRO POVEDA MARTÍNEZ

**Tesis presentada para aspirar al grado de
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE
MENCIÓN DE DOCTOR INTERNACIONAL**

DOCTORADO EN FÍSICA APLICADA A LAS CIENCIAS Y LAS TECNOLOGÍAS

Dirigida por:

Dr. JAIME RAMIS SORIANO

Alicante, septiembre de 2018

Tesis doctoral presentada por D. Pedro Poveda Martínez en forma de compendio de publicaciones, de acuerdo con lo establecido en el reglamento de régimen interno de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante, en su Artículo 15, apartado 3, para la obtención del grado de Doctor por la Universidad de Alicante bajo la dirección del Doctor Jaime Ramis Soriano.

Vto. Bº. Director de la Tesis doctoral



Dr. Jaime Ramis Soriano

Universitat d'Alacant
El doctorando,
Universidad de Alicante

D. Pedro Poveda Martínez

Alicante, septiembre de 2018

A Isabel, Marc y Lía



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice de contenidos

Índice de figuras	9
Índice de tablas	13
Agradecimientos.....	15
Resumen.....	17
Abstract	21
Estructura de la tesis	25
Structure of the Thesis	27

PARTE PRIMERA. SÍNTESES GENERAL DE LA TESIS

1. Introducción.....	31
1.1. Antecedentes y estado del arte	33
1.1.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto	35
1.1.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto	43
1.1.3. Línea de investigación 3: calidad de productos en términos de seguridad.....	50
1.2. Planteamiento del problema	52
1.3. Objetivos de la investigación	57
1.4. Rationale	58
1.5. Trabajos presentados y justificación de la unidad temática	59
2. Metodología, hipótesis y plan de trabajo.....	61
2.1. Metodología.....	63
2.1.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto. Motorreductores.....	63
2.1.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto	81
2.1.3. Línea de investigación 3: calidad de productos en términos de seguridad.....	86
2.2. Hipótesis	94
2.3. Plan de trabajo.....	95
3. Resultados. Análisis y discusión	97
3.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto. Motorreductores	99
3.1.1. Selección del transductor empleado.....	99
3.1.2. Patrones de vibración	99
3.1.3. Punto óptimo de medida.....	101
3.1.4. Adaptación del sistema de medida a la cadena de producción	103
3.1.5. Determinación de umbrales de detección	107
3.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto	121

3.2.1. Ensayo 1: calidad sonora en espejos retrovisores eléctricos	121
3.2.2. Ensayo 2: molestia producida por los sonidos de advertencia de vehículos	126
3.3. Línea de investigación 3: calidad de producto en términos de seguridad	129
3.3.1. Ensayo 1: detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas	129
3.3.2. Ensayo 2: detectabilidad de vehículos eléctricos de dos ruedas	131
4. Conclusiones/Conclusions	137
5. Futuras líneas de investigación/Future Lines of Research	155
6. Referencias bibliográficas.....	161

PARTE SEGUNDA. COMPENDIO DE PUBLICACIONES

1. Artículo primero	175
2. Artículo segundo	179
3. Artículo tercero	183



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de generación de ruido en máquinas.....	37
Figura 2. Ejemplo de desgaste en el flanco y en la cabeza del diente, para un engranaje helicoidal, debido a un proceso de granallado.....	39
Figura 3. Picado en la superficie del diente de un engranaje.....	40
Figura 4. Rotura en un diente del engranaje.....	40
Figura 5. Diagrama de optimización de la calidad acústica de un producto según Fog [41]......	44
Figura 6. Herramientas de mano analizadas en [46]......	45
Figura 7. Ejemplos de sistema de alerta acústico (izq) y luminoso (dch).	48
Figura 8. Reductor empleado para el abatimiento de espejos retrovisores de vehículos.	63
Figura 9. Esquema de medición del ruido generado por motorreductores empleando micrófono.	65
Figura 10. (Izq) Acelerómetro B&K Type 4519. (Dch) Posicionamiento del sensor en la superficie del motorreductor.....	66
Figura 11. Medidas de vibración en la superficie del reductor con vibrómetro láser.....	66
Figura 12. Fuerzas involucradas en el contacto entre dientes en un engranaje.	68
Figura 13. Modo de vibración en tapadera superior del reductor. Modelo numérico por el método de Elementos Finitos.....	68
Figura 14. (Izq) Puntos medida en zona lateral del reductor. (Dch) Punto medida en superficie inferior.	69
Figura 15. Curvas isofónicas introducidas por Mudson y Fletcher [A].	75
Figura 16. Sonoridad específica de 93 dB. Tono de 1000 Hz.....	75
Figura 17. Cálculo del primer momento parcial empleado en la obtención de la agudeza.	76
Figura 18. Efecto de la duración subjetiva en ruidos con modulaciones de amplitud rápidas. Línea continua: profundidad de la modulación. Línea punteada: profundidad percibida.	77
Figura 19. Palpador empleado en las medidas de vibración.	79
Figura 20. Diferentes muelles empleados en los ensayos.....	80
Figura 21. Fleje utilizado para garantizar el contacto entre el acelerómetro y la superficie del reductor. ..	80
Figura 22. Esquema montaje para medidas de vibración con fleje.....	80
Figura 23. Espejos retrovisores empleados en la investigación.	82
Figura 24. Montaje del equipo de medida en cámara semianecoica.....	83
Figura 25. Ej. de matriz de decisión obtenida por el método de comparación de parejas.	84
Figura 26. Panel de control de la aplicación desarrollada para el método de ranking.	84
Figura 27. Aplicación desarrollada para evaluar la agradabilidad de sonidos de advertencia.....	86
Figura 28. Configuración del ensayo <i>pass-by</i> para la adquisición de muestras sonoras.....	87
Figura 29. Espectro de frecuencias correspondientes a los sonidos de advertencia empleados en el ensayo de detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas.	90

Figura 30. Representación tiempo-frecuencia para el sonido de advertencia WS3.	91
Figura 31. Espectrogramas correspondientes a los sonidos de advertencia WS7 y WS8.	91
Figura 32. Diagrama de flujo para la simulación de sonidos <i>pass-by</i>	92
Figura 33. Espectro de frecuencias de los diferentes entornos urbanos utilizados en los ensayos auditivos.	94
Figura 34. Espectro de frecuencias para diferentes métodos de medida.	99
Figura 35. Patrón de ruido obtenido en medidas con acelerómetro.	100
Figura 36. Comparativa patrón medio, máx. y mín. con espectro de reductor defectuoso.	100
Figura 37. Señales con diferente nivel de vibración.	100
Figura 38. Señal de vibración para ruido de arrastre.	101
Figura 39. Señal de vibración reductor con golpeteo.	101
Figura 40. Señal de vibración con discontinuidades. Modulación.	101
Figura 41. Posiciones de medida en reductor.	102
Figura 42. Espectro de frecuencias todas las posiciones. Medidas con acelerómetro.	102
Figura 43. Puntos de medida empleados en el sistema de monitorización de fallas.	103
Figura 44. Espectro frecuencias medidas diferentes muelles. Comparación con acelerómetro adherido.	104
Figura 45. Medidas palpador muelle sin camisa.	104
Figura 46. Montaje del fleje en la cama del reductor.	105
Figura 47. Espectro de frecuencias para diferentes longitudes de fleje.	105
Figura 48. Esquema posicionamiento fleje. Ángulo respecto a reductor.	106
Figura 49. Esquema posicionamiento fleje. Ángulo nulo respecto a reductor.	106
Figura 50. Comparación medidas con diferentes ángulos del fleje respecto a la superficie medida.	107
Figura 51. Comparación de los resultados obtenidos mediante parámetros psicoacústicos para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.	108
Figura 52. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.	109
Figura 53. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.	110
Figura 54. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.	111
Figura 55. Distribución estadística de los datos para el parámetro agudeza y fluctuación.	113
Figura 56. Correlación entre diferentes parámetros de detección.	115

Figura 57. Resultados obtenidos para distintas iteraciones del método de optimización de los parámetros psicoacústicos.	117
Figura 58. Resultados de detección para valores del parámetro nivel de vibración.	117
Figura 59. Medidas del nivel de aceleración global en P2. Comparación entre reductores en buen estado y muestras defectuosas.	121
Figura 60. Espectrograma del ruido generado por los retrovisores eléctricos.	122
Figura 61. Agradabilidad Sonora media para los EAEM obtenida por los métodos de comparación de parejas y procedimiento de ranking.	125
Figura 62. Molestia Sonora media para los distintos sonidos de advertencia.	128
Figura 63. Distancia media de detección para los diferentes sonidos de advertencia estudiados. Comparación entre ambientes sonoros.	131
Figura 64. Nivel de presión sonora emitido por las diferentes motocicletas en función de la velocidad.	132
Figura 65. Espectro de frecuencias para las muestras EM1 (izq) y EM2 (dch) en función de la velocidad.	132
Figura 66. Comparación del tiempo de reacción medio para motocicletas con diferente sistema de propulsión.	133
Figura 67. Distancia media obtenida para data una de las motocicletas ensayadas. La línea negra indica el límite de seguridad o distancia de frenado.	134

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de fallas en engranajes según ANSI/AGMA 1010-E95 [25].	38
Tabla 2. Resumen de los parámetros empleados frecuentemente en la detección de fallas en engranajes según la literatura.	43
Tabla 3. Catálogo de defectos obtenido a partir de ensayos subjetivos.	64
Tabla 4. Tabla de asociación entre parámetros psicoacústicos y defectos.	78
Tabla 5. Características de las muestras analizadas.	81
Tabla 6. Clasificación de los sonidos de advertencia en función de sus características.	91
Tabla 7. Principales características de las motocicletas empleadas en el ensayo.	93
Tabla 8. Pruebas de normalidad para los distintos parámetros de detección.	112
Tabla 9. Pruebas de igualdad de varianza para los distintos parámetros de detección.	113
Tabla 10. Agrupación de los defectos según el parámetro de detección.	114
Tabla 11. Coef. de correlación de Pearson entre los diferentes parámetros de detección analizados.	116
Tabla 12. Umbrales óptimos de detección de los diferentes parámetros.	117
Tabla 13. Porcentajes de detección.	118
Tabla 14. Relación entre los diferentes parámetros de detección.	119
Tabla 15. Porcentaje de detección de cada parámetro según el tipo de error.	120
Tabla 16. Valoración subjetiva de reductores no identificados como defectuosos punto P1.	121
Tabla 17. Resultados de los parámetros psicoacústicos para los espejos retrovisores.	123
Tabla 18. Características demográficas de los participantes.	123
Tabla 19. Tipos de error en matrices de decisión.	124
Tabla 20. Agradabilidad Sonora media obtenida según el método de análisis.	125
Tabla 21. Coeficiente de correlación de Pearson entre agradabilidad subjetiva y los parámetros psicoacústicos más representativos.	126
Tabla 22. Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para la molestia sonora de los diferentes sonidos de advertencia.	127
Tabla 23. Ensayo HSD Tukey para los diferentes sonidos de advertencia.	128
Tabla 24. Valores obtenidos para los parámetros psicoacústicos de los distintos sonidos de advertencia.	129
Tabla 25. Distribución de los participantes en los diferentes entornos ensayados.	129
Tabla 26. Tiempos de reacción medio para las distintas motocicletas ensayadas.	134
Tabla 27. Agrupación de los vehículos con tiempos de reacción equivalentes.	134

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Jaime Ramis Soriano, director de esta tesis y amigo, su inestimable colaboración y apoyo antes y durante el desarrollo de la investigación. Sin su dedicación y esfuerzo esta tesis no habría sido posible. Asimismo, quiero agradecer a Jesús Carbajo San Martín sus consejos, disposición, y capacidad crítica en todos los proyectos que hemos emprendido juntos. A Enrique Gonzalo Segovia Eulogio, por hacerme partícipe de alguno de sus muchos conocimientos relacionados con métodos numéricos. A Josué Nescolarde-Selva y Miguel Lloret-Climent, por su ayuda durante el análisis de los datos. Quiero agradecer también a todo el Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, y al Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías sus esfuerzos en fomentar la investigación y la transferencia de conocimiento. Asimismo, me gustaría dar las gracias a la Universidad de Alicante, encargada de financiar esta tesis a través de los contratos de formación predoctoral.

Por otro lado, quiero agradecer a Ramón Peral Orts, Nuria Campillo Davo y Héctor Campello Vicente, de la Universidad Miguel Hernández de Elche y coautores en algunas de las publicaciones incluidas en esta tesis, su colaboración durante la investigación, así como el haber dedicado parte de su tiempo a los ensayos. A Katsuya Yamauchi y Mizuki Kawaguchi, de la Universidad de Kyushu, Japón, por su ayuda en la investigación y sus consejos a la hora de analizar los datos.

Al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Coimbra, especialmente a Luis Godinho y Paulo Amado Mendes, por permitirme formar parte de su equipo durante mi estancia y transmitirme parte de sus conocimientos.

Me gustaría agradecer también a la empresa Compañía Levantina de Reductores, S.L, su inestimable colaboración en el suministro de las muestras empleadas en la tesis, así como por su confianza depositada en la Universidad de Alicante para acometer diferentes proyectos de investigación.

Del mismo modo, quiero dar las gracias a los revisores anónimos de los artículos que conforman el compendio de publicaciones. Sin lugar a duda, sus comentarios han permitido mejorar la calidad de los trabajos de manera notable.

A mis padres y a mis hermanas, por su apoyo incondicional a lo largo de los años y cuyo agradecimiento no puede expresarse con palabras.

Por último, a Isabel, mi compañera de viaje, por su incesante apoyo, ayuda y comprensión. Por acompañarme en este camino y regalarme su amor incondicional. Y a mis hijos, Marc y Lía, por el tiempo que les debo, los partidos de fútbol sin jugar o las noches sin leer. Por hacerme sentir la persona más afortunada, gracias.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumen

El presente trabajo estudia la aplicación de métricas de calidad sonora en productos industriales y de consumo, haciendo uso de las técnicas y parámetros más habituales para describir su comportamiento y establecer una correlación con la percepción subjetiva del usuario. Se trata de un problema con una carga experimental importante y una gran componente estadística de cuyos análisis pueden derivarse nuevas métricas de valoración. La tesis, realizada por compendio de publicaciones, se centra en tres puntos de vista distintos de la calidad de un producto - funcional, perceptual y seguridad - estudiándolos siempre por métodos acústicos. El trabajo queda dividido por tanto en tres líneas de investigación independientes, utilizándose cada una de ellas sobre una aplicación concreta del mercado.

En el primer caso - calidad funcional de producto - se estudia el comportamiento acústico y vibratorio de dispositivos electromecánicos con objeto de detectar fallas y controlar la salida al mercado de productos defectuosos. El análisis se lleva a cabo sobre motorreductores empleado para el movimiento de espejos retrovisores en vehículos. Actualmente existen multitud de métodos capaces de realizar el diagnóstico de maquinaria a partir de las vibraciones que estas generan. En la mayoría de los casos, hacen uso de diferentes indicadores de condición. En este trabajo, además de emplear las técnicas tradicionales, se valida el uso de parámetros psicoacústicos como herramienta para la detección de fallas en maquinaria. Pese a que estas métricas fueron originalmente definidas para ser aplicadas a señales de presión, durante este trabajo se analiza su posible uso en vibraciones. En primer lugar, se estudió la configuración de medida, estableciendo el acelerómetro como el método más apropiado para un entorno acústicamente hostil como puede ser una industria. Posteriormente, se analiza una población de muestras estadísticamente representativa con objeto de obtener el comportamiento acústico. Al mismo tiempo, se realiza una catalogación de los patrones de ruido en función del tipo de defecto, empleando para ello un análisis subjetivo de las muestras. Con objeto de adaptar el sistema de medida a una línea de producción automatizada, se analizaron diferentes soluciones para garantizar el contacto entre el transductor y la muestra. Finalmente, distintos indicadores de condición y parámetros psicoacústicos fueron calculados a partir de señales de vibración. Se realizó una comparación entre métodos para establecer el más apropiado para el control de calidad de motorreductores. Los resultados indicaron una correlación entre algunos indicadores. Asimismo, se obtuvo un porcentaje de detección elevado para ambos métodos, destacando un menor número de falsos positivos al emplear parámetros psicoacústicos.

Por otro lado, la combinación de ambas técnicas de análisis dio como resultado una mejora en el diagnóstico, obteniendo un porcentaje de éxito superior al 90%.

Respecto a la segunda línea de investigación – calidad perceptual de producto – se lleva a cabo un análisis que podría identificarse de forma más clara con el concepto tradicional de calidad sonora de un producto. Este tipo de estudios tratan de establecer una correlación entre diferentes parámetros acústicos obtenidos de forma objetiva y la percepción subjetiva del usuario en relación a una cualidad del producto. En este caso, el análisis se centra en dos aplicaciones independientes. Por un lado, se estudia la calidad sonora de espejos retrovisores eléctricos en vehículos. En primer lugar, se analizó el sonido emitido por diferentes muestras, determinando su comportamiento acústico y evaluándolas por medio de parámetros objetivos. Seguidamente, a partir de ensayos auditivos realizados en diferentes laboratorios, se obtuvo la agradabilidad sonora del producto. Para ello, se emplearon dos métodos de ensayo: comparación de parejas y procedimiento de ranking. A partir de la correlación entre los resultados objetivos y la percepción subjetiva del usuario se estableció el nivel de presión sonora, la sonoridad y la rugosidad, como los parámetros que mejor describían la calidad sonora del producto. Por otro lado, se analizó la molestia ocasionada para el peatón por diferentes sistemas de advertencia incorporados a vehículos eléctricos. En este caso, la percepción sonora del consumidor se determinó mediante el método de diferencias semánticas. Los resultados indicaron un mayor desagrado para el sonido generado por los vehículos eléctricos en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales. Sin embargo, no se observó una relación clara entre la valoración subjetiva de las muestras y el contenido espectral de las mismas.

Por último, en la tercera línea de investigación se analiza la calidad de producto en términos de seguridad para el consumidor. Esta línea está relacionada con uno de los pilares fundamentales de la psicoacústica, el enmascaramiento; y tiene su origen en la problemática existente actualmente en relación a los vehículos eléctricos y el bajo ruido que estos generan. El estudio se centra en el término detectabilidad y analiza el tiempo de reacción del peatón ante la presencia de un vehículo. La investigación se divide en dos partes fundamentales. En primer lugar, se analiza la mejora en la detectabilidad del vehículo eléctrico de cuatro ruedas al emplear un sistema acústico de alerta. El trabajo se realiza para una velocidad del vehículo cercana a 30 km/h. Del mismo modo, se estudia el comportamiento para diferentes condiciones de ruido de fondo, poniendo de manifiesto el papel del entorno urbano en la detectabilidad del vehículo. Los resultados indicaron un tiempo de reacción claramente superior para vehículos eléctricos en comparación con los de combustión interna. Este comportamiento supuso un incremento del riesgo para el peatón. El uso de sonidos de advertencia mejoró notablemente la detectabilidad del vehículo, especialmente aquellos

formados por un número reducido de componentes tonales. Asimismo, para ambientes urbanos silenciosos, los sonidos de advertencia no resultaron indispensables. En segundo lugar, se estudió el comportamiento acústico de motocicletas eléctricas, analizando el nivel de ruido generado por diferentes modelos. Asimismo, se estableció el tiempo de reacción necesario para detectar la aproximación del vehículo por parte del peatón. Los resultados revelaron un comportamiento similar al obtenido para vehículos de cuatro ruedas. El sonido emitido por motocicletas eléctricas fue notablemente menor. Por tanto, el riesgo para el peatón se vio incrementado en presencia de este tipo de vehículos.

Palabras clave

Psicoacústica, calidad sonora, molestia sonora, agradabilidad, motorreductores, espejos retrovisores, vehículos eléctricos, AVAS, sonido de advertencia, detectabilidad, tiempo de reacción.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Abstract

This work is focused on the application of sound quality metrics to industrial and consumer products, using the most common techniques and parameters to describe its behaviour. By this way, it is attempted to establish a correlation between an objective evaluation and the subjective perception of the user. Therefore, it is a problem with a significantly experimental load and a large statistical component from which new predictive metrics can be derived. The thesis, carried out by compendium of publications, analyses three different points of view of product quality by means acoustic methods: functional, perceptual and safety. The work is then divided in three independent lines of research, analysing a specific application of the market in each case.

In the first place, regarding the functional quality of the product, the acoustic and vibrational behaviour of electromechanical devices was analysed in order to detect possible failures. The main goal was to prevent defective products from being placed on the market. The analysis was carried out on gearmotors used for the movement of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles. Currently, there are many methods capable of establishing the diagnosis of machinery. The vast majority make use of different condition indicators, extracting information from the vibration signals obtained in the frame. During this work, in addition to using traditional techniques, it was analysed the validity of psychoacoustic metrics as a tool for detecting mechanical failures. Although these parameters were originally developed to be used with pressure signals, their application over vibration was analysed during this work. As a first step, the measurement setup was studied, establishing the accelerometer as the most suitable method for a hostile environment such as an industry. Subsequently, a statistically representative group of samples was selected and studied in order to determine the standard behaviour of the device. At the same time, the noise patterns generated by defective samples were catalogued according to the type of failure by means of a subjective analysis. In order to adapt the measurement system to an automated production line, different solutions to ensure the contact between the analysed surface and the transducer were studied. Finally, condition indicators and psychoacoustic metrics were applied to vibration signals, carrying out a comparison between them and establishing the most appropriate parameters for the quality control of gearmotors. The results revealed a high correlation between some indicators. Also, it showed a high percentage of detections for both methods, highlighting a lower number of false positives using psychoacoustic parameters. Additionally, the combination of the two techniques

provided an improvement of the diagnosis, obtaining more than 90% of success in an industrial application.

The second line of research, perceptual quality of a product, consisted of a more traditional analysis, directly linked with the well-known concept of sound quality. The aim of these type of studies is to determine the relationship between some objective criteria and the subjective perception of the consumer regarding the quality of the product. The work was focused on the acoustic properties, using psychoacoustic parameters and different auditory tests to evaluate the samples. The research was performed in two independent applications. On the one hand, it was studied the sound quality of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles: First, the sound emitted by different samples was analysed, determining its acoustic behaviour and evaluating them by means of some objective quality metrics. Secondly, by means of an auditory test carried out in three different laboratories, the sound samples were presented to a group of listeners. The sound pleasantness of the products was assessed by using two evaluation methods: paired comparison and ranking procedure. From the correlation between the objective results and the subjective perception of the consumer, it was established that sound pressure level, loudness and roughness, were the parameters that better describe the sound quality of the samples. On the other hand, it was studied the acoustic annoyance caused by different warning sounds incorporated to electric vehicles. In this case, the consumer's perception was determined by means of auditory tests using the semantic differential method. The results indicated that the sound emitted by an electric vehicle results slightly more annoying than the one generated by an internal combustion engine. However, no clear relationship was found between the perceived annoyance by pedestrians and the spectral content for the analysed warning sounds.

Finally, during the third line of research, the sound quality of a product in terms of consumer's safety was studied. This work was related to one of the fundamental pillars of psychoacoustics, the masking effect; and has its origin in a recently raising concern derived from the low noise emissions of the electric vehicles. The study was focused on the term detectability which has become target of numerous scientific researches on the literature. It analysed the reaction time of the pedestrian in detecting the presence of a vehicle. The line of research was divided in two parts. In the first place, it was analysed the improvement in the detectability of four-wheel electric vehicles due to the use of warning sound systems. The work was carried out for vehicles with a speed near 30 km/h. At the same time, the reaction time of pedestrians was analysed using different background noise conditions, highlighting the role of the urban environment in the detectability of a vehicle. Results showed clearly superior reaction times for electric vehicles in comparison with those with internal

combustion propulsion system, which supposes an increase of the risk for pedestrians. On the other hand, the use of warning sounds led to an improvement of the detectability of the vehicle, specially through the use of sounds with a reduced number of tonal components. Although, for quiet urban areas, the alerting sounds did not seem necessary for a good detectability. In the second place, the acoustic behaviour of powered two-wheelers was studied. The work analysed the level of noise emitted by different samples, comparing between motorcycles with electric and internal combustion propulsion system. At the same time, the pedestrian reaction time to detect a vehicle approaching was determined by means an auditory test carried out in a laboratory. The results revealed a behaviour similar to that obtained for cars. The noise emitted by electric motorcycles was noticeably lower than that generated by the traditional ones. Therefore, the risk for pedestrian will increase in the presence of this type of vehicles as it is deduced by the reaction time obtained during the experiments.

Palabras clave

Psychoacoustic, sound quality, annoyance, pleasantness, gearmotors, electrically adjustable exterior mirrors, electric vehicles, AVAS, warning sounds, detectability, reaction time.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Estructura de la tesis

Esta tesis se presenta por compendio de publicaciones, cumpliendo con los requisitos fijados por el Reglamento de Régimen Interno de la Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante, aprobado en Consejo de Gobierno de 17 de diciembre de 2013, BOUA de 20 de diciembre de 2013.

El trabajo queda estructurado en tres partes. El primer bloque está dedicado a la síntesis general e incluye un resumen de la investigación y las conclusiones más relevantes. La información relativa a los trabajos no publicados en revistas científicas se detalla de manera más precisa a lo largo del texto, motivo por el cual esta tesis resulta más extensa en comparación con otros trabajos con el mismo formato. En el segundo bloque se incluyen las publicaciones en revistas indexadas en el Science Citation Index (SCI) de acuerdo con la normativa interna del Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal para su programa de Doctorado en Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías.

La primera parte de la tesis comienza con el capítulo *Introducción*, en cuyo apartado *Antecedentes y estado del arte* se establece una visión general del concepto de calidad de producto y la importancia de la calidad sonora en su evaluación, contextualizando así el trabajo realizado. Se definen de forma precisa las características de cada uno de los pilares de la calidad incluidos en esta tesis y que conforman las tres líneas de investigación estudiadas: funcional, perceptual y seguridad. Para cada caso se da una visión global de la problemática existente, describiendo las técnicas y metodologías más utilizadas para su estudio a partir de un análisis bibliográfico. Seguidamente, se expone el planteamiento del problema, definiendo los objetivos de la tesis y justificando el trabajo en el apartado *Rationale*. Por último, y de acuerdo con la normativa de la Universidad de Alicante, se justifica la unidad temática de los trabajos presentados.

En el capítulo 2, *Metodología, hipótesis y plan de trabajo*, se define la metodología empleada en cada una de las líneas de investigación incluidas en la tesis. En primer lugar, se describen las aplicaciones estudiadas para los diferentes enfoques de la calidad de producto. En cada caso se detalla el proceso de adquisición de medidas llevado a cabo durante la investigación, analizando la problemática existente para cada situación y las posibles soluciones. Para la línea de investigación 1, calidad funcional de producto, se definen los diferentes parámetros empleados

en la evaluación del producto. Del mismo modo, se establece el proceso para la obtención de los umbrales de calidad que definen a las muestras defectuosas. Respecto a la línea de investigación 2, calidad perceptual de producto; y la línea de investigación 3, calidad de producto en términos de

seguridad; se describen los ensayos auditivos empleados para la evaluación del producto. Una vez descrita la metodología empleada en las diferentes líneas de investigación, se plantean las hipótesis iniciales de trabajo y se describe el plan de trabajo seguido.

El tercer capítulo del trabajo, *Resultados, análisis y discusión*, se destina a describir los resultados obtenidos en cada una de las líneas de investigación según la aplicación seleccionada, incluyendo el análisis y la discusión de los mismos. Para la línea de investigación 1, se describen los resultados obtenidos en el control de calidad de pequeños motorreductores por métodos acústicos. En la segunda línea, se detalla todo lo referente a la agradabilidad sonora de espejos retrovisores eléctricos de vehículos y los sonidos de advertencia instalados en vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EV). Respecto a la tercera línea de investigación, se establece la detectabilidad de EVs de cuatro ruedas con y sin sistema acústico de alerta (Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS), en diferentes entornos urbanos, a una velocidad cercana a 30 km/h. Asimismo, se determina la detectabilidad para vehículos eléctricos motorizados de dos ruedas (Powered Electric Two-Wheelers, PTW).

Para finalizar la primera parte, en el capítulo cuatro se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo. Seguidamente, se describen algunas de las futuras líneas de investigación relacionadas con la calidad sonora de productos industriales y de consumo, y se enumeran las referencias empleadas para el desarrollo de la tesis.

En la segunda parte del documento, se adjuntan los trabajos enviados y/o publicados en revistas indexadas que conforman el compendio de publicaciones con el que se presenta esta tesis.

Structure of the Thesis

This thesis is presented by compendium of publications, complying with the requirements indicated by the Internal Regime Regulation of the Escuela de Doctorado de la Universidad de Alicante, approved by the Governing Council of December 17, 2013, BOUA of December 20, 2013.

The work is structured in three parts. The first block is dedicated to the general synthesis, including a summary of the research as well as the most relevant conclusions. The content regarding unpublished works is detailed more precisely throughout the text. Thus, the thesis results more extensive in comparison with other works with the same format. The second block includes different publications in scientific journals indexed in the Science Citation Index (SCI) in accordance with the internal regulation of the Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal for its Doctoral Program in Physics Applied to Sciences and Technologies.

The first part of the thesis begins with an introductory chapter. In section 1.1., *Background and State of the Art*; a general vision of the concept product quality is introduced, highlighting the importance of sound quality in the evaluation of products. In this way, the work is contextualized. The main characteristics of each fundamental pillar of quality included in this work are defined as follows: functional, perceptual and security. This results in three independent lines of research. For each case, an overall view of the problem is given, describing techniques and methodologies used for its study from a bibliographic analysis. Then, the statement of the problem is exposed, defining the objectives researches included in the thesis and justifying the work on the “rationale” section. Finally, in accordance with the regulation of the Universidad de Alicante, the thematic unit of the submitted works is justified.

In chapter 2, *Methodology, Hypothesis and Work Plan*, the methodology used in each research line of the thesis is defined. First, the applications studied for the different product quality pillars are described. In each case, the sample acquisition process conducted during the research is detailed and the existing problem depending on the situation as well as its possible solutions are analysed. For line of research 1, functional quality of a product, the different parameters used in the evaluation of samples are introduced. In the same way, it is defined the process followed to obtain the quality threshold for defective samples as well as the measurement configuration selected to adapt the system to an automated process. Regarding the line of research 2,

perceptual quality of a product, and 3, sound quality of a product in terms of security, the auditory tests used for the evaluation of the product are described. Once the methodology used in the different lines has been described, it is presented the initial hypothesis. Subsequently, the work plan followed during the development of the research is presented.

The third chapter of the thesis, called *Results, Analysis and Discussion*, is intended to describe the results obtained in each line of research according to the selected applications. At the same time, it includes a detailed analysis of the final scores, with special emphasis on statistical behaviour in those cases where the user's perception is evaluated. For line of research 1, the results obtained using acoustic methods for the quality control of small gearmotors are described. Regarding the second line, it is detailed everything associated to the acoustic pleasantness of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles as well as the annoyance caused by warning sounds (WS). Finally, in relation to the third line of research, the detectability of four wheel vehicles with and without acoustic alerting system (AVAS), at a speed of approximately 30 km/h, is established. Moreover, the behaviour of powered two-wheelers (PTW) is studied. In this case, the pedestrian's reaction time necessary to detect each vehicle is determined.

To end the first part, the conclusions obtained throughout the work are exposed in chapter 4. Then, some future lines of research related to the sound quality of industrial and consumer products are described. Finally, references consulted during the development of the thesis are listed.

The second part of the document includes the works sent or published in indexed journals. The compendium of publications consists of three papers. The first one focused on the effectiveness of different warning sounds, emphasising the importance of the urban environment for the detectability of the vehicle. The second work analyses the acoustic behaviour of powered two-wheelers, paying special attention to the pedestrian reaction time. Finally, in the last paper, the sound quality of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles is studied.



PARTE PRIMERA

Síntesis general de la tesis

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Introducción

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

1.1. Antecedentes y estado del arte

En un mercado cada vez más globalizado y accesible, donde el número de productos concebidos para cumplir una misma funcionalidad aumenta constantemente, los fabricantes deben realizar un mayor esfuerzo a la hora de diseñar sus productos. Gracias a las nuevas tecnologías y a los sistemas de información actuales, el consumidor es capaz de realizar un análisis más exhaustivo entre la oferta existente y, por tanto, aumentar sus exigencias en cuanto a calidad de producto se refiere.

De acuerdo con la Real Academia de la Lengua Española, el término *calidad* presenta diferentes acepciones. Así, podemos definir el concepto como “la adecuación de un producto o servicio a las características especificadas” o bien como “la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor”. A partir de estas definiciones, es posible separar el concepto de calidad en dos bloques diferenciados: calidad funcional y calidad perceptual.

La calidad funcional o calidad del producto en relación a su funcionamiento pretender ser un concepto puramente objetivo mediante el cual se evalúa el cumplimiento de las especificaciones marcadas en la fase de diseño. Por norma general, cada tipo de producto tiene asociado un estándar de calidad determinado, definido en la mayoría de casos a través de normativas internacionales, estatales o incluso propias del fabricante. Un claro ejemplo es el marcado CE, de carácter obligatorio para la comercialización de productos dentro del Espacio Económico Europeo (EEE), y cuya finalidad se centra en garantizar el cumplimiento de los requisitos de seguridad, sanidad y protección del medio ambiente dentro de la Unión Europea (UE). Para la obtención de dicho marcado, cada producto debe cumplir una normativa específica. En relación al comportamiento acústico de productos, la Organización Internacional para la Estandarización (*International Organization for Standardization - ISO*), en su catálogo 17.140 - *Acoustics and acoustic measurements* - incluye un grupo de normas que regulan el ruido emitido por diferentes equipos y medios de transporte [1 - 5]. Del mismo modo, describe los métodos empleados para evaluar diferentes parámetros acústicos y psicoacústicos [6 - 8].

En determinadas ocasiones, además de cumplir con los requisitos establecidos por las normas, los propios fabricantes, en línea con la estrategia empresarial definida por sus órganos de gobierno, desarrollan protocolos y regulaciones internas para definir la calidad de sus productos. Por norma general, estos protocolos resultan más estrictos, y su aplicación se extiende a cualquier componente que forme parte del producto terminado. Un claro ejemplo es el sector del automóvil, donde cada marca constituye sus propias especificaciones y métodos de ensayo. Así, podemos encontrar la normativa TL82398 [9] de Volkswagen, encargada de regular los requisitos funcionales

de los retrovisores exteriores con regulación eléctrica. El contenido de dicha norma será objeto de estudio a lo largo del presente trabajo.

Dentro del bloque definido como calidad funcional se enmarcan los procesos de control de producto empleados tradicionalmente en la industria. En este caso, los protocolos de análisis se aplican a lo largo de toda la cadena de producción con el objetivo de identificar aquellos componentes fuera del estándar definido por la empresa. Esta metodología, analizada desde el punto de vista acústico, será objeto de estudio en la línea de investigación 1 del presente trabajo.

En un segundo grupo se define la calidad perceptual, mediante la cual se establece una valoración del producto de acuerdo con las preferencias y necesidades del consumidor. Este concepto implica un grado de subjetividad mayor, y permite disponer una diferenciación entre productos con una misma funcionalidad. Tradicionalmente, atributos como la apariencia o la usabilidad han jugado un papel principal a la hora de evaluar subjetivamente la calidad. Sin embargo, el usuario presta cada vez más atención al comportamiento acústico del producto, llegando a ser un elemento de valoración clave a la hora de definir la excelencia. Por este motivo, el sonido debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño y utilizarse como valor añadido a la hora de sacar un nuevo producto al mercado. Diferentes aspectos relacionados con la calidad perceptual serán analizados en la línea de investigación 2 del presente trabajo.

En determinados casos, un producto puede cumplir los requerimientos de calidad establecidos tanto desde el punto de vista funcional como perceptual y, sin embargo, vulnerar de algún modo los principios de seguridad necesarios para su incorporación al mercado. En estos casos, se hace ineludible definir un nuevo conjunto de normas que definan las modificaciones oportunas del producto y garanticen su viabilidad. En el presente trabajo, estos casos se han definido como un grupo adicional de calidad, denominado calidad de seguridad. La incorporación de este nuevo pilar supone un avance cualitativo en la calidad funcional del producto, analizando aspectos no contemplados en las normas y cuyo estudio puede resultar de gran utilidad a la hora de establecer el comportamiento del producto en determinadas situaciones. Un claro ejemplo de calidad de seguridad se encuentra en la incorporación al parque móvil del vehículo eléctrico y en la reducción del ruido asociada a este nuevo sistema de propulsión. Este tema será tratado extensamente en la línea de investigación 3.

A lo largo de esta tesis se hará referencia exclusivamente a la calidad de producto desde un punto de vista acústico, denominada a partir de ahora como calidad sonora. Ésta se extenderá a los tres

bloques descritos anteriormente: funcional, perceptual y de seguridad; y se aplicará en cada caso a productos concretos.

1.1.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto

A lo largo del proceso de fabricación, es necesario establecer una serie de controles que garanticen el cumplimiento de los estándares de calidad y certifiquen las características del producto. Los métodos empleados para ello varían en función de las propiedades que se analizan en cada caso. Así, podemos encontrar indicadores y parámetros destinados a controlar la calidad del proceso productivo, o bien el funcionamiento del producto, su seguridad o su salubridad.

Por lo que respecta al proceso de producción, el control de calidad tiene como objetivo verificar el estado de las diferentes etapas de fabricación del producto, monitorizando las variables involucradas en el mismo. De esta forma, podemos encontrar desde el control de temperatura de un horno en procesos de temple, hasta sistemas de visión artificial para la identificación de componentes en un ensamblaje. Las técnicas de monitorización y control empleadas en este tipo de calidad han evolucionado considerable durante los últimos años. La incorporación de nuevas tecnologías al proceso productivo ha dado lugar a sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*, más complejos. Herramientas como la realidad aumentada o el *datamining* [10, 11] resultan de gran utilidad a la hora de desarrollar sistemas de fabricación flexibles, robustos y con un grado de eficiencia superior.

De acuerdo con las características de funcionamiento del producto, podemos establecer una diferenciación clara entre dos puntos de vista de la calidad. En primer lugar, encontramos el control llevado a cabo por parte de la administración. Con el objetivo de proteger al consumidor se ha promovido el desarrollo de normas para fijar estándares de calidad de ciertos productos en relación a propiedades como la durabilidad, el ruido generado o el consumo. Esta regulación, de obligatorio cumplimiento y “de mínimos”, describe los parámetros más relevantes en cada caso, así como los protocolos de medida que deben ser empleados. Un claro ejemplo lo encontramos en el sistema de etiquetado energético de los electrodomésticos, regulado según la Directiva 92/75/CEE [12]. En este caso, gracias al sistema de clasificación desarrollado, el usuario es capaz de valorar, de manera previa a la compra del producto, el consumo de energía de lavadoras, lavavajillas, frigoríficos, etc. La información se refleja en una ficha de producto que incluye la categoría energética y otros datos específicos del electrodoméstico como puede ser la potencia acústica emitida. En relación al comportamiento acústico del producto, existen un gran número de normas que describen los

protocolos que se deben seguir para determinar los parámetros más relevantes. De esta forma se garantiza que la información de todos los productos se obtenga de la misma manera, facilitando la comparación entre todos ellos. Por un lado, podemos encontrar normas de carácter global como la ISO 11201 [2], relativa al ruido emitido por máquinas y equipos, o la ISO 3741 [1], cuyo objetivo se centra en definir la metodología para establecer los niveles de potencia y energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. En otros casos, la regulación se centra en una aplicación o producto más concreto, como es el caso de la ISO 6395 [13], orientada al ruido producido por maquinaria para el movimiento de tierra; la ISO 9902 [14], relativa al ruido en maquinaria textil; la ISO 13261 [15], enfocada al ruido producido por aires acondicionados y bombas de calor; o la ISO 13347 [16], ligada al comportamiento acústico de ventiladores industriales.

Siguiendo con la calidad relativa al funcionamiento del producto, podemos destacar un segundo punto de vista en el que el control tiene lugar de manera interna en el seno de la empresa. En este sentido, la valoración del producto se lleva a cabo con objeto de verificar ciertos parámetros definidos en la etapa de diseño, así como el correcto funcionamiento de cada muestra. Este es un proceso que tiene lugar a lo largo del ciclo de vida del producto y especialmente al final de la cadena de producción, como etapa previa a la comercialización del producto. A modo de ejemplo, podemos encontrar controles de calidad internos destinados a verificar el consumo de energía en aparatos electrónicos, el par proporcionado por un motor en condiciones de carga, la respuesta en frecuencia correspondiente a un transductor acústico o el estado de una máquina. La metodología consiste en realizar una comparación entre el valor teórico de un parámetro concreto y el obtenido de forma experimental. Aquellos productos con una desviación significativa, son clasificados como defectuosos y por tanto descartados para su comercialización. Por lo que respecta a la monitorización y el diagnóstico de maquinaria, el procedimiento estándar se encuentra definido en la norma ISO 17359 [17]. En el texto se define tanto el proceso de medida a realizar como el análisis necesario para el diagnóstico y pronóstico de la máquina. Asimismo, se dan numerosos ejemplos de parámetros y técnicas empleadas en la detección de diferentes fallas. Esta normativa es de carácter general y, por tanto, no establece una distinción específica entre métodos de análisis. Sin embargo, la norma ISO 13373 [18] se centra en la monitorización y el diagnóstico de maquinaria a partir de medidas de vibración, resultando de gran interés para el objeto de esta tesis. A lo largo de esta norma se describe el proceso básico para la implementación de un sistema de monitorización de las vibraciones, definiendo los componentes necesarios, el tipo de medidas que deben ser

realizadas, el tipo de transductores que deben ser empleados y su colocación, el acondicionamiento de señal necesario, y las técnicas de procesamiento y análisis empleadas en cada caso.

Dentro de una máquina podemos establecer una diferenciación clara entre dos tipos de componentes: elementos estáticos y elementos móviles. Por norma general, las partes móviles serán las responsables del ruido generado por la máquina [19]. En este sentido, los engranajes juegan un papel fundamental, siendo el método más utilizado para la transmisión de movimiento y potencia en la ingeniería actual. Los engranajes permiten, a través de su rotación, transmitir fuerza y movimiento a otros componentes de la máquina. Uno de los usos más extendidos de los engranajes son las reducciones, donde se convierte el movimiento a la entrada del dispositivo en un movimiento de salida con una velocidad inferior y un par considerablemente mayor [20]. Sin embargo, la interacción entre los diferentes engranajes que componen la cadena cinemática pueden originar ruidos indeseados; variaciones en las fuerzas involucradas en el movimiento favorecen la aparición de vibraciones, que a través de ejes y rodamientos son transmitidas al resto de la estructura y radiados al exterior (figura 1).

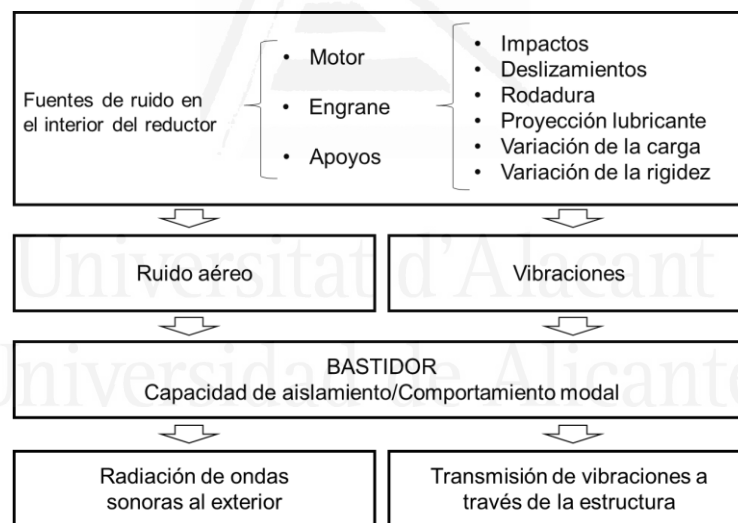


Figura 1. Esquema de generación de ruido en máquinas.

Un mal diseño de los engranajes puede favorecer esta situación, por lo que habrá que prestar suma atención en esta etapa. Del mismo modo, el proceso de fabricación resulta trascendental a la hora de evitar ruidos. La aparición de excentricidades en los engranajes, desbalanceos o desalineamientos en los componentes derivarán en un incremento de la vibración. La reducción del ruido pasa por disminuir la excitación en los dientes de los engranajes y evitar la transmisión de las vibraciones, labor ardua complicada en muchos casos. Asimismo, a lo largo del ciclo de vida de un engranaje pueden aparecer diferentes defectos o fallas. De acuerdo con la literatura, las fallas son

clasificadas de distintas maneras en función de cada autor. Así, Niemann et. al. en [21] establece dos grupos distintos basados en si el defecto está o no relacionado con la lubricación del engranaje. Shipley en [22] constituye una clasificación de los defectos según los fenómenos que los originan. Esta clasificación ha sido incorporada posteriormente a la normativa desarrollada por la *American National Standards Institute/American Gear Manufacturers Association* [23] según la tabla 1, haciendo una distinción entre la clase de defecto y el modo en que se origina.

Tabla 1. Clasificación de fallas en engranajes según ANSI/AGMA 1010-E95 [25].

CLASE	MODO
Desgaste	Adhesión
	Abrasión
	Pulido
	Corrosión
	Corrosión por fricción
	Decapado
	Cavitación
	Erosión
	Descarga Eléctrica
	Ondulaciones
Gripado	Gripado
Deformación Plástica	Deformación Plástica
Fatiga por contacto	Picadura
	Micro-picadura
	Fatiga
Agrietamiento	Grietas por endurecimiento
	Grinding cracks
	Grietas en los bordes o la web
	Separación del núcleo
	Grietas por fatiga
Rotura	Rotura por fragilidad
	Rotura por ductilidad
	Rotura mixta
	Cizalla de diente
	Rotura después de deformación plástica
Fatiga por flexión	Ciclos bajos de fatiga
	Altos ciclos de fatiga

Desgaste

De acuerdo con [20], el desgaste es un defecto superficial que se produce por eliminación de pequeñas capas de material debido al contacto entre los dientes de los engranajes. Su aparición se debe a diferentes fenómenos, entre los que destaca la abrasión y la adhesión. En el primer caso, el desgaste se produce por el contacto de la superficie con partículas abrasivas, lo que origina el desprendimiento de materia y el consecuente deterioro del engranaje (figura 2). En el segundo caso, desgaste por adhesión, la pérdida de material se debe a las fuerzas de atracción entre las partículas de las superficies en contacto. Otro fenómeno destacable en el desgaste del engranaje corresponde a la corrosión. En este caso, el deterioro de la superficie por pérdida de material tiene lugar debido a un proceso químico, generalmente producido por los aditivos incluidos en la lubricación.

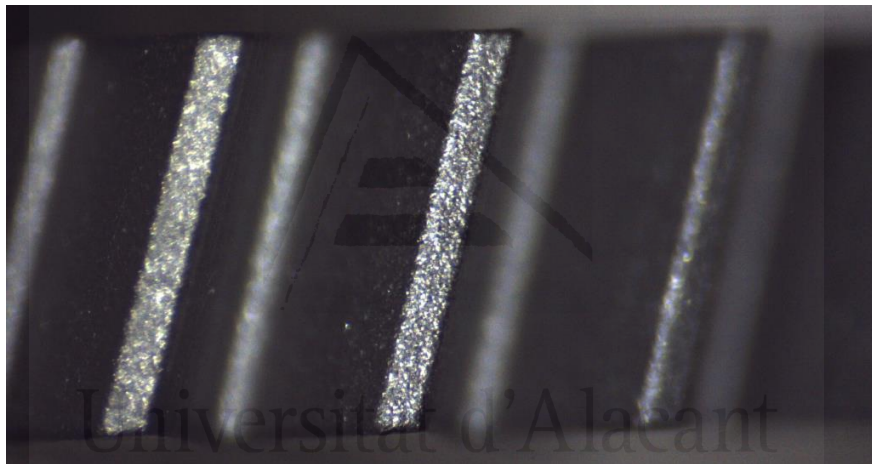


Figura 2. Ejemplo de desgaste en el flanco y en la cabeza del diente, para un engranaje helicoidal, debido a un proceso de granallado.

Gripado

El gripado o agarrotamiento se debe a la soldadura entre las partes en contacto por deslizamiento entre ellas. La aparición de este fenómeno lleva asociada la transferencia de materia, lo que origina a un deterioro de la zona activa del diente en los engranajes. Su aparición se debe a condiciones de lubricación muy baja.

Deformación plástica

Las fuerzas existentes en los flancos de los dientes en contacto pueden llevar a la deformación plástica de los mismos, originando un deslizamiento de material. Como consecuencia, se producirán estrías y rebabas en la cabeza del diente, cambiando las características geométricas del mismo y provocando la aparición de ruidos y vibraciones.

Fatiga por contacto

Los elementos incluidos en la cadena cinemática se verán sometidos a esfuerzos de forma repetida. Este proceso, sumado a la aplicación de tensiones de contacto por encima del límite de fatiga superficial del material, dará como resultado el picado superficial del diente y el deterioro del mecanismo [19] (figura 3).

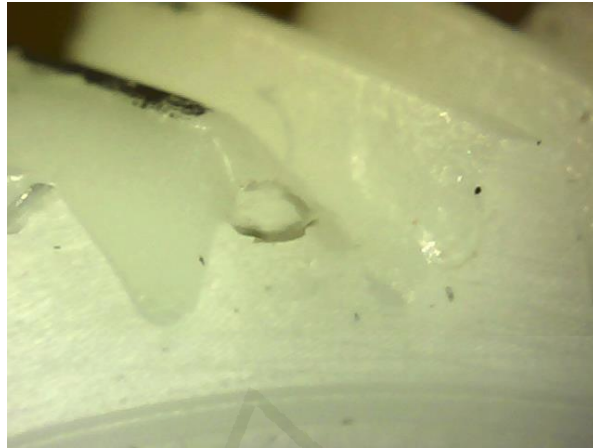


Figura 3. Picado en la superficie del diente de un engranaje.

Agrietamiento y rotura

El agrietamiento y rotura del engranaje tiene su origen en el aumento de las tensiones en el pie del diente debido a la flexión del mismo (figura 4). La rotura puede producirse por dos fenómenos: sobrecarga y fatiga. En el primer caso, rotura por fatiga, el defecto se produce como consecuencia de ciclos repetitivos de carga, y da lugar a la aparición de pequeñas grietas cuyo tamaño se incrementa con el tiempo. En el segundo caso, la rotura se debe a la utilización de cargas bruscas o excesivas, y se produce de forma rápida y violenta.

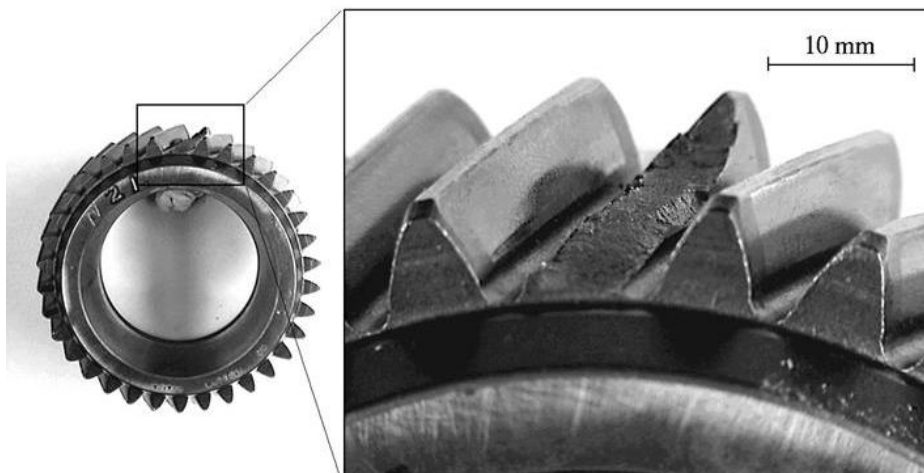


Figura 4. Rotura en un diente del engranaje.

Fatiga por flexión

Los engranajes están sometidos a esfuerzos considerables tanto en la dirección radial como axial, provoca la deformación y flexión del diente en contacto. Ciclos de carga elevados y repetitivos, por encima del límite de flexión del material, provocarán la aparición de grietas en la base del diente y la inevitable rotura con el tiempo.

La aparición de cada una de estas fallas tiene un efecto determinado sobre el comportamiento acústico y vibratorio de la máquina [19, 24], por lo que el análisis del ruido producido permitirá determinar el estado del producto. La monitorización puede llevarse a cabo a partir del ruido radiado (en inglés *Acoustic Emission*, AE) o la vibración transmitida. El primer caso ha estado asociado generalmente al ensayo de estructuras estáticas. Sin embargo, estudios más recientes demuestran su eficacia en el análisis de maquinaria rotativa [25, 26]. Bechhoefer et al. en [27] concluyen que el análisis de la señal de ruido emitido por la máquina ofrece resultados tres veces más significativos que con señales de vibración. A pesar de ello, el uso del sonido radiado queda restringido a aquellas situaciones donde el ruido ambiental no suponga un impedimento y, por tanto, su utilización en entornos industriales resulta inapropiado.

El análisis de vibraciones ha sido ampliamente utilizado en la detección de fallas mecánicas, constituyendo una herramienta de gran utilidad para el mantenimiento predictivo [28, 29]. Frecuentemente, este tipo de análisis se apoya en la creación de un histórico de medidas cuya deriva es muestra significativa de un funcionamiento incorrecto [30].

La monitorización del estado de una máquina se lleva a cabo, por norma general, a partir del análisis de las señales de vibración transmitidas por vía estructural al bastidor de la misma. Debido a la gran variabilidad existente en este tipo de señales, la comparación directa entre un patrón de vibración y la excitación real producida por la máquina no proporciona un diagnóstico acertado. En la mayoría de los casos las vibraciones resultan complejas y fuertemente contaminadas por ruido de fondo. Por ello, se hace necesaria la utilización de técnicas de preprocesamiento de señal que garanticen el correcto funcionamiento de los métodos [31]. Así, puede resultar necesario el acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores, amplificándolas o filtrándolas. Una técnica de procesado de señal muy extendida corresponde al promediado síncrono temporal o *Time Synchronous Averaging* (TSA), a partir del cual es posible diferenciar entre patrones periódicos de una señal y el ruido aditivo. El método consiste en dividir la señal de vibración en pequeños fragmentos de igual longitud. El promediado de todos ellos permitirá cancelar las componentes aleatorias del ruido y por tanto, resaltar los patrones periódicos correspondientes al estado de la

máquina. Esta técnica requiere de un conocimiento muy preciso del funcionamiento de giro de la máquina y en muchos casos se hace necesario el uso de señales de tacómetro como método de sincronización. Otras técnicas de preprocesamiento se basan en analizar el residuo existente en la señal de vibración al eliminar las componentes espectrales de las partes en movimiento (ejes, engranajes, etc.). En otros casos, se hace uso de la envolvente de la señal de vibración como elemento de análisis de la máquina.

Una vez acondicionada la señal, los métodos de análisis empleados para determinar el estado de la máquina pueden clasificarse en tres grupos según la naturaleza del proceso empleado: temporal, frecuencial o temporal-frecuencial; definiéndose métricas específicas en cada uno de los casos [31]. Generalmente, la detección de fallas se lleva a cabo por medio de estadísticos cuya función consiste en describir de forma objetiva algunas de las características intrínsecas de la señal. En este sentido, pueden establecerse dos grupos de parámetros: estadísticos globales y estadísticos locales. En el primer caso, se estudia el comportamiento de la señal de vibración desde un punto de vista global [32-38]. Mediante este tipo de parámetros resulta complicado detectar adecuadamente la aparición de eventos de corta duración a lo largo de la señal, ya que el peso específico de éstos en comparación con el resto de valores de la serie temporal es prácticamente despreciable. En el segundo caso, correspondiente a estadísticos locales, se lleva a cabo un análisis más detallado de la señal, de carácter micro. Así, se analizan pequeñas variaciones que puedan surgir en una región temporal concreta o en una banda determinada de frecuencias, evitando el enmascaramiento debido a partes con mayor relevancia dentro de la señal [39, 40].

En la tabla 2 se enumeran algunos de los parámetros más importantes empleados en la detección de fallas en engranajes. Algunos de ellos serán tratados con mayor detalle en la sección 2.1. *Metodología.*

Tabla 2. Resumen de los parámetros empleados frecuentemente en la detección de fallas en engranajes según la literatura.

INDICADOR	DEFECTO
Valor medio cuadrático, rms	Progresión de fallas generales
Factor de cresta	Vibraciones de carácter impulsivas debido a rotura de dientes
Desviación estándar	Desalineamiento, excentricidades
Curtosis	Rotura y desgaste
Factor de forma	Desalineamiento, excentricidades
Ratio Energía	Desgaste severo
Operador Energía, EOP	Picado
FM0	Desgaste, picado, doblado diente
FM4	Desgaste, picado, doblado diente
M6A	Daños superficiales
M8A	Daños superficiales
NA4	Daños progresivos
NA4*	Daños progresivos
NB4	Fallas localizados
Delta RMS	Progresión de fallas generales
Factor de nivel de bandas, SLF	Desalineamiento
Índice de bandas laterales, SI	Indicador de la calidad del diente
Clearance Factor	Rotura de diente
Indicador de Impulso	Rotura de diente
Frecuencia media	Progresión de fallas generales
Centroide espectral	Progresión de fallas generales
Frecuencia media cuadrática, RMSF	Progresión de fallas generales
Standard Deviation Frequency, STDF	Progresión de fallas generales
Curtosis espectral	Rotura y desgaste
Entropía	Progresión de fallas generales
NP4	Fallas localizadas

1.1.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto

Atendiendo a la percepción subjetiva del usuario, la calidad de un producto depende de diferentes características. Tradicionalmente, atributos como la apariencia o la usabilidad han jugado un papel de vital importancia en la valoración del producto. Sin embargo, el usuario presta cada vez más atención a la calidad sonora, a partir de la cual es posible obtener gran información acerca del estado del producto y mejorar la experiencia. Por este motivo, el sonido debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño de producto y utilizarse como valor añadido a la hora de ponerlo en el

mercado. En este sentido, Fog en [41] define un diagrama para la optimización de la calidad sonora del producto (figura 5).



Figura 5. Diagrama de optimización de la calidad acústica de un producto según Fog [41].

El método parte de diferentes sonidos de los cuales se realiza un análisis objetivo por medio de diferentes métricas de calidad sonora: *loudness, sharpness, roughness, fluctuation strength or tonality* [42]; así como un análisis espectral de las muestras. Por otro lado, los sonidos son empleados en ensayos auditivos para su evaluación de forma subjetiva por medio de un grupo de personas. A partir de los descriptores objetivos y la percepción subjetiva de los usuarios es posible establecer una correlación entre ambos, definiendo métricas de calidad sonora y definiendo el error existente respecto al sonido deseado.

Existen distintos métodos para llevar a cabo la evaluación subjetiva de un sonido: método de ranking, comparación de parejas, categorización o diferencias semánticas entre otros [43]. Cada método presenta ventajas e inconvenientes. Parizet et al. en [44] llevan a cabo una comparación entre seis métodos distintos de evaluación psicoacústica en términos de precisión y tiempo de ejecución. El primer método utilizado evalúa los sonidos uno a uno sobre una escala continua de acuerdo con un adjetivo establecido. El segundo método se basa en el mismo principio de evaluación, pero en este caso el usuario tiene acceso a todos los sonidos al mismo tiempo. El método tres corresponde a un ensayo de tipo comparación por parejas, donde se presentan al usuario dos sonidos, debiéndose indicar cual resulta más agradable. En cuarto lugar, se utiliza de nuevo un método de comparación de parejas, pero en este caso el usuario dispone de un número mayor de respuestas a elegir en su comparación (mucho más, más, igual). El quinto método también consiste en una comparación por parejas, pero en lugar de tener un número limitado de respuestas como sucedía en el método cuatro, el usuario puede responder en una escala continua

entre dos valores opuestos de agradabilidad. Por último, el método 6 permite indicar el grado de similitud entre dos sonidos por medio de una escala continua. El autor obtiene resultados similares para la evaluación de la agradabilidad por medio de los cinco primeros métodos. Sin embargo, concluye que el método de comparación de parejas proporciona una dispersión menor en las respuestas y, por tanto, garantiza una separación mejor entre muestras. En contrapartida, supone uno de los métodos más costosos en cuanto a tiempo de ejecución se refiere. Asimismo, el autor concluye que el segundo método de ensayo, considerado una versión del proceso de ranking puesto que evalúa todos los sonidos al mismo tiempo, puede suponer una elección acertada, llegando a un buen compromiso entre precisión y tiempo de evaluación. Del mismo modo, Wickelmaier et al. en [45] concluyen que la evaluación por el método de comparación de parejas y el procedimiento de ranking proporciona resultados similares, pero con diferencias sustanciales en el tiempo de evaluación.

En la actualidad, los ensayos psicoacústicos son utilizados en numerosos sectores de la industria. Así, podemos encontrar en la literatura numerosos ejemplos donde el sonido generado por un producto es analizado con el fin de mejorar la calidad del mismo. Horvat et al. en [46] analizan la calidad sonora de herramientas eléctricas de mano: taladradoras, sierras circulares y sierras de calar (figure 6). El objetivo consiste en determinar los criterios más relevantes en la evaluación subjetiva del usuario. Para ello, establecen dos grupos de estímulos: el primero, compuesto por un total de 19 dispositivos, es usado como set principal para el desarrollo de un modelo perceptual; el segundo grupo se emplea para la validación del modelo. Los autores emplean dos métodos de evaluación durante los ensayos: escala de categorías y diferencias semánticas. Los resultados revelan una correlación significativa entre la percepción del usuario y parámetros como la sonoridad, la agudeza o la fluctuación.



Figura 6. Herramientas de mano analizadas en [46].

Altinsoy et al. en [47] estudian la calidad sonora de diferentes modelos de lavadora. Para ello, los autores llevan a cabo diferentes ensayos auditivos en los que evalúan la molestia del ruido mediante una escala continua. El estudio concluye que los parámetros de sonoridad, agudeza,

aspereza y tonalidad resultan importantes a la hora de describir la percepción del usuario, proporcionando un índice de calidad sonora específica para este tipo de electrodoméstico.

La automoción es uno de los sectores que más ha profundizado en el uso de técnicas psicoacústicas, desarrollando métricas y herramientas para el análisis y la evaluación de la calidad sonora en el interior y exterior del vehículo, incorporándolas a su vez al diseño de producto. Las primeras investigaciones se centraron en establecer la calidad sonora del vehículo en relación al sistema de propulsión. Hastings et al. en [48] analizan el efecto del tiempo y presión de combustión en la calidad sonora de un motor diesel. Los autores aprecian una relación entre el análisis objetivo y la percepción subjetiva de los sonidos estudiados. Del mismo modo, Parizet et al. en [49] analizan la falta de confort debida al ruido en el interior de un autobús por medio de tres ensayos. El primero de ellos analiza los diferentes factores que pueden causar molestia acústica en el interior del autobús en funcionamiento. Para ello hacen uso de muestras sonoras grabadas de forma binaural y realizan ensayos psicoacústicos por el método de categorización continua introducido por Weber [50]. En el ensayo participan 52 personas y se concluye que eventos como la aceleración o deceleración, la apertura de ventanas, el accionamiento del sistema neumático o el encendido de la ventilación suponen los eventos que mayor molestia provocan en el usuario. A partir de estas conclusiones, un segundo ensayo trata de modificar los sonidos más críticos para establecer un mecanismo de corrección. En este caso se utiliza un ensayo de comparación por parejas donde participan 48 personas. Las conclusiones muestran una dependencia de la agradabilidad con la sonoridad del evento. En un tercer estudio se realiza la comparación entre la secuencia de audio original y una versión modificada. Los resultados obtenidos coinciden con el primer ensayo. Por otro lado, Nosulenko et al. en [51] realiza una comparación entre el ruido generado por siete vehículos diésel en ralentí con el fin de establecer la calidad sonora de los mismos. Los autores emplean el método de comparación de parejas sobre un total de 71 participantes separados en dos grupos: conductores y no conductores. Del mismo modo, se lleva a cabo un análisis verbalizado de los sonidos, permitiendo comparar los resultados de un análisis emocional con la preferencia establecida por el método de comparación de parejas. El estudio pone de manifiesto una alta correlación entre la frecuencia de uso de ciertos atributos y las preferencias de ruido, así como ciertas diferencias en la evaluación llevada a cabo por conductores y no conductores. Del mismo modo, Patsoauras et al. en [52] llevan a cabo un ensayo psicoacústico para definir la calidad sonora de diferentes vehículos en ralentí en función del sistema de propulsión empleado. El autor pone de manifiesto las diferencias existentes entre vehículos de gasolina y diésel en relación a la percepción

sonora. Asimismo, señala una alta correlación entre los parámetros psicoacústicos tradicionales y la sensación de agrado sonoro indicada por el oyente en el caso de motores diésel.

Pero la calidad sonora de un vehículo no solo se debe al ruido generado por el sistema de propulsión. Con el paso de los años, las técnicas psicoacústicas se han extendido a otros componentes. Así sucede con las puertas del vehículo, cuyo sonido de apertura o cierre supone un indicativo de calidad para el usuario, pudiendo llegar a ser decisivo en el proceso de compra del mismo. Kuwano et al. en [53] analizan la relación entre la percepción subjetiva del sonido generado por el cierre de la puerta de 11 vehículos y la imagen que el usuario tiene del vehículo. El ensayo se basa en el método de diferencias semánticas y tiene lugar en Japón y Alemania, con un total de 40 participantes. Los autores concluyen que hay una correlación entre la imagen que el usuario tiene del vehículo y el sonido que se genera al cerrar la puerta de este. En otro trabajo, Parizet et al. [54] analizan la calidad sonora de las puertas de 17 vehículos pertenecientes a ocho fabricantes distintos. En un primer ensayo, los autores reducen el número de estímulos según las agrupaciones realizadas por 31 participantes en función de diferentes adjetivos. Mediante el set de estímulos reducido, llevan a cabo dos nuevos ensayos para determinar el espacio perceptual de los sonidos: verbalización y preferencia. El trabajo pone de manifiesto que los usuarios tienen expectativas similares en cuanto a la calidad sonora de las puertas del vehículo. En este caso, el ensayo de verbalización revela que la agradabilidad no es una cualidad útil para describir la percepción subjetiva según los usuarios. El trabajo propone un modelo para establecer la calidad sonora del cierre de la puerta en función del centroide espectral y de lo limpio que sea el sonido. En un estudio más reciente Wonjoon et al. [55] determinan, mediante el análisis de 26 vehículos y ensayos psicoacústicos sobre 30 oyentes, que parámetros como *SharpnessZ*, *short-term loudness* o la aspereza son fundamentales a la hora de mejorar la percepción subjetiva del usuario respecto a la apertura de la puerta del vehículo. Del mismo modo, destacan los adjetivos silencioso y claro como principales cualidades a la hora de describir la sensación percibida por el oyente. Por otro lado, Volandri et al. en [56] desarrollan un estudio preliminar de la calidad sonora de ventanillas con accionamiento eléctrico en vehículos. Para este estudio, los autores realizan la adquisición del ruido generado por diferentes accionamientos. La evaluación de los sonidos se lleva a cabo mediante la aplicación de métricas actuales como SPL (dBA), RMS, curtosis o diferentes parámetros psicoacústicos. El trabajo destaca la necesidad de realizar ensayos psicoacústicos para establecer una correlación entre parámetros objetivos y la percepción subjetiva del usuario. Igualmente, Hyeonho et al. en [57], estudian la calidad acústica de seis modelos de ventanilla, realizando ensayos auditivos sobre un total de 76 participantes. Los autores proponen, a partir de la

correlación entre evaluación subjetiva y parámetros de calidad sonora, una métrica para describir las preferencias del usuario.

Un nuevo ejemplo de aplicación donde la calidad percibida por el usuario juega un papel fundamental se encuentra en los sistemas acústicos de alarma. Las señales de advertencia se emplean en un gran número de situaciones cotidianas, permitiendo al usuario interactuar con el entorno de forma segura. Los estímulos visuales y sonoros son los más extendidos, resultando un factor clave en la interacción entre consumidor y producto (figura 7).

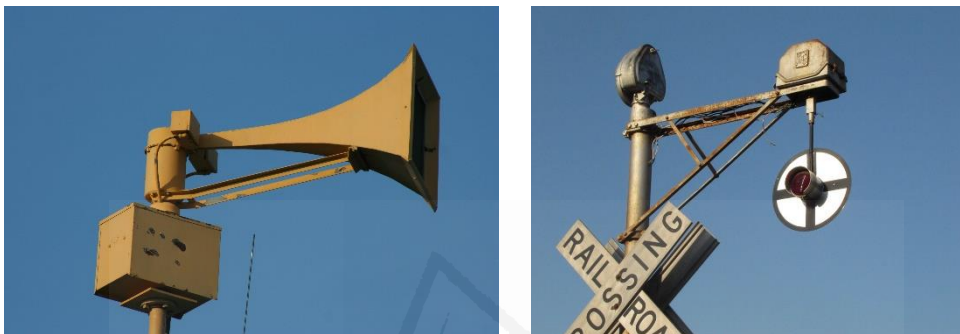


Figura 7. Ejemplos de sistema de alerta acústico (izq) y luminoso (dch).

Podemos fijar una separación entre señales de advertencia en función de la misión para la que han sido diseñadas. En un primer grupo, tenemos todas aquellas señales enfocadas a informar al usuario del estado de un producto, proceso o acción. Así, podemos encontrar ejemplos como el cambio de color en un pulsador al ser accionado, el sonido emitido al solicitar la parada en una línea de autobús, el indicador de obligatoriedad del cinturón en un avión, el sistema de colores de un semáforo, el sonido generado por un teléfono móvil al recibir un mensaje, o el indicador de fallo en algún componente de un vehículo. En un segundo grupo, podemos incluir todas aquellas situaciones donde la señal de advertencia tiene como objetivo alertar al usuario de un peligro. Este es el caso de las sirenas incluidas en vehículos de emergencia, el indicador de marcha atrás en vehículos pesados, o los sistemas de detección de incendios.

En muchos casos, el diseño de los sistemas de advertencia se ha llevado a cabo exclusivamente desde un punto de vista funcional. Por lo que respecta a los dispositivos acústicos, la detectabilidad y el enmascaramiento han centrado gran parte de la atención [58]. Sin embargo, cada vez más la tendencia pasa por estudiar los sistemas de alerta de una forma más global, incluyendo tanto la funcionalidad del dispositivo como la percepción sonora del mismo por parte del usuario. Lemaitre et al. en [59] analizan el sonido producido por bocinas de vehículos desde la perspectiva psicoacústica. En un primer estudio, clasifican un total de 43 sonidos en distintas categorías según

la similitud establecida mediante ensayos auditivos por 28 participantes. En un segundo ensayo, con un grupo de señales más reducido, obtienen aquellos parámetros más significativos por medio de una comparación entre parejas. Los resultados determinan que los parámetros rugosidad, centroide espectral y estructura espectral de la envolvente describen las dimensiones perceptuales definidas por los oyentes. Por otro lado, Marshall et al. en [60] estudian la influencia de las características auditivas de diferentes sonidos de alerta en la percepción de urgencia y molestia del evento. Para ello, realizan tres ensayos psicoacústicos sobre un total de 72 participantes, incluyendo como característica adicional tres escenarios de conducción diferente. Los resultados muestran una influencia significativa de todos los parámetros analizados sobre la molestia sonora y la percepción de urgencia. En [61], Balastegui et al. analizan la potencia sonora óptima y el contenido espectral de sirenas teniendo en cuenta la molestia producida en cada caso. Para ello, los autores hacen uso de ensayos auditivos en los cuales toman parte 25 oyentes. Para cada sonido, los participantes deben seleccionar el grado de molestia y urgencia percibida según una escala continua. Los resultados destacan una posible mejora en la detectabilidad de los sonidos de advertencia por medio de la potencia sonora y la composición espectral de la señal sin aumentar la molestia de forma significativa.

Tal y como se describe en la línea de investigación 3, el bajo nivel de ruido generado por los vehículos eléctricos supone un riesgo para la seguridad de peatones y demás usuarios de la vía. Para paliar este efecto, se ha establecido como solución la instalación de un sistema acústico de alerta cuyo objetivo se centra en mejorar la detectabilidad del vehículo. Esta medida puede suponer una disminución de la calidad sonora de determinadas zonas urbanas, modificando el paisaje sonoro y generando entornos más molestos para los ciudadanos. Además, se debe tener en cuenta que por primera vez los fabricantes podrán diseñar el sonido emitido por sus vehículos, lo que a largo plazo supondrá una herramienta de marketing muy importante. Por ello, a la hora de seleccionar un sonido de advertencia, no solo debe tenerse en cuenta su capacidad para ser detectado, sino que también debe prestarse atención a la molestia sonora que supondrá para el peatón. En este sentido, algunos trabajos analizan la detectabilidad de diferentes sonidos de advertencia incluyendo ensayos subjetivos de agradabilidad. Parizet et al. en [62] estudian la influencia de tres factores relacionados con el timbre en la detectabilidad del sonido. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto eVADER, financiado por la Unión Europea y destinado a desarrollar un prototipo de vehículo eléctrico con sistema automático de detección de peatones y AVAS. Los autores analizan la molestia sonora de los sonidos de alerta diseñados por medio de ensayos auditivos. Un total de 145 participantes toman parte en el ensayo. Los resultados indican que la

molestia creada por el ruido del vehículo se incrementa con el uso de sonidos de advertencia, especialmente en aquellos casos donde se introduce algún tipo de modulación en la señal. En otro estudio [63], Jacobsen et al. introducen un modelo de predicción de la detectabilidad y la molestia sonora de sonidos de advertencia basado en el modelo de sonoridad parcial de Moore-Glasberg [64 - 66]. La molestia se evalúa en una escala continua, bajo diferentes condiciones de ruido de fondo. Los resultados indican que la sonoridad parcial no puede predecir por sí sola la molestia creada por los sonidos y sin embargo, se aprecia una correlación elevada entre los dos parámetros.

1.1.3. Línea de investigación 3: calidad de productos en términos de seguridad

Otro caso donde la calidad viene impuesta por la administración corresponde a los estándares de calidad en términos de seguridad y salubridad del producto. A modo de ejemplo, la directiva 2009/48/CE [67] establece los requisitos fundamentales para garantizar la seguridad de los juguetes. Para ello, se introducen una serie de disposiciones relacionadas con el ruido generado, los productos químicos empleados en el proceso productivo o el peligro de asfixia que supone la combinación de juguetes y productos alimenticios.

Un ejemplo claro de calidad de producto en términos de seguridad se puede encontrar en los vehículos eléctricos (EV). El uso de este tipo de vehículos ha supuesto un nuevo reto para la comunidad científica, especialmente en lo referente al comportamiento acústico (*NVH - Noise, vibration and harshness*), debiendo analizar y validar las herramientas actuales de predicción y caracterización. De acuerdo con [68], se estima un total de 20 millones de vehículos eléctricos en todo el mundo para el año 2020. Estas previsiones se han visto reducidas debido a al incremento en el precio de las baterías y a la crisis económica global. A finales de 2014 se encontraban en el mercado 665.000 vehículos eléctricos de cuatro ruedas, un 0.08% del total de vehículos. Por otro lado, cabe destacar el stock existente en China, consistente en 230 millones de e-bikes y 36.500 autobuses [69].

El vehículo eléctrico supone una reducción significativa de la contaminación ambiental en ciudades. La nula emisión de gases asociada a este tipo de sistemas de propulsión es una clara ventaja respecto a los vehículos convencionales. Asimismo, el uso de motores eléctricos reduce considerablemente el ruido generado. Normalmente, los vehículos eléctricos se alimentan por medio de baterías de corriente continua (DC). El voltaje provisto por las celdas es transformado en una señal de corriente alterna (AC) de magnitud y frecuencia determinada por medio de un inversor. Para ello, se emplea una técnica denominada modulación por ancho de pulsos, PWM

(*pulse-width modulation*). La frecuencia de conmutación para generar el PWM, junto con el ruido magnético proveniente del tren de propulsión eléctrico, son dos de las principales contribuciones al ruido emitido por los vehículos eléctricos. Asimismo, los ventiladores empleados para controlar la temperatura de las baterías también pueden ser considerados como fuentes de ruido.

La reducción en el nivel de presión sonora emitido por EVs en comparación con los vehículos de combustión interna (ICV) resulta evidente a velocidades por debajo de 50 km/h. En este caso, el ruido global emitido por el vehículo se debe principalmente al sistema de propulsión. Para velocidades por encima de 50 km/h, el contacto entre neumático y calzada o la aerodinámica comienzan a ser más relevantes, coincidiendo el ruido emitido por EVs y ICEVs. Este comportamiento queda reflejado en [70], donde se compara el nivel de presión sonora para diferentes vehículos en función de la velocidad de circulación. Resultados similares se obtiene en [71, 72] al comparar diferentes sistemas de propulsión.

El uso de EVs puede significar un cambio drástico de los paisajes sonoros en entornos urbanos, teniendo un impacto positivo en términos de salud. Cerca de 20.000 personas mueren al año como consecuencia de patologías derivadas del ruido [73]. Sin embargo, vehículos excesivamente silenciosos pueden suponer un inconveniente desde el punto de vista de la seguridad vial. Una disminución en la detectabilidad del vehículo supone un incremento del riesgo para peatones, ciclistas y demás usuarios de la vía. L. Garay et al. en [74] muestran el incremento en el tiempo de respuesta de un peatón en presencia de un vehículo eléctrico. Resultados similares se obtienen en [75]. Según [76], la probabilidad de accidente con un peatón se duplica en presencia de un vehículo híbrido en comparación con los de combustión interna.

Con el objeto de mejorar la detectabilidad de los vehículos eléctricos de cuatro ruedas, algunas administraciones gubernamentales han establecido la necesidad de incorporar un sistema de advertencia. Este sistema debe, bajo condiciones de velocidad determinadas, emitir un sonido que permita alertar al peatón de la presencia del vehículo. En cualquier caso, el sistema no debe contribuir a incrementar la contaminación acústica. El uso de este tipo de dispositivos ha sido tratado en la literatura en numerosas ocasiones. K. Yamauchi compara en [77] el nivel de presión necesario para detectar diferentes sonidos de advertencia en distintos ambientes urbanos. E. Parizet et al. estudian en [78] la detectabilidad de diferentes sonidos de advertencia comparando el tiempo de reacción en personas con visión normal y personas con algún tipo de diversidad funcional visual. Este trabajo pone de manifiesto las bondades de los sonidos de advertencia en el incremento de la detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas.

En la actualidad, diferentes países han desarrollado normativa específica para regular el uso de los sistemas acústicos de advertencia de vehículos eléctricos [79 - 81]. Los primeros borradores se han centrado en definir las características del ruido que debe ser emitido, así como las condiciones de tráfico en las que deben ser activados. Como norma general, se recomienda el uso de sonidos que emulan el ruido de un vehículo de combustión interna. Asimismo, se establece como velocidad máxima de funcionamiento 30 km/h.

1.2. Planteamiento del problema

Línea de investigación 1

Tal y como se describió en el apartado anterior, existen un gran número de técnicas y parámetros definidos en la literatura cuya función se centra en la detección de fallas en engranajes y maquinaria en general. Sin embargo, en ciertas situaciones, dichas técnicas pueden no ser del todo útiles. El análisis de elementos con un tamaño reducido, frecuencias de rotación bajas y una holgura considerable entre sus componentes, hace que los resultados fluctúen de manera significativa, complicando el diagnóstico. Del mismo modo, técnicas como el análisis de orden o el promediado síncrono temporal, requieren del uso de una señal adicional de tacómetro que permita conocer en todo momento el estado de giro de los componentes analizados. Este tipo de señales no se encuentra presente en todos los equipos del mercado, por lo que en la mayoría de los casos resulta complicado obtener resultados satisfactorios. Asimismo, otras técnicas se basan en el análisis de la evolución temporal de determinados parámetros, lo que requiere de un histórico de medidas del que no se dispone para productos recién fabricados. El uso de parámetros individuales para el análisis de fallas no resulta lo suficientemente efectivo, debiéndose establecer una relación entre diferentes métricas para una mayor seguridad.

Respecto al control de calidad de un producto como etapa previa a su comercialización, muchos fabricantes optan por emplear métodos más tradicionales debido a la complicación que supone implantar un sistema fiable para la detección de fallas, especialmente en líneas de producción automatizadas, y al coste asociado a los equipos necesarios para su implantación. En la mayoría de casos, los propios operarios de la línea de producción son los encargados de realizar, mediante la escucha detenida del ruido generado, la verificación del estado del producto. Los resultados obtenidos por este método, puesto que se trata de un proceso puramente subjetivo, varían en función de múltiples factores como el estado emocional o físico del sujeto. Es lógico pensar que el criterio de un operario pueda verse alterado entre las primeras horas de trabajo y el final de su

jornada laboral. El cansancio puede jugar un papel determinante a la hora de diagnosticar acústicamente un producto [82 – 87]. Asimismo, el sujeto puede acostumbrarse al ruido, lo que influirá en su evaluación a medio-largo plazo [88].

La evaluación subjetiva realizada por el operario tiene lugar a partir de la detección de determinados patrones en el ruido generado por la muestra. En algunos equipos, la existencia de fallas puede ser detectada a partir de un incremento en el nivel de presión sonora. Sin embargo, en otras ocasiones, esto no resulta suficiente a la hora de establecer el diagnóstico, siendo necesario recurrir a parámetros más complejos como modulaciones de amplitud y/o frecuencia o incluso a la aparición de ruidos de carácter impulsivo durante el ciclo de movimiento de la máquina.

En la actualidad existen numerosos parámetros psicoacústicos, tales como *loudness*, *sharpness*, *roughness*, *fluctuation strength*, etc. [42], capaces de ofrecer una visión objetiva de la percepción del oído humano ante estímulos sonoros. Recientemente, algunos autores introducen la posibilidad de emplear este tipo de parámetros en la monitorización del estado de máquinas. En [89], Kane et al. analizan, mediante técnicas de inteligencia artificial, la validez de diferentes parámetros psicoacústicos como herramienta para la detección de fallas en cajas de cambios, haciendo una comparación con parámetros estadísticos más tradicionales. El trabajo se centra en encontrar una alternativa a los controles de calidad realizados por los operarios en líneas de producción. Para ello, se obtienen muestras sonoras del ruido generado por diferentes engranajes de dientes rectos montados en un banco de pruebas. La adquisición se lleva a cabo a partir de un micrófono situado a un metro de distancia de las muestras, variando las condiciones de velocidad y carga a las que se ven sometidos los engranajes. Del total de 600 muestras sonoras adquiridas, el 40% se emplean como entrenamiento de la red neuronal, el 30% para pruebas y el resto para verificar el sistema. Los autores concluyen que los parámetros psicoacústicos proporcionan una eficiencia en la detección de fallas del 98%. La hostilidad del entorno industrial en relación a la adquisición de señales sonoras o la utilización de estructuras dinámicas más complejas podría complicar en gran medida su aplicación.

Los parámetros psicoacústicos están definidos para ser aplicados a señales de presión sonora. Sin embargo, su uso sobre señales de vibración podría suponer una mejora del proceso de calidad, con resultados más estables y con un grado de objetividad muy superior a los obtenidos por un operario.

A lo largo de esta tesis, dentro de la línea de investigación 1, se abordará el problema de la monitorización del estado de un producto sobre una aplicación específica: el control de calidad

sonora de pequeños motorreductores empleados en espejos retrovisores de vehículos. Surge por tanto la necesidad de desarrollar una metodología de medida apropiada para líneas de producción, así como las métricas de calidad sonora más convenientes en cada caso.

Línea de investigación 2

En la actualidad, los fabricantes de automóviles y sus proveedores trabajan con diferentes normativas que regulan el comportamiento de los elementos del vehículo. Aquellos componentes provistos de accionamientos electromecánicos son analizados no solo desde el punto de vista mecánico, sino que también deben superar ciertas condiciones acústicas. Este es el caso de los espejos retrovisores exteriores del vehículo. En [9] se define el protocolo de medida para establecer el nivel de presión sonora en la apertura y cierre del espejo retrovisor, cuya cota superior se fija en 60 dB(A). A su vez, la norma proporciona diferentes pistas sobre cómo debe ser el movimiento del espejo: continuo y agradable. A pesar de que ambos adjetivos resultan conceptos claramente subjetivos, el texto no especifica ninguna metodología para su determinación. Por tanto, se hace necesario estudiar el ruido producido por los espejos retrovisores eléctricos y definir una métrica que permita describir objetivamente la percepción subjetiva del usuario respecto a la calidad sonora de los mismos.

Por otro lado, según lo expuesto en el apartado anterior, la agradabilidad de los sonidos de advertencia incluidos en los vehículos eléctricos resulta de gran importancia. Las previsiones de demanda de este tipo de vehículos, junto con la necesidad de incorporar sistemas de advertencia para peatones, hace pensar en un cambio drástico de los paisajes sonoros de ciudades a medio plazo. En el periodo temporal en que se enmarca la tesis, la literatura muestra diferentes puntos de vista respecto al diseño de los sonidos de advertencia para vehículos eléctricos. Por un lado, se establece una corriente a favor de replicar el sonido generado por los sistemas de propulsión convencionales. Por otro, la incorporación de nuevos sonidos con un carácter puramente sintético, basados en composiciones tonales con modulaciones de amplitud y frecuencia. Pese a que en la normativa actual se adoptó como válido el primer enfoque, es necesario realizar nuevos estudios que garanticen la solución óptima, con mejor detectabilidad y agradabilidad. De esta forma, la reducción de la contaminación acústica en zonas urbanas debida a la incorporación del vehículo eléctrico podrá hacerse efectiva.

Línea de Investigación 3

Como se indicó en el apartado 1.1.6, el vehículo eléctrico está llamado a ser una de las soluciones al problema de la contaminación ambiental en entornos urbanos. Sin embargo, la disminución en el ruido emitido como consecuencia del cambio de sistema de propulsión puede suponer un problema de seguridad para el peatón y otros usuarios de la vía.

Este problema ha sido ampliamente abordado por la comunidad científica y la administración. Desde el punto de vista legislativo, se han elaborado diferentes normativas destinadas a paliar los efectos de dicho problema, estableciendo la necesidad de emplear sistemas de alerta (AVAS) en este tipo de vehículos para mejorar su detectabilidad acústica. Sin embargo, en ningún caso se hace referencia al entorno urbano en que se encuentra el vehículo, un factor clave para la detección sonora. Los requerimientos en cuanto a nivel y contenido espectral del sistema de alerta se verán comprometidos en función del paisaje sonoro que rodee al vehículo (e.g. áreas industriales frente a áreas residenciales). Por otro lado, los estudios existentes se centran en analizar el comportamiento de los vehículos eléctricos para rangos de velocidad por debajo de 20 km/h, mientras que el límite máximo permitido en zonas residenciales para la mayoría de países corresponde a 30 km/h. A esta velocidad, la diferencia entre el ruido emitido respecto a los vehículos de combustión interna es todavía significativa y por tanto, debería ser considerada como potencialmente peligrosa.

Por otro lado, tanto la normativa actual como los estudios científicos se refieren exclusivamente a vehículos de cuatro ruedas, dejando a un lado el comportamiento acústico de motocicletas y ciclomotores eléctricos. El uso de vehículos motorizados de dos ruedas (PTW) se ha incrementado notablemente durante las últimas décadas, siendo un medio de transporte de gran utilidad en áreas urbanas [90]. De acuerdo con [91], se estima que existen un total de 313 millones de vehículos de dos ruedas en todo el mundo y se espera, que para 2040, el conjunto de PTWs represente el 35% de las ventas totales de vehículos [92].

Según [93] en casi la mitad de las muertes por accidentes de tráfico están involucrados peatones, ciclistas y motoristas. En el último año, aproximadamente el 57% de los accidentes de ciclomotor y el 39% de los accidentes de motocicletas de gran cilindrada tuvieron lugar en zonas urbanas [94]. Una de las principales causas de accidente en vehículos de dos ruedas es la baja visibilidad, debido a su tamaño reducido, los PTWs son ocultados por otros usuarios de la vía [95], por lo que, para garantizar la seguridad de conductores y peatones, deben estar provistos de sistemas de seguridad [96]. Por otro lado, se han mejorado los sistemas de frenado mediante el uso de ABS - *Anti-lock*

Braking Systems - y se han introducido dispositivos de señalización lumínica o electrónicos para mejorar la detectabilidad de las motocicletas.

Los vehículos motorizados de dos ruedas, debido a su bajo peso y a una menor superficie de contacto entre neumático y calzada, producen un ruido de rodadura inferior al generado por vehículos de cuatro ruedas. Por lo tanto, el ruido generado por el sistema de propulsión será el responsable principal del total emitido por el vehículo. Además, debido a la simplicidad del tren de potencia [97], el ruido generado a baja velocidad provendrá casi exclusivamente del motor. Según esto, la reducción en el ruido debido el uso de sistemas de propulsión eléctricos será más pronunciada que para el caso de vehículos de cuatro ruedas. Lelong et al. en [98] analizan el comportamiento acústico de 11 motocicletas en ensayos tipo *pass-by* a velocidad constante. Los vehículos utilizados corresponden a modelos de diferente cilindrada, siendo uno de ellos puramente eléctrico. Los resultados muestran una reducción en el nivel de presión sonora entre 10 y 15 dB para la motocicleta eléctrica. De acuerdo con [99], la sustitución del 100% de los vehículos de dos ruedas con motor de combustión interna por motocicletas eléctricas, supondría una disminución del ruido de más de 2 dB(A). Sin embargo, esta reducción del ruido lleva asociado, de la misma forma que sucedía con los vehículos de cuatro ruedas, una disminución en la detectabilidad del vehículo. Teniendo en cuenta además que la distancia de frenado de los PTWs es superior a la de los vehículos de cuatro ruedas [100], el riesgo para conductores y peatones puede incrementarse significativamente. Cabe añadir que las motocicletas de baja cilindrada se usan por norma general en entornos urbanos, donde la velocidad es reducida y, por tanto, el problema de la baja emisión de ruido puede tener un impacto mayor.

Según lo expuesto anteriormente, se hace necesario realizar nuevos estudios en relación a los vehículos eléctricos de cuatro ruedas y al uso de sistemas acústicos de advertencia. La detectabilidad a velocidades por encima de 20 km/h, así como la influencia del paisaje sonoro en que se enmarcan, deben ser estudiadas con mayor detalle. Del mismo modo, el comportamiento acústico de los vehículos eléctricos de dos ruedas debe ser analizado en profundidad. Ambos problemas serán abordados dentro de la línea de investigación 3. En un primer trabajo, se determinará el riesgo que supone para el peatón la aproximación de un vehículo a 28 km/h según diferentes paisajes sonoros. Asimismo, se analizará la efectividad de distintos sonidos de advertencia propuestos por la industria. En el segundo estudio, se analizarán el comportamiento acústico de vehículos de dos ruedas con sistema de propulsión eléctrico y de combustión interna; se determinará el nivel de presión sonora emitido en cada caso en función de la velocidad del vehículo; y por último, se establecerá la detectabilidad mediante ensayos auditivos.

1.3. Objetivos de la investigación

El objetivo general de la investigación es la contribución a la implementación de métricas de calidad sonora en productos industriales y de consumo, proponiendo nuevos modelos para una mayor correlación con la percepción subjetiva del ruido generado. La investigación está dividida en tres líneas fundamentales, basadas en analizar la calidad de producto desde tres puntos de vista distintos: funcional, perceptual y seguridad. A continuación, se describen los objetivos específicos de cada una de las líneas de investigación.

Línea de Investigación 1. Estudio de viabilidad de la aplicación de parámetros psicoacústicos a señales de vibración y su posible uso en el control de calidad funcional de productos industriales y de consumo. El estudio se lleva cabo sobre pequeños motorreductores empleados en espejos retrovisores eléctricos de vehículos. A lo largo de esta primera línea de investigación se ha desarrollado un dispositivo capaz de realizar el control de calidad de las muestras de forma autónoma. Para ello, el proceso ha tenido lugar de forma secuencial, cumpliendo con los objetivos particulares asociados a cada una de las etapas: selección del transductor empleado, determinación del punto óptimo de medida, adaptación del sistema al proceso automático y determinación de los parámetros más adecuados para la identificación de fallas. La dependencia directa entre las distintas fases del estudio obliga a un tratamiento particular de la información, especialmente desde el punto de vista de la metodología. El procedimiento empleado supone un grado de complejidad mayor en comparación con el resto de líneas incluidas en la tesis.

Línea de Investigación 2. Estudio de la calidad sonora de diferentes productos desde el punto de vista de la percepción del consumidor. La investigación se centra en dos aplicaciones concretas. Por un lado, se estudia la agradabilidad del sonido producido por espejos retrovisores eléctricos en vehículos. Por otro lado, se lleva a cabo el estudio de la molestia sonora que suponen para el peatón diferentes sonidos de advertencia integrados en sistemas acústicos de advertencia de vehículos eléctricos.

Línea de Investigación 3. Estudio de la calidad sonora de vehículos eléctricos en términos de seguridad vial. Se determina el tiempo de reacción del peatón en presencia de vehículos eléctricos de cuatro y dos ruedas, a una velocidad aproximada de 28 km/h y 19 km/h respectivamente. Se comparan los resultados con los obtenidos para sistemas de propulsión tradicionales, analizando la influencia del entorno urbano en el caso de vehículos de cuatro ruedas. Asimismo, se comprueban las bondades de los sistemas de advertencia en vehículos eléctricos.

1.4. Rationale

De acuerdo con el apartado anterior, queda patente que la tesis se orienta al uso de técnicas psicoacústicas para establecer la calidad de un producto desde diferentes puntos de vista: funcional, perceptual y seguridad.

Se define una metodología para la utilización de técnicas acústicas en sistemas de control de calidad de productos en líneas de producción automatizadas. Mediante esta línea de investigación, se propone un sistema de control alternativo al empleado actualmente, garantizando una mayor objetividad y eficacia.

Del mismo modo, se propone el uso de métricas de calidad sonora para describir de manera más precisa la percepción del usuario respecto a productos concretos. Estas métricas permiten realizar una comparación objetiva entre productos destinados a una misma funcionalidad y, por tanto, suponen una herramienta de gran utilidad en las fases de diseño. Algunas de las métricas empleadas, como es el caso de la agradabilidad de los espejos retrovisores eléctricos, permiten solventar cierta subjetividad existente en la normativa actual para establecer la calidad del producto.

Por otro lado, pese a que ciertos indicadores de la calidad de un producto pueden incrementarse notablemente debido a su comportamiento acústico, otros pueden verse mermados de manera drástica. Este es el caso de los vehículos eléctricos, cuya emisión de ruido resulta prácticamente nula en comparación con los sistemas de propulsión tradicionales a velocidades bajas. Este comportamiento, que supone una reducción de la contaminación acústica de los entornos urbanos y por tanto un beneficio social importante, lleva asociada una disminución considerable de la detectabilidad del vehículo, lo que se traduce en un empeoramiento de la seguridad para el peatón. A lo largo de esta tesis se analiza el comportamiento no solo de vehículos de cuatro ruedas, sino también de motocicletas y ciclomotores. El análisis de este tipo de vehículos supone en sí una innovación, no habiéndose tratado con anterioridad en la literatura científica.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, los resultados obtenidos en esta tesis suponen una aportación científica objetiva en el campo de la calidad sonora.

1.5. Trabajos presentados y justificación de la unidad temática

Los trabajos incluidos en la segunda parte de esta tesis han sido enviados y/o publicados en las siguientes revistas indexadas en el *Science Citation Index* (SCI):

Applied Acoustics, revista de reconocido prestigio dentro del campo de la acústica. En 2016, ocupaba la posición 10 de un total de 31 revistas de la misma temática, quedando enmarcada en el 2º cuartil. Presenta un factor de impacto a 5 años de 1.98 y una relación de citas por artículo de 2.33 (datos correspondientes a 2016).

Acta Acustica United with Acustica, revista que ocupa la posición 19 de 31, perteneciendo al 3º cuartil de la temática. Su índice de impacto es de 1.119 (datos correspondientes a 2016).

Los trabajos que conforman el compendio de publicaciones con el que se presenta esta tesis y sus datos referenciales se detallan a continuación:

1. Poveda-Martínez, Pedro; Peral-Orts, Ramón; Campillo-Davo, Nuria; Campello-Vicente, Hector; Ramis-Soriano, Jaime. Acoustic Directivity and Detectability of Electric Powered Two-Wheelers. *Acta Acustica united with Acustica*. 103, pp. 1014 - 1024. 2017. ISSN 1610-1928. Revista. Fecha de publicación: diciembre de 2017.
2. Poveda-Martínez, P.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Nescolarde-Selva, J.; Lloret-Climent, M.; Ramis-Soriano, J. Study of the effectiveness of electric vehicle warning sounds depending on the urban environment. *Applied Acoustics*. 116, pp. 317 - 328. 2017. ISSN 0003-682X. Revista. Fecha de publicación: enero de 2017.
3. Poveda-Martínez, Pedro; Mizuki Kawaguchi; Katsuya Yamauchi; Ramis Soriano, Jaime. Sound Pleasantness of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles. Submitted to *Applied Acoustics*: 2 march 2018.

Cada uno de estos trabajos se centra en alguna de las líneas de investigación planteadas en el desarrollo de la tesis. Tal y como se comentó en apartados anteriores, cada línea está destinada a describir una pequeña parte de la calidad global de un producto. De esta forma, se ofrece una visión más amplia del concepto de acústica como herramienta para la evaluación de la calidad, analizando el producto no solo desde el punto de vista de cómo se comporta, sino también desde cómo debería hacerlo.

De lo anteriormente expuesto se justifica la unidad temática de los trabajos presentados, así como la metodología empleada a lo largo de la tesis.



2. Metodología, hipótesis y plan de trabajo

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2.1. Metodología

A lo largo de este apartado, se describe la metodología empleada en las distintas líneas de investigación que conforman la tesis. Las líneas 2 y 3 se basan en procedimientos ampliamente descritos en la literatura y asumidos como estándar por la comunidad científica. En primer lugar, se expone el protocolo seguido para la adquisición de muestras sonoras. Seguidamente, se detallan las particularidades del método de ensayo utilizado en cada caso.

Por el contrario, algunas de las etapas incluidas en la línea de investigación 1 carecen de un procedimiento estándar, conformando una secuencia temporal donde los resultados específicos obtenidos al término de cada fase sirven de punto de partida para la siguiente. Con objeto de mantener una estructura narrativa similar en las tres líneas de investigación, los resultados obtenidos en la línea 1, pese a la dependencia directa entre etapas, se detallarán en el capítulo 3. Sin embargo, para mejorar la comprensión del texto por parte del lector, durante la descripción de la metodología empleada se hará referencia, sin entrar en detalle, a algunos de los resultados específicos obtenidos.

2.1.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto. Motorreductores

La línea de investigación 1, enmarcada dentro de la calidad funcional del producto, se centra en establecer una metodología para la aplicación de métricas de calidad sonora en el proceso de monitorización y validación de muestras en líneas de producción. La investigación se lleva a cabo de forma práctica sobre pequeños motorreductores utilizados para el abatimiento de espejos retrovisores de vehículos (ver figura 8).



Figura 8. Reductor empleado para el abatimiento de espejos retrovisores de vehículos.

A lo largo de este apartado se detalla la metodología empleada en cada una de las etapas del proceso. En primer lugar, se describe el análisis subjetivo llevado a cabo para la identificación y

catalogación de los defectos existentes en motorreductor. Seguidamente, se establecen las bases para la selección del transductor empleado en la adquisición de señales, indicando las ventajas e inconvenientes de cada una de las alternativas planteadas. Posteriormente, se detalla el procedimiento seguido para la identificación de patrones de vibración y la selección del punto óptimo de medida. A continuación, se define el procedimiento de integración del sistema de medida en la línea de producción. Por último, se incluye una descripción de los parámetros psicoacústicos utilizados y la metodología de análisis empleada para la determinación de los umbrales de detección.

2.1.1.1. Clasificación de las muestras. Determinación del catálogo de defectos

Como punto de partida en la investigación, resulta necesario seleccionar un conjunto de muestras representativas del producto. Para ello, se lleva a cabo un análisis subjetivo de diferentes motorreductores. El proceso tiene lugar en la línea de montaje, junto con el personal de fábrica encargado de la monitorización y control del producto terminado. A partir de este análisis, se clasifican las muestras en dos grupos. El primero, formado por 87 reductores en buen estado, se emplea para establecer una primera aproximación de los umbrales de detección. El segundo, compuesto por un número similar de muestras defectuosas, permite obtener descriptores verbales asociados a cada una de las fallas, lo que supone una base para la catalogación de defectos (ver tabla 3). Este grupo servirá a su vez como elemento de control del sistema de medida.

Tabla 3. Catálogo de defectos obtenido a partir de ensayos subjetivos.

Tipo	Descriptor Verbal	Descripción
1	Vibración	Vibración excesiva del reductor. Detectado por el personal de fábrica por contacto directo con la mano en la zona superior del reductor, posición donde se encuentra el motor.
2	Ruido arrastre	Sonido sucio. Sensación de que la muestra arrastra arena durante el movimiento.
3	Golpeteo	Aparición de ruidos impulsivos periódicos a lo largo del ciclo de giro de la muestra.
4	Discontinuo	Ruido discontinuo del reductor, con modulaciones de amplitud o frecuencia durante el movimiento.

2.1.1.2. Selección del transductor empleado en la adquisición de muestras sonoras

Una de las etapas más importantes en el estudio de la calidad de máquinas rotativas corresponde a la adquisición de muestra sonoras. En función del sistema de medida y del posicionamiento de los transductores, la sensibilidad del método de evaluación puede verse comprometida.

La monitorización del estado de una máquina puede realizarse a partir tanto de las señales acústicas radiadas por vía aérea como del estudio de las vibraciones transmitidas al bastidor. De esta forma, se presentan tres posibles métodos para la adquisición de señales en función del transductor empleado: micrófono, acelerómetro y vibrómetro láser.

El micrófono permite obtener la presión sonora generada por la máquina a una determinada distancia (ver figura 9). Presenta una sensibilidad adecuada para el rango de frecuencias audibles y, en la mayoría de casos, se comporta según un patrón omnidireccional. Supone un método de medida sin contacto, lo cual puede resultar una gran ventaja a la hora de automatizar el proceso de adquisición de señales. Sin embargo, esta característica lo hace especialmente sensible al ruido ambiental, no siendo recomendable su uso en entornos industriales. En este trabajo se empleó un micrófono de campo libre Bruel & Kjaer, modelo 4188-A-021, con una sensibilidad 29,8 mV/Pa.

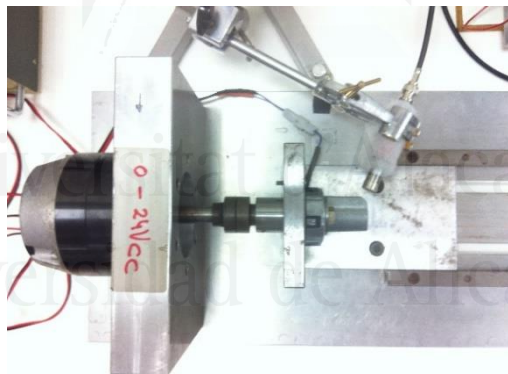


Figura 9. Esquema de medición del ruido generado por motorreductores empleando micrófono.

Otro transductor que debe ser tenido en cuenta en la adquisición de señales es el acelerómetro. En este caso, se empleó el modelo 4519 de Brüel & Kjaer, con una sensibilidad de 1,059 mV/m/s² y un rango de frecuencias de 1Hz a 20 kHz. Las medidas obtenidas mediante este tipo de sensores presentan una gran robustez y baja sensibilidad al ruido externo. Asimismo, permiten el análisis de vibraciones en un ancho de banda elevado. Sin embargo, para que la adquisición se lleve a cabo de manera precisa, debe garantizarse el contacto permanente entre el transductor y la superficie vibrante, tal y como se muestra en la figura 10. Por otro lado, los acelerómetros permiten obtener la vibración existente en una superficie determinada, en una dirección concreta, por lo que se

consideran sistemas de medida localizados. El posicionamiento del transductor resulta clave a la hora de obtener un resultado adecuado.

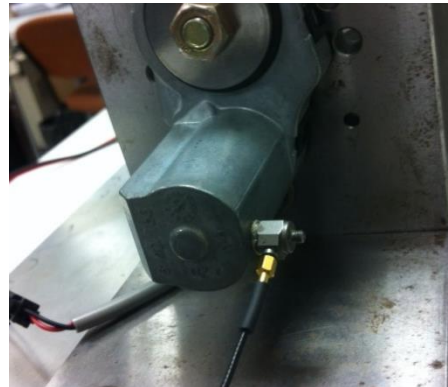


Figura 10. (Izq) Acerosómetro B&K Type 4519. (Dch) Posicionamiento del sensor en la superficie del motorreductor.

Otro método muy extendido para la adquisición de vibraciones corresponde a los vibrómetros láser. Este tipo de dispositivos permiten obtener el desplazamiento de una superficie sin necesidad de establecer un contacto físico entre el elemento analizado y el transductor. El sistema está compuesto por cuatro partes fundamentales: la fuente de alimentación, el sensor láser, la unidad de control y el sistema de almacenamiento (ver figura 11). El sensor, alimentado eléctricamente a través de la fuente de alimentación, se encarga de registrar ligeros desplazamientos de la superficie a partir de las variaciones producidas en el haz de luz (efecto doppler). El controlador muestrea la señal procedente del sensor con un periodo de muestreo determinado, adaptándola según el rango de amplitud necesario, y enviándola al sistema de adquisición de señales para su almacenamiento. Las pruebas realizadas se han llevado a cabo con los modelos SUNX-HL-C1, con periodo de muestreo de 10 μ s y una resolución de aproximadamente 1 μ m; Keyence LK-G5000, con frecuencia de muestreo de hasta 392 kHz y repetibilidad de 0,005 μ m; y Keyence IL-065, sensor de bajo coste con frecuencia de muestreo de 3 kHz.

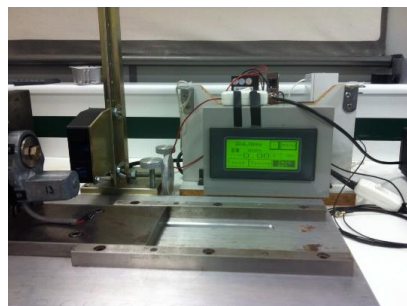
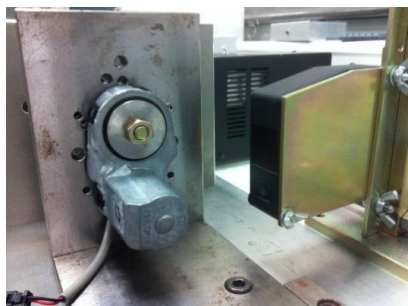


Figura 11. Medidas de vibración en la superficie del reductor con vibrómetro láser.

La posibilidad de realizar medidas de vibración sin contacto resulta una clara ventaja frente al uso de acelerómetros. Sin embargo, este tipo de dispositivos proporcionan una estabilidad baja. El sensor láser resulta altamente sensible a las vibraciones estructurales de los elementos que lo soportan. Del mismo modo, el controlador puede verse afectado por ruidos electromagnéticos, deteriorando así la señal resultante. Asimismo, para determinadas aplicaciones, la frecuencia de muestreo permitida por el sistema resulta baja, limitando el análisis de señal a un ancho de banda muy estrecho. Además, este tipo de sistemas son notablemente más costosos en términos económicos que el resto de métodos descritos. En comparación con los acelerómetros, el vibrómetro láser puede suponer un gasto 10 veces superior.

Para determinar el transductor que mejor se adapta a las necesidades del sistema, se lleva a cabo una comparación de los resultados obtenidos con todos ellos. Se realiza la adquisición del ruido producido por diferentes muestras, analizando el contenido espectral de las señales y la sensibilidad del método ante fenómenos externos.

2.1.1.3. Identificación de patrones de vibración

La monitorización de fallas por métodos acústicos se basa en la extracción del patrón de ruido asociado a cada uno de los estados del reductor. Las muestras con un comportamiento adecuado presentarán unas características frecuenciales y temporales determinadas. A partir de este patrón, es posible estudiar aquellas pequeñas variaciones que dan cuenta de la aparición de un defecto. Para definir los patrones de señal asociados tanto a reductores en buen estado como a las fallas descritas en la tabla 3, se realizan medidas sobre un conjunto de 87 muestras. Las señales adquiridas son analizadas posteriormente en tiempo y frecuencia.

2.1.1.4. Definición del punto óptimo de medida

En aquellos casos donde la monitorización del estado del reductor se lleva a cabo a partir de señales de vibración, es fundamental seleccionar el punto de medida de forma apropiada. La excitación de la muestra dependerá en gran medida del camino de transmisión entre la fuente generadora de vibración y la estructura exterior. Las fuerzas asociadas a un defecto en el engrane de los dientes producirán vibraciones en la dirección radial y tangencial de cada rueda (ver figura 12). Esta vibración se transmitirá radialmente a los ejes del mecanismo y posteriormente, a los apoyos. De esta forma, un sensor situado sobre las caras del bastidor paralelas al eje de engrane permitirá obtener la perturbación asociada al defecto de forma más clara.

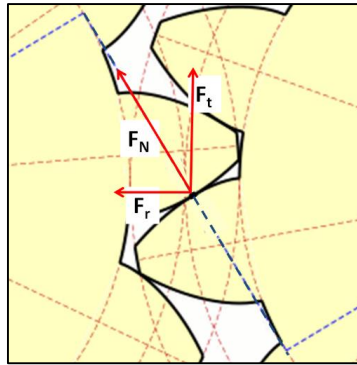


Figura 12. Fuerzas involucradas en el contacto entre dientes en un engranaje.

En la mayoría de aplicaciones, la cadena cinemática que conforma el reductor está compuesta por diferentes parejas de engranajes, denominados puestos, cuyos ejes no se disponen necesariamente de forma paralela. Esto puede resultar un inconveniente a la hora de seleccionar el punto de medida. Asimismo, la forma y material empleados en el diseño del bastidor determinarán su comportamiento modal y, por tanto, la sensibilidad frecuencial de los diferentes puntos de la superficie (ver figura 13).

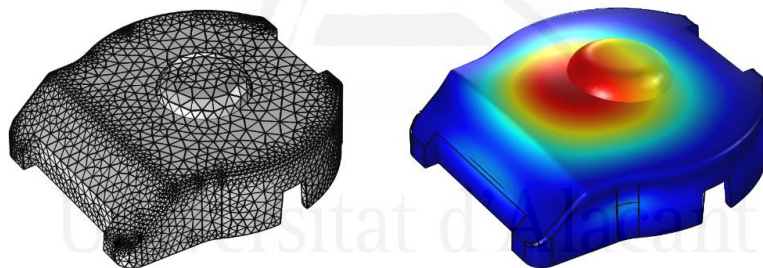


Figura 13. Modo de vibración en tapadera superior del reductor. Modelo numérico por el método de Elementos Finitos.

Para determinar la posición óptima del sensor, se verifica la aparición de las señales asociadas a cada uno de los fallos descritos en la tabla 3 en diferentes zonas del reductor. En primer lugar, se analizan las paredes laterales, zona altamente influenciada por el motor (ver figura 14). Estas paredes proporcionan una superficie lisa y amplia donde realizar las medidas. Además, esta región es utilizada por los operarios de la línea de producción para determinar el fallo asociado a una vibración excesiva del producto.

En segundo lugar, se realizan mediciones en la cara inferior del reductor tal y como se indica en la figura 14. Según la disposición de la cadena cinemática, esta superficie proporciona un punto de contacto cuasi-directo con los ejes de rotación a través de los apoyos internos. Por tanto, puede garantizar una mayor información en relación al funcionamiento del producto. Del mismo modo,

esta zona está diseñada con un material más ligero, garantizando la aparición de vibraciones con una amplitud mayor.

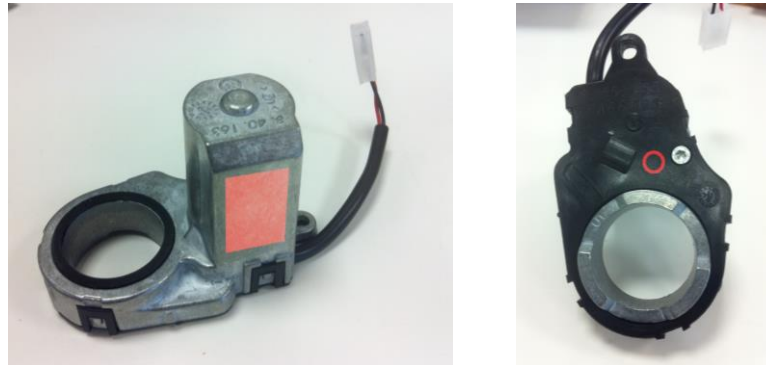


Figura 14. (Izq) Puntos de medida en zona lateral del reductor. (Dch) Punto de medida en superficie inferior.

2.1.1.5. Parámetros para la detección de fallas en motorreductores

Para una correcta identificación de los defectos del reductor, es necesario obtener parámetros que describan y cuantifiquen dichas fallas de manera objetiva. A continuación, se describen los parámetros empleados en este trabajo, clasificándolos según dos metodologías diferentes: indicadores de condición y parámetros psicoacústicos. La mayoría de parámetros incluidos en el primer grupo se recogen en la referencia [34].

A. Indicadores de condición

Nivel de vibración

El nivel de vibración nos permite cuantificar la aceleración, velocidad o desplazamiento de una superficie. En este trabajo se han utilizado dos tipos de sensores asociados a vibración: acelerómetro y vibrómetro láser. El primero de ellos, es sensible a los cambios de aceleración de la muestra, mientras que el segundo está ligado al desplazamiento de la superficie. A partir de la excitación generada por la muestra, se calcula la vibración de acuerdo con las expresiones 1, 2 y 3 (parámetros *valor rms*); siendo a , la aceleración; v , la velocidad; y x , el desplazamiento.

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3)$$

Por norma general, los resultados se facilitan en decibelios (ecuación 4), utilizando para cada magnitud física un valor de referencia distinto (10^{-6} en el caso de unidades de aceleración). En el presente estudio se utilizará la aceleración para el cálculo de niveles.

$$L_a = 10 \log\left(\frac{a_{rms}^2}{a_{ref}^2}\right) \quad (4)$$

Asimetría

El parámetro asimetría proporciona una medida de la falta de simetría en una distribución de datos. Aplicado a vibraciones, permite conocer el grado de similitud entre las oscilaciones positivas y negativas de una señal. El cálculo se realiza de acuerdo con la siguiente expresión:

$$asimetría = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

donde x_i es una señal compuesta por n muestras, con media aritmética μ y desviación estándar σ .

Curtosis

El índice curtosis permite conocer si un conjunto de datos presenta una cola larga o corta en comparación con una distribución normal. De esta forma, proporciona una medida del nivel de picos dentro de una señal. El cálculo se basa en el momento de cuarto orden, tal y como se indica en la expresión 6.

$$curtosis = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2)^2} \quad (6)$$

Entropía

El parámetro entropía permite conocer el grado de organización de un sistema. En este caso, se han obtenidos los valores de dispersión de la energía correspondiente a la señal de vibración según la siguiente expresión:

$$\text{entropía} = \sum_{i=1}^N \log(x_i^2) \quad (7)$$

Para valores de x_i igual a cero, el valor del logaritmo se establece como nulo.

Desviación estándar

La desviación estándar nos permite conocer el grado de variación de una señal respecto al valor medio.

$$\text{desviación estándar} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (8)$$

EOP

El parámetro Operador Energía o EOP permite detectar ruidos impulsivos en la señal de vibración. Este indicador requiere en primer lugar del cálculo de la señal re , obtenida por medio de la expresión $x_i^2 - x_{i-1} \cdot x_{i+1}$ para cada punto. Aplicando el parámetro curtosis sobre la nueva serie re , se obtiene el operador energía.

$$EOP = \frac{N \sum_{i=1}^N (re_i - \bar{re})^4}{(\sum_{i=1}^N (re_i - \bar{re})^2)^2} \quad (9)$$

Ratio de energía

La ratio de energía se define como el valor cuadrático medio de la señal diferencia, d , dividido entre el valor rms de la señal compuesta por las componentes tonales de engrane, y_d . Este parámetro permite identificar variaciones en la señal de vibración. Para el cálculo de d , la señal de vibración es filtrada a las frecuencias de engrane. El parámetro se obtiene aplicando la expresión 10.

$$\text{ratio energía} = \frac{RMS_d}{RMS_{y_d}} \quad (10)$$

FM0

El valor FM0 (*Zero Order Figure of Merit*) permite identificar cambios en el patrón de vibración. Para ello, se compara el valor máximo de amplitud pico-pico de la señal, PP_x , con la suma de amplitudes de las frecuencias de engrane y sus armónicos, P_N .

$$FM0 = \frac{PP_x}{\sum_{N=0}^H P_N} \quad (11)$$

FM4

El parámetro FM4 permite detectar fallas asociadas a un número finito de dientes. El cálculo se fundamenta en la aplicación del indicador curtosis sobre la señal diferencia, d , tal y como se describe en la siguiente expresión.

$$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2)^2} \quad (12)$$

M6A

M6A está basado en FM4, pero en este caso se calcula el sexto momento de la señal diferencia, lo que lo hace más sensible frente a la aparición de señales impulsivas.

$$M6A = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^6}{(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^3)^2} \quad (13)$$

M8A

En este caso, para asegurar una mayor sensibilidad respecto a M6A, se calcula el octavo momento normalizándolo frente a la varianza de la cuarta potencia de la señal diferencia, tal y como se indica en la expresión 14.

$$M8A = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^8}{(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2)^4} \quad (14)$$

Delta RMS/Delta RMS medio/Ratio Delta RMS

Para cada señal de vibración, es posible establecer un valor rms por cada periodo t . El valor máximo de la serie obtenida corresponderá al parámetro Delta RMS y el valor medio, a Delta RMS Medio. La relación entre ambos indicadores proporcionará el valor Ratio Delta RMS.

RMS curtosis

A partir de la serie de valores obtenidos para el cálculo de Delta RMS, se calcula el momento de cuarto orden.

$$RMS\ curtosis = \frac{N \sum_{i=1}^N (rms_i - \mu)^4}{(\sum_{i=1}^N (rms_i - \mu)^2)^2} \quad (15)$$

Clearance Factor/Indicador de impulso

Las siguientes expresiones describen el método empleado para calcular los parámetros *Clearance Factor* e Indicador de Impulso.

$$clearance\ factor = \frac{\max(|x_i|)}{(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|x_i|})^2} \quad (16)$$

$$ind.\ impulso = \frac{\max(|x_i|)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|} \quad (17)$$

Factor de forma

El parámetro factor de forma proporciona una medida de la distribución temporal de la señal y vendrá dado por la expresión 18.

$$factor\ forma = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} [\sum_{i=1}^N (x_i)^2]}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|} \quad (18)$$

Factor de cresta

El factor de cresta resulta de gran utilidad a la hora de identificar la presencia de ruidos impulsivos. Este parámetro viene dado por la relación entre el valor máximo de la señal y el valor rms, tal y como se describe en la ecuación 19.

$$factor\ de\ cresta = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (19)$$

La existencia de un defecto en los dientes del engrane lleva asociada la aparición de ruidos impulsivos en la señal, cuya periodicidad estará definida por la velocidad de giro del componente afectado. Este tipo fallos se identifican como golpeteos en la relación de defectos de la tabla 3.

B. Parámetros psicoacústicos

Los parámetros psicoacústicos empleados en esta investigación están inspirados en aquellos del mismo nombre utilizados en medidas de presión sonora, siendo aplicados en este caso a señales de vibración. Resulta fundamental, en este tipo de análisis, conocer a la perfección la tipología de fallas a que nos enfrentamos, así como la percepción subjetiva de las mismas. A partir del catálogo de defectos definido en la tabla 3 y a los patrones de señal asociados a cada uno de ellos, se seleccionan las siguientes métricas.

Sonoridad

El parámetro sonoridad, *N*, facilita una medida del contenido energético con el que el oído humano percibe un sonido, permitiendo ordenar las señales en una escala de menor a mayor intensidad. Proporciona por tanto un valor de la percepción subjetiva del usuario ante ruidos con diferente potencia sonora. La sonoridad se encuentra fuertemente ligada al contenido espectral de la señal. El oído presenta una sensibilidad superior para alta frecuencia, siendo máxima alrededor de 3 kHz, por lo que las componentes de baja frecuencia se percibirán con un nivel inferior. A modo de ejemplo, un tono de 40 Hz y un nivel de 50 dB resultará más silencioso para el oyente que uno de 1 kHz del mismo nivel.

El concepto de sonoridad fue introducido por Barkhausen a principio del siglo XX, estableciendo el *phone* como unidad de medida. Esta métrica se define como el nivel de presión sonora necesario para que un tono de 1 kHz, en onda plana con incidencia normal, suene igual de fuerte que el sonido analizado [42]. De esta forma, para una fuente de ruido percibida como un tono de 1 kHz de 40 dB, la sonoridad corresponderá a 40 *phone*.

Mudson y Fletcher en 1939 [101] introdujeron las curvas de igual sonoridad, recalculadas posteriormente por Robinson y Dadson en 1956, y normalizados según BS ISO 226 [102] (figura 15). Todos los sonidos incluidos en una misma curva, serán percibidos con la misma intensidad por el oyente. Por tanto, muestran la relación existente en frecuencia e intensidad para que dos sonidos sinusoidales sean percibidos con el mismo nivel.

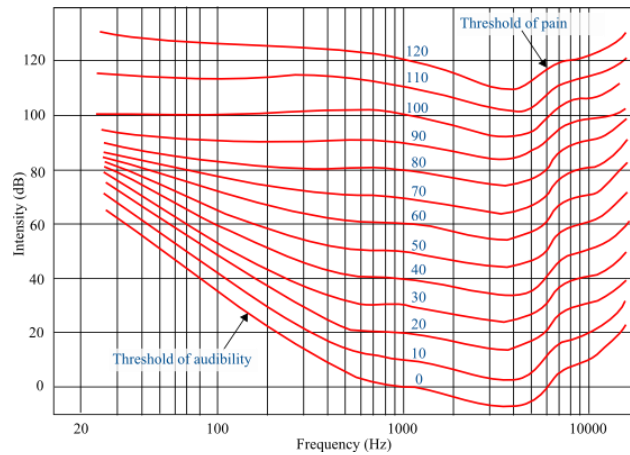


Figura 15. Curvas isofónicas introducidas por Mudson y Fletcher [A].

La sonoridad específica, N' , puede calcularse a partir del nivel de presión sonora de las bandas de tercios de octava, teniendo en cuenta la proporcionalidad existente respecto a la intensidad [42]. Del mismo modo, la sonoridad puede calcularse en *sones* según la escala Bark, propuesta por Eberhard Zwicker en 1961 [104]. Esta escala establece 24 bandas de frecuencia correspondientes a intervalos de igual percepción. El área incluida bajo la curva proporcionará el valor global de la sonoridad.

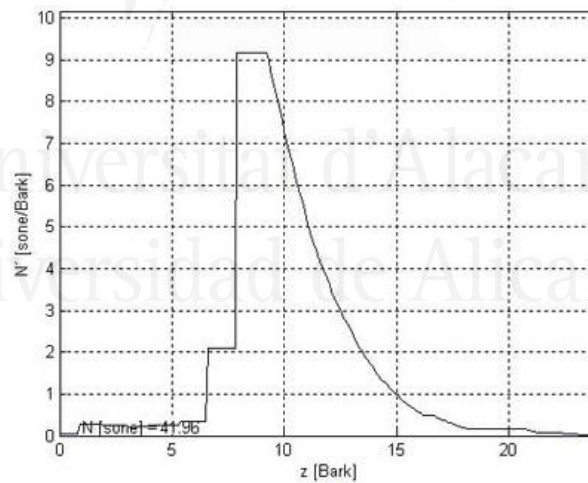


Figura 16. Sonoridad específica de 93 dB. Tono de 1000 Hz.

La metodología empleada para el cálculo del parámetro sonoridad se encuentra descrita en las normas BS 4198 y ISO 532/R [7, 103]. Asimismo, ha sido motivo de estudio en multitud de trabajos científicos [105 - 108], proponiéndose diferentes alternativas para su obtención.

Agudeza

La agudeza representa una medida del contenido de alta frecuencia que posee un sonido. Pese a ser utilizado en multitud de aplicaciones relacionadas con la calidad sonora, no existe un estándar normativo que lo defina. De esta forma, podemos encontrar diferentes métodos de cálculo [42,101, 102]. Según Zwicker y Fastl en [42], un valor aproximado de la agudeza de un sonido, S , puede ser obtenido a partir del primer momento de la sonoridad específica N' , ponderando el resultado por medio de una función $g'(z)$ (figura 17).

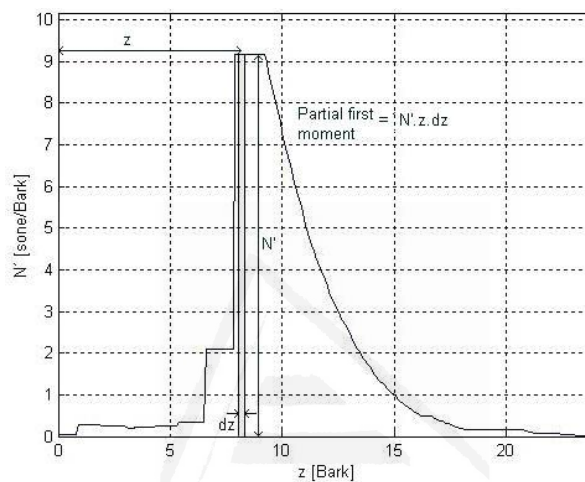


Figura 17. Cálculo del primer momento parcial empleado en la obtención de la agudeza.

La suma de los momentos parciales ponderados, dividida entre la sonoridad total N y multiplicada por una constante de proporcionalidad ($c = 0,11$), facilitará el valor de la agudeza (ecuación 20).

$$S = c \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g'(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \quad (20)$$

Aspereza

La aspereza, R , permite cuantificar la percepción subjetiva de las modulaciones de amplitud rápidas (15 – 300 Hz) existentes en una señal (ver figura 18). Este parámetro se mide en unidades de *asper*, estableciéndose un valor unidad para un tono de 60 dB y 1000 Hz de frecuencia con una modulación de amplitud del 100% a 70 Hz [42]. La aspereza ha sido utilizada en numerosas ocasiones para describir la calidad sonora de un producto, estando incluida en el cálculo para determinar la molestia sonora.

En relación a las modulaciones rápidas de amplitud, el oído no será capaz de seguir de manera precisa los cambios de nivel existentes en la señal. Por tanto, se producirá una diferencia entre la percepción del oyente y el nivel real de la señal, dado por ΔL (ver figura 18). Este fenómeno se tiene en cuenta a la hora de calcular la agudeza, tal y como se indica en la ecuación 21.

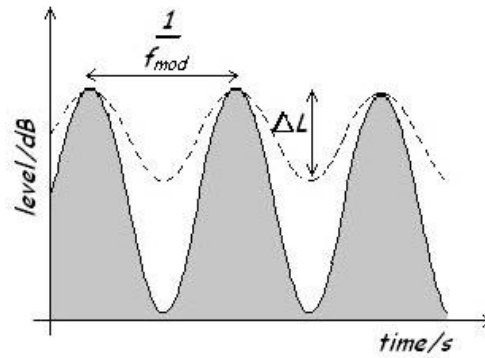


Figura 18. Efecto de la duración subjetiva en ruidos con modulaciones de amplitud rápidas. Línea continua: profundidad de la modulación. Línea punteada: profundidad percibida.

$$R = cal \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} f_{mod} \cdot \Delta L \cdot dz \quad (21)$$

donde *cal* corresponde a un factor de calibración, f_{mod} representa la frecuencia de modulación y ΔL es la profundidad de enmascaramiento percibida [42]. La obtención del factor ΔL supone una gran dificultad, por lo que no existe un método estandarizado para el cálculo de la agudeza. En la actualidad existen diferentes propuestas para la obtención del parámetro [109, 110, 111]. El algoritmo empleado en este trabajo establece, en primer lugar, la energía del sonido en las 24 bandas de la escala bark, calculando y filtrando la envolvente de la señal para cada una y obteniendo las modulaciones de amplitud correspondientes. Posteriormente, se pondera el nivel en cada banda usando los índices de modulación calculados y una función de ponderación relacionada con la frecuencia. Este método proporciona un espectro de aspereza cuya integración permitirá obtener un valor global para el sonido analizado.

Fuerza de fluctuación

La fuerza de fluctuación obedece a un principio similar al descrito por el parámetro aspereza, cuantificando en este caso la percepción subjetiva de las modulaciones lentas de amplitud (hasta 20 Hz) existentes en un sonido. Puesto que se trata de modulaciones con una frecuencia inferior, el valor de ΔL no coincidirá con el obtenido en el caso de la aspereza. La unidad de medida empleada para

la fuerza de fluctuación es el *vacil*, cuyo valor unidad se obtiene para un tono de nivel 60 dB y frecuencia 1000 Hz, con una modulación del 100% a 4 Hz. La ecuación 22 muestra la expresión definida en [42] para el cálculo de la fluctuación.

$$F = \frac{0.008 \cdot \int_0^{24 \text{ Bark}} \Delta L \cdot dz}{\frac{f_{mod}}{4} + \frac{4}{f_{mod}}} \quad (22)$$

El algoritmo empleado en este caso parte del cálculo de la energía existente en 47 bandas superpuestas de la escala bark. Posteriormente, se calcula y filtra la envolvente de señal en cada banda, midiendo la amplitud de modulación y ponderando el nivel por medio de una función conocida. A partir del espectro de fluctuación obtenido, se obtiene un valor global mediante integración. El algoritmo empleado resulta especialmente sensible para modulaciones de amplitud en torno a 4 Hz.

Tonalidad

El parámetro tonalidad, definido en unidades de *tones*, permite diferenciar entre señales tonales y ruidos de banda ancha [112]. El algoritmo empleado en el cálculo establece una relación entre el nivel de las componentes tonales presentes en la señal y el nivel global de la misma. Este parámetro ha sido empleado para determinar la calidad sonora de multitud de aplicaciones, estando incluido en la expresión utilizada para el cálculo de la agradabilidad sonora descrita en [113].

Cada uno de los parámetros definidos anteriormente permite describir un evento determinado en la señal acústica. La siguiente tabla muestra una asociación teórica entre los parámetros psicoacústicos propuestos y los defectos identificados en los distintos reductores.

Tabla 4. Tabla de asociación entre parámetros psicoacústicos y defectos.

Nº	Parámetro	Defecto Asociado
1	Nivel de vibración	Nivel vibración alto
2	Factor de cresta	Golpeteo
3	Sonoridad	Nivel vibración alto
4	Agudeza	Nivel vibración alto
5	Aspereza	Discontinuidades/golpeteo
6	Fuerza de fluctuación	Discontinuidades

2.1.1.6. Adaptación del sistema de medida al proceso automatizado

Una vez definidos los parámetros más adecuados para llevar a cabo la monitorización del estado de los motorreductores, es necesario adaptar el sistema de medida al proceso de producción. Las etapas descritas hasta ahora se realizaron de forma completamente manual, posicionando el sensor en el punto adecuado en cada medida. Sin embargo, la herramienta implementada debe ser capaz de trabajar de forma autónoma y, por tanto, debe garantizar la correcta adquisición de señales sin la intervención de los operarios de línea. Para ello, se plantean dos alternativas destinadas a garantizar el contacto entre sensor y muestra en medidas de vibración con acelerómetro: palpador y fleje.

Palpador

Se llevan a cabo medidas adaptando el acelerómetro al extremo de un palpador. Este dispositivo, en cuyo interior se encuentra alojado un muelle de compresión con una constante elástica determinada, proveerá la fuerza necesaria para mantener al sensor en contacto con la estructura (ver figura 19). Los ensayos con palpador se llevan a cabo utilizando seis muelles con distinta constante elástica (figura 20). De esta forma se pretende observar el efecto de la rigidez sobre el contenido espectral de las señales adquiridas.



Figura 19. Palpador empleado en las medidas de vibración.



Figura 20. Diferentes muelles empleados en los ensayos.

Fleje

Una alternativa al palpador consiste en la utilización de un fleje metálico como elemento de presión para garantizar el contacto permanente entre el acelerómetro y la superficie vibrante (figura 21). Al depositar el reductor sobre el acelerómetro, el fleje variará su posición y el sensor permanecerá en contacto con la muestra. El esquema de medida se detalla en la figura 22. A lo largo del trabajo se han analizado diferentes configuraciones de fleje, tanto de espesor como de longitud, con el objetivo de seleccionar aquella más apropiada para la monitorización de defectos en motorreductores.

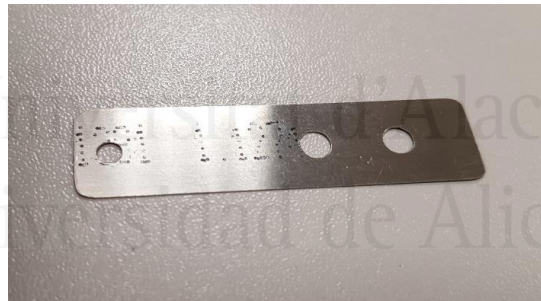


Figura 21. Fleje utilizado para garantizar el contacto entre el acelerómetro y la superficie del reductor.

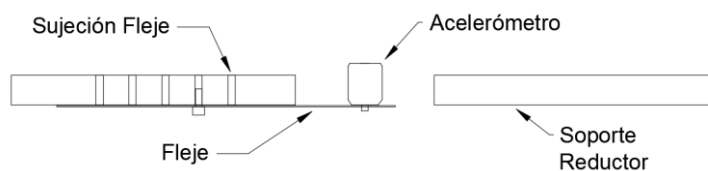


Figura 22. Esquema montaje para medidas de vibración con fleje.

2.1.1.7. Determinación de umbrales de detección

Con objeto de identificar los valores límite para cada uno de los parámetros descritos en el apartado anterior, se llevan a cabo medidas de vibración sobre un total de 87 reductores en buen estado. A partir de la información obtenida para cada muestra, se realiza un análisis estadístico de los datos, obteniendo para cada parámetro el valor medio, la desviación estándar, los valores máximos y mínimos, y los percentiles entre otros descriptores. Por otro lado, se analizan las señales de vibración correspondientes a 87 reductores defectuosos. A partir de una representación gráfica conjunta de ambos tipos de reductor, se establece la validez de los distintos parámetros, definiendo el umbral más apropiado en cada caso y comparando las métricas utilizadas.

2.1.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto

A lo largo de este apartado se describe la metodología empleada para el análisis de la calidad sonora de un producto desde el punto de vista perceptual. Los ensayos tienen lugar para dos aplicaciones concretas de la industria del automóvil: calidad sonora de espejos retrovisores eléctricos y calidad sonora de sonidos de advertencia empleados en vehículos eléctricos. En primer lugar, se introducirá el procedimiento utilizado para la adquisición de muestras sonoras, analizando las características principales de los estímulos. Seguidamente, se detallarán los ensayos psicoacústicos llevados a cabo en cada caso.

2.1.2.1. Ensayo 1: calidad sonora en espejos retrovisores eléctricos

Estímulos sonoros

En esta fase de la investigación se analiza la calidad sonora de cuatro espejos retrovisores de distintos fabricantes, denotados a lo largo del estudio como S1, S2, S3 y S4 (figura 23); y cuyas características se describen en la tabla 5.

Tabla 5. Características de las muestras analizadas.

Muestra	S1	S2	S3	S4
Voltaje Nominal, V	13 ± 0,5	13 ± 0,5	13 ± 0,5	13 ± 0,5
Corriente de consumo, mA	<400	<650	100-400	<400
Velocidad giro, °/s	34	20-35	25	>30
Peso, g	864	370	373	531



Figura 23. Espejos retrovisores empleados en la investigación.

La adquisición de muestras sonoras se llevó a cabo en una cámara semianecoica con un ruido de fondo de 22 dB(A), disponiendo los espejos sobre una estructura rígida. La grabación se realizó durante el ciclo de apertura de los espejos, aproximadamente 2 segundos, a partir de dos configuraciones distintas. En primer lugar, se llevaron a cabo medidas monoaurales por medio de un micrófono suspendido a una distancia de 50 cm por encima de las muestras, tal y como se recoge en [9]. Los sonidos obtenidos por este método fueron empleados para la obtención del nivel de presión y el cálculo de parámetros de calidad sonora. En segundo lugar, con el objetivo de adquirir muestras sonoras para los ensayos auditivos, se realizaron medidas binaurales utilizando un maniquí acústico *Head Acoustics HM III* situado a un metro de distancia de las muestras (ver figura 24). Las grabaciones se efectuaron con una frecuencia de muestreo de 44.100 Hz y una profundidad de bits de 16 con algoritmo noise shaping. Asimismo, se empleó un filtro paso-alto con una frecuencia de corte de 22 Hz durante la adquisición de las muestras, eliminando así posibles ruidos ambientales baja frecuencia.

Ensayos psicoacústicos. Procedimiento

Con objeto de establecer la percepción subjetiva del usuario en relación a la calidad sonora del producto, se llevaron a cabo ensayos auditivos a partir de dos métodos distintos: comparación de parejas y procedimiento de ranking. Los ensayos tuvieron lugar en una sala de laboratorio con un nivel de ruido bajo, evitando así posibles interferencias en la percepción del oyente. La emisión de los estímulos sonoros se realizó en todos los casos por medio de un ordenador provisto de una

tarjeta de audio TASCAM 144MKII y unos auriculares de referencia AKG K612Pro o similar. Para evitar la influencia de la respuesta en frecuencia de los auriculares en la percepción de los participantes, los estímulos fueron ecualizados debidamente mediante un filtro inverso.



Figura 24. Montaje del equipo de medida en cámara semianecoica.

Al inicio de las pruebas, se explicó a cada oyente el procedimiento de ensayo, solicitándole ciertos datos de carácter estadístico (edad, sexo y nacionalidad) y mostrándole algunos de los estímulos sonoros para familiarizarse con ellos. Seguidamente, se pasó a evaluar las muestras sonoras de acuerdo con las particularidades del método empleado. En todos los casos, el usuario pudo escuchar los sonidos tantas veces como consideró oportuno. Para cada oyente, los sonidos fueron presentados de forma aleatoria.

En los ensayos por comparación por parejas, los estímulos se presentaron al oyente de dos en dos, evaluando cada dupla de acuerdo con la siguiente pregunta: “¿Qué sonido le parece más agradable?”. Se dio al usuario la posibilidad de seleccionar entre tres respuestas posibles: A más agradable que B (denotada en lo sucesivo como A1), B más agradable que A (A2), A igual de agradable que B (A3). En el ensayo se incluyeron todas las permutaciones posibles de entre los cuatro sonidos utilizados. Cada una de las respuestas fue valorada con un peso específico: A1, puntuación de 1; A2, puntuación de -1; A3, puntuación de 0. A partir de los valores obtenidos, se confeccionó una matriz de decisión para cada oyente, obteniéndose en la diagonal el resultado de comparar muestras iguales. La figura 25 muestra un ejemplo de esta matriz.

	S1	S2	S3	S4
S1	0	1	1	-1
S2	-1	0	-1	1
S3	1	-1	0	-1
S4	1	-1	-1	0

Figura 25. Ejemplo de matriz de decisión obtenida por el método de comparación de parejas.

A partir de la matriz de decisión de cada oyente, se calculó el índice de agradabilidad de forma lineal [54, 114] según las expresiones 23, 24 y 25, quedando P definido en el rango (-3, 3). El valor de preferencia promedio se normalizó al valor 100 para los cálculos posteriores.

$$P_{fila,i} = \sum_{j=1}^N P_{ij} \quad (i = 1,2,3, \dots, N) \quad (23)$$

$$P_{columna,j} = \sum_{i=1}^N P_{ij} \quad (j = 1,2,3, \dots, N) \quad (24)$$

$$\bar{P} = \frac{P_{fila} + (-P_{columna})}{2} \quad (25)$$

En el segundo ensayo, de tipo ranking, todas las muestras fueron presentadas al oyente al mismo tiempo, debiendo ordenarlas de mayor a menor agradabilidad según su criterio (ver figura 26). En función de la clasificación realizada por el usuario se estableció una puntuación diferente para cada muestra. El máximo valor, 4, se otorgó al sonido valorado como más agradable y la menor, 1, al más desagradable. Los valores de preferencia fueron escalados en un rango de 0 a 100 para su posterior análisis.

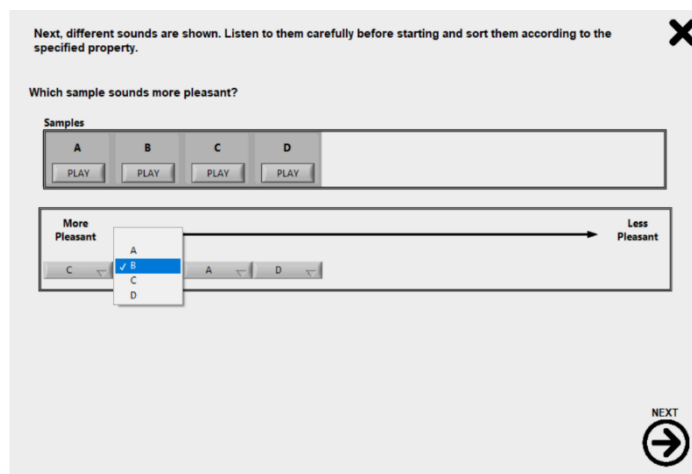


Figura 26. Panel de control de la aplicación desarrollada para el método de ranking.

2.1.2.2. Ensayo 2: molestia producida por los sonidos de advertencia de vehículos eléctricos

Estímulos sonoros

Diferentes sonidos de advertencia han sido propuestos por la industria con objeto de mejorar la detectabilidad de vehículos híbridos y eléctricos [115, 78]. La utilización de este tipo de sonidos puede suponer un aumento de la contaminación acústica, incrementando el grado de molestia para el ciudadano en determinadas zonas urbanas. Para analizar este fenómeno, en primer lugar, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de los diferentes sonidos de advertencia existentes en el mercado, poniendo especial interés en aquellos de libre distribución. Un total de 25 muestras fueron analizadas, seleccionando aquellas con un comportamiento temporal y frecuencial estable - se eliminaron los sonidos correspondientes a ensayos tipo *pass-by* o para los que la velocidad del vehículo no permanecía constante durante su reproducción. Finalmente, 10 sonidos fueron utilizados como estímulos sonoros para los ensayos auditivos, incluyendo como referencias el sonido de un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico sin sistema de advertencia. Una descripción más detallada de las muestras se incluye en la línea de investigación 3, apartado 2.1.3.2. Con objeto de realizar una comparación entre ellos, todas las muestras fueron procesadas para garantizar el mismo nivel de presión sonora.

Ensayos psicoacústicos. Procedimiento

La evaluación subjetiva de los sonidos de advertencia se llevó a cabo por el método de diferencias semánticas. Los ensayos tuvieron lugar en una sala con bajo ruido de fondo. La emisión de los estímulos se llevó a cabo a través de un ordenador con tarjeta de audio TASCAM 144MKII y auriculares AKG K612Pro. Los sonidos fueron debidamente ecualizados para evitar la influencia de los auriculares.

Tal y como se realizó en los métodos de comparación de parejas y de ranking definidos en el apartado anterior, los ensayos comenzaron explicando a cada participante el procedimiento de ensayo. Posteriormente, se mostraron algunos de los estímulos empleados a modo de ejemplo. La evaluación de cada muestra se llevó a cabo por medio de un control de tipo *scroll* sobre una escala lineal continua con valores comprendidos entre 0 y 4 (valores límite correspondientes a las opciones nada desagradable – extremadamente desagradable) tal y como se muestra en la figura 27. Los sonidos se presentaron al usuario de forma aleatoria, repitiendo cada uno de ellos en dos ocasiones.

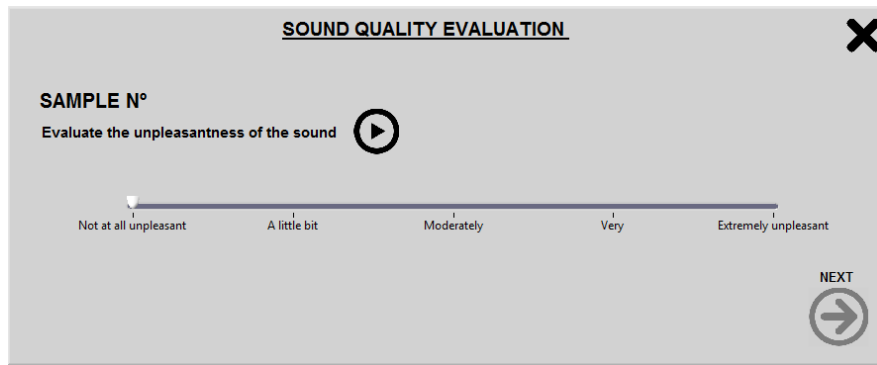


Figura 27. Aplicación desarrollada para evaluar la agradabilidad de sonidos de advertencia.

2.1.3. Línea de investigación 3: calidad de productos en términos de seguridad

La línea de investigación 3 se centra en estudiar el comportamiento acústico de los vehículos eléctricos desde el punto de vista de la seguridad vial. La investigación se divide en dos trabajos. En primer lugar, se analiza el efecto de los sonidos de advertencia en la detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas, estudiando la influencia del ruido de fondo en el tiempo de respuesta del peatón. En un segundo estudio, se realiza una comparativa del ruido generado por motocicletas con distintos sistemas de propulsión. Posteriormente, se analiza la detectabilidad de los vehículos mediante ensayos auditivos.

A lo largo de este apartado se detalla la metodología empleada en ambos trabajos. En primer lugar, se introduce el procedimiento llevado a cabo para la adquisición de muestras sonoras. Posteriormente, se detalla el método utilizado en los ensayos auditivos para la obtención del tiempo de respuesta del peatón. La metodología empleada será común para vehículos de dos y cuatro ruedas. Finalmente, se describirán las muestras empleadas en cada ensayo.

2.1.3.1. Procedimiento

Con objeto de establecer la detectabilidad sonora de diferentes vehículos, se llevaron a cabo ensayos auditivos en un laboratorio. La metodología se basó en recrear un escenario de cruce de calle: un peatón, de pie junto a la calzada, a 3 metros de distancia del eje de circulación del vehículo, preparado para cruzar la calle. Se presentaron al oyente diferentes sonidos, simulando la aproximación del vehículo en ambas direcciones. Cada sonido fue reproducido durante el ensayo auditivo de forma individual, manteniendo la velocidad de los vehículos constante y cubriendo una distancia de ± 30 metros respecto al peatón. Para dotar de un mayor realismo a las pruebas realizadas, los estímulos sonoros se presentaron bajo ciertas condiciones de ruido de fondo, tal y como se describe en el apartado 2.1.3.3. Se asignó la tarea a cada participante de indicar, mediante

el accionamiento de un botón, el momento preciso en que percibiera la aproximación de un vehículo.

Las muestras sonoras correspondientes a los distintos vehículos fueron obtenidas a partir de un ensayo tipo *pass-by*. Las grabaciones fueron realizadas por medio de un maniquí acústico *HeadAcoustic HSM III*, con una frecuencia de muestreo de 44.100 Hz y una profundidad de bits de 16 con algoritmo *noise shaping*. Con objeto de evitar la influencia del ruido de fondo en las medidas, durante la adquisición se empleó un filtro paso alto de 5° orden y frecuencia de corte 22 Hz. El maniquí acústico se situó a tres metros de distancia del eje de circulación de los vehículos, tal y como se detalla en la figura 28. La adquisición de muestras se realizó para un recorrido de los vehículos de ± 30 metros respecto al equipo de medida, con una velocidad cercana a los 30 km/h.

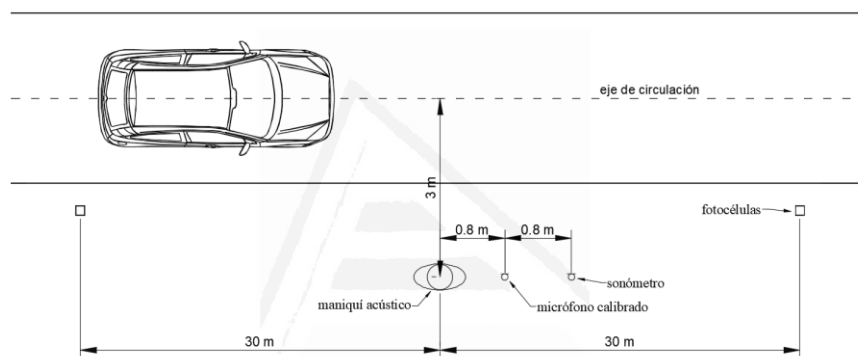


Figura 28. Configuración del ensayo *pass-by* para la adquisición de muestras sonoras.

Durante el ensayo, se registró el nivel de presión sonora emitido por los diferentes vehículos a varias velocidades. Las medidas se realizaron por medio de un sonómetro B&K Type 2250 situado a 80 cm del maniquí acústicos, obteniendo así el nivel percibido por el peatón. La velocidad de las muestras se determinó gracias a un conjunto de fotocélulas situadas junto a la calzada. Las medidas tuvieron lugar en la Universidad Miguel Hernández de Elche, en una vía con asfalto estándar tipo G20+S20.

Las muestras sonoras obtenidas fueron procesadas y acondicionadas para su uso posterior en los ensayos auditivos. Las señales fueron analizadas y escuchadas detenidamente, descartando aquellas muestras donde el ruido de fondo pudiera afectar a la detectabilidad del vehículo y comprometer la validez de los resultados. Ruidos como el producido por el viento, los pájaros, perros, aviones e incluso otros vehículos, fueron eliminados. Para eliminar las fluctuaciones en la señal ocasionadas por el viento, todas las muestras fueron tratadas por medio de un filtro paso-alto tipo Butterworth 5° orden y con frecuencia de corte de 80 Hz.

Los ensayos auditivos se llevaron a cabo por medio de auriculares AKG K612Pro. La respuesta en frecuencia de este tipo de dispositivos puede afectar considerablemente al contenido espectral de la muestra emitida. Para evitar este problema, todas las señales fueron procesadas por medio de un filtro inverso basado en la respuesta al impulso de los auriculares empleados en el ensayo.

Para llevar a cabo los ensayos de detectabilidad, se implementó una herramienta software en *labVIEW*. La función de esta aplicación consistió en emitir las diferentes muestras sonoras bajo un ruido de fondo constante a través de una tarjeta de sonido TASCAM US-144MKII conectada a un ordenador, registrando el instante preciso de la emisión. Las muestras fueron presentadas al oyente de manera individual y aleatoria, con un intervalo temporal entre ellas de entre 1 y 20 segundos. Para los ensayos correspondientes a vehículos de cuatro ruedas, cada sonido fue reproducido un total de cuatro veces, dos en el sentido de circulación izquierda-derecha, y dos en el opuesto. En el caso de vehículos de dos ruedas, se realizaron una total de seis iteraciones por sonidos, tres en cada sentido de circulación. A partir de la diferencia temporal existente entre la emisión del estímulo y la detección del vehículo - pulsación de una tecla del PC por parte del oyente - se estableció el tiempo de reacción para cada sonido.

2.1.3.2. Estímulos

Vehículos de cuatro ruedas

De acuerdo con la legislación actual [79, 80, 81], los AVAS deben emular el sonido generado por los vehículos de combustión interna. Por otro lado, estudios recientes indican una mejora en la detectabilidad del vehículo mediante el uso de señales formadas por diferentes componentes armónicas moduladas en amplitud [78, 116]. Con el fin de comparar ambas tendencias de diseño, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de los diferentes sonidos de advertencia existentes en el mercado, poniendo especial interés en aquellos de libre distribución. Un total de 64 muestras provistas por diferentes laboratorios y fabricantes – DELTA Senselab, NHTSA, ECTunes, Renault, eVader Project - fueron analizadas, seleccionando aquellas con un comportamiento temporal y frecuencial estable - se eliminaron los sonidos de advertencia (WS) correspondientes a vehículos en movimiento. Finalmente, diez sonidos fueron utilizados como estímulos sonoros para los ensayos auditivos, incluyendo como referencias el sonido de un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico sin sistema de advertencia.

Las cinco primeras muestras estaban basadas en el ruido producido por vehículos de combustión interna. Este grupo corresponde a la línea de diseño 1 (DS1), basada en la normativa actual. Las

muestras 6, 7 y 8 se enmarcan dentro de la línea de diseño 2 (DS2), y consistían en sonidos formados por una combinación reducido de tonos puros, lo que les otorgaba un carácter claramente sintético.

El WS1 presentaba una concentración de energía en la banda de frecuencias comprendida entre 100 y 300 Hz, con componentes armónicas significativas en 275, 550 y 800 Hz y sin ningún tipo de modulación (ver figura 29). Su centroide espectral se encontraba en 672 Hz [117]. En este caso, el sonido fue considerado como un diseño intermedio entre DS1 y DS2. Respecto a WS2, consistía en un ruido de banda ancha (10 - 20.000 Hz), similar al producido por un motor de combustión interna, y con un contenido espectral constante (centroide espectral 4.161 Hz).

El tercer sonido seleccionado, WS3, presentaba un espectro de frecuencias relativamente plano en la banda de 200 a 600 Hz (ver figura 29), con un centroide espectral de 399 Hz. Esta muestra resultaba muy similar al ruido de un vehículo, con la salvedad de pequeñas modulaciones de frecuencia en algunas de sus componentes tonales (ver figura 30). Respecto a WS4, se caracterizaba por una combinación de un gran número de armónicos, con especial énfasis en las frecuencias de 100 y 200 Hz. La componente tonal correspondiente a 500 Hz se encontraba modulada en amplitud, lo que le confería cierta fluctuación al sonido. Su centroide espectral se situaba en 1.234 Hz, lo que manifiesta una distribución uniforme de la energía en un ancho de banda amplio.

En WS5, la energía se concentraba en el rango de frecuencias comprendido entre 200 y 500 Hz, destacando ciertas componentes tonales de mayor amplitud (ver figura 29). Su centroide espectral se situaba en 627 Hz. Respecto a WS6, el sonido se encontraba formado por tres componentes tonales fundamentales: 300, 600 y 900 Hz. En este caso, la muestra no presentaba ninguna modulación y su centroide espectral correspondía a 600 Hz.

Tal y como se muestra en la figura 29, la muestra 7, WS7, estaba formada por nueve armónicos (fundamental de 300 Hz - centroide espectral de 1.656 Hz). En este caso, el sonido presenta una modulación en frecuencia de las componentes tonales superiores (ver figura 31). WS8 estaba compuesta por tres armónicos situados a las frecuencias de 300, 600 y 900 Hz – centroide espectral de 769 Hz, modulados en frecuencia. La figura 31 muestra una representación tiempo-frecuencia para este sonido.

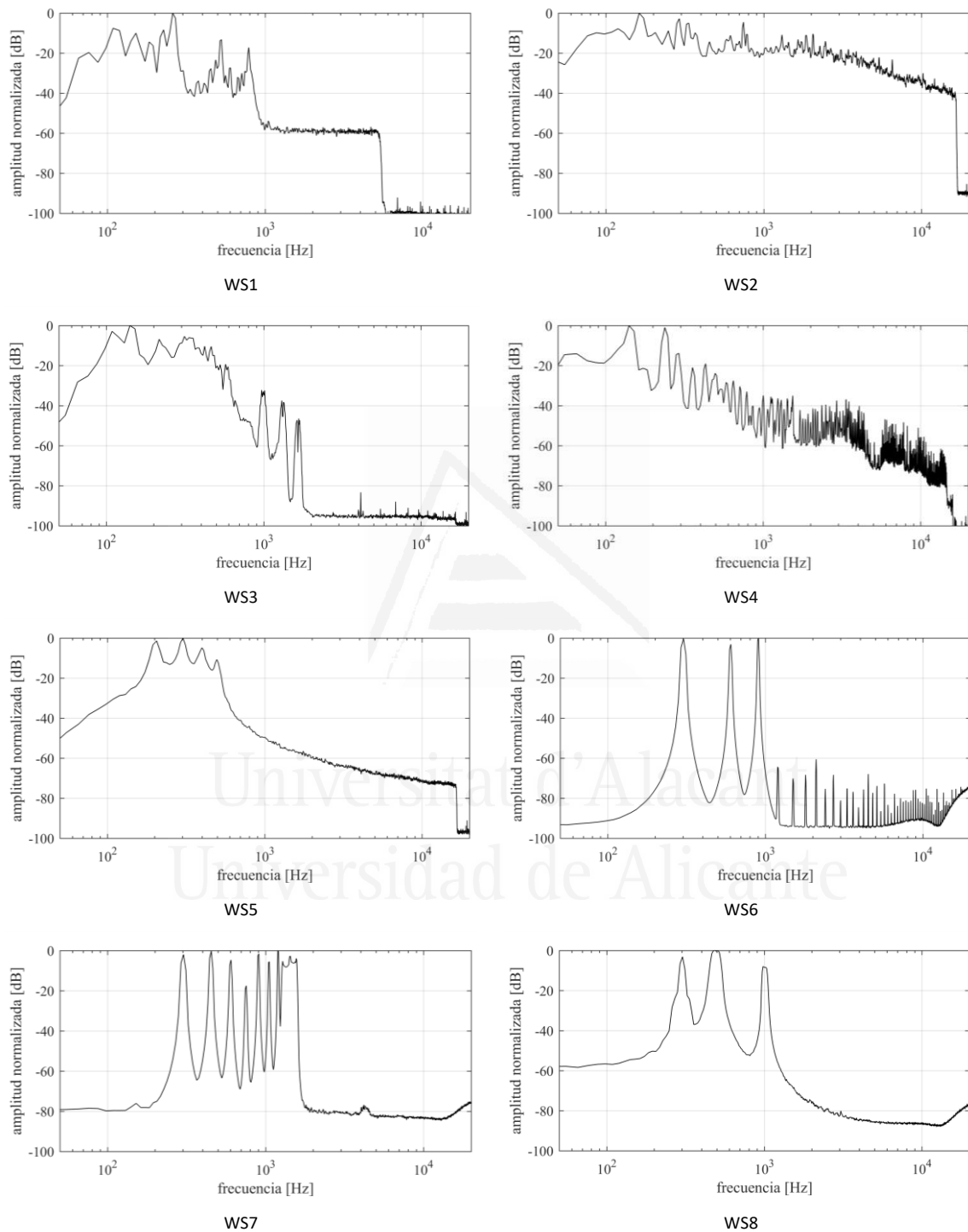


Figura 29. Espectro de frecuencias correspondientes a los sonidos de advertencia empleados en el ensayo de detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas.

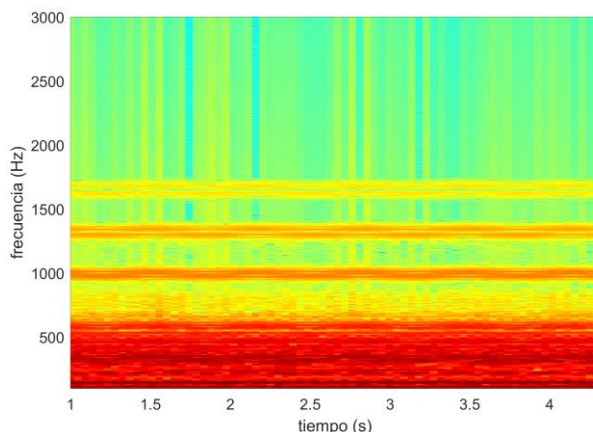


Figura 30. Representación tiempo-frecuencia para el sonido de advertencia WS3.

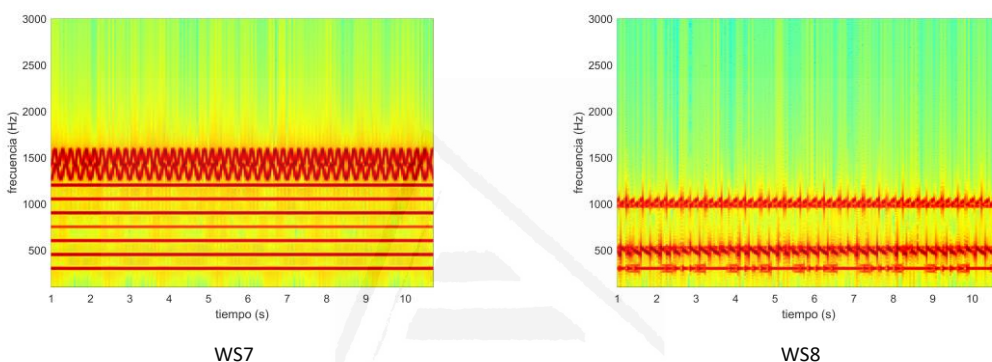


Figura 31. Espectrogramas correspondientes a los sonidos de advertencia WS7 y WS8.

Los sonidos de advertencia fueron clasificados en función de dos características fundamentales asociadas a su diseño: planitud espectral [117] y modulación (ver tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de los sonidos de advertencia en función de sus características.

FS - NM	FS - M	TS - NM	TS - M
WS2	WS3	WS1	WS4
WS5		WS6	WS7
			WS8

Nota: FS (espectro plano); TS (espectro tonal); M (modulado); NM (no modulado)

Con objeto de verificar la mejora introducida por los sonidos de advertencia en la detectabilidad del vehículo, se incluyen en los ensayos las muestras correspondientes a un vehículo de combustión interna (CI) y a un vehículo eléctrico (EV) sin AVAS. La adquisición de estos sonidos se realizó empleando un Toyota Prius híbrido circulando a una velocidad de aproximadamente 30 km/h. Los sonidos de advertencia fueron incorporados al sonido real del modo eléctrico de forma artificial, según el esquema mostrado en la figura 32. Todos los archivos de audio fueron procesados para

emular el movimiento del vehículo en un ensayo tipo *pass-by* a velocidad constante. La atenuación del sonido debido a la distancia respecto al peatón, así como la variación frecuencial debida al efecto *Doppler* fueron consideradas. La diferencia de tiempo interaural (ITD) y el efecto de la cabeza fueron contemplados por medio de un filtro inverso con la respuesta al impulso de la cabeza, HRIR [118].

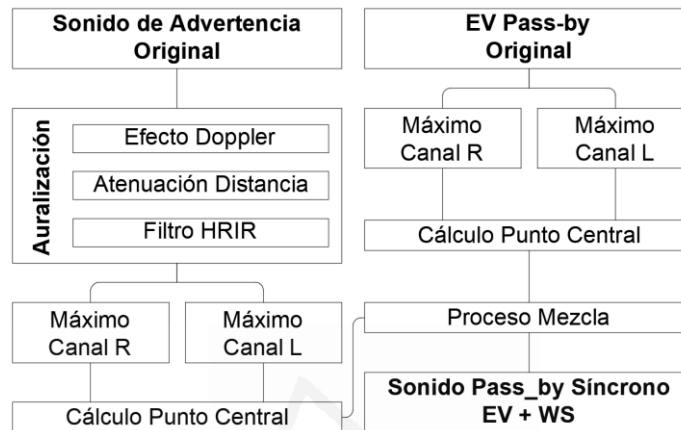


Figura 32. Diagrama de flujo para la simulación de sonidos *pass-by*.

La simulación del vehículo eléctrico con sistema de advertencia incorporado se realizó de manera que la integración de ambos sonidos no superara en 3 dB(A) el nivel de presión sonora de pico del vehículo sin sonido de advertencia. Como condición adicional, ninguno de los sonidos simulados excedió el ruido generado por el vehículo de combustión interna.

Vehículos de 2 ruedas

Para los ensayos auditivos correspondientes a vehículos de dos ruedas, se seleccionó un conjunto de cinco motocicletas: dos con sistema de propulsión eléctrico (E), dos con motor de combustión interna (ICE), y una con sistema híbrido (ICE/E). En este último caso se analizó el vehículo circulando en modo eléctrico y en modo combustión de forma separada, lo que permitió realizar una comparación entre ambos sistemas de propulsión con idénticas condiciones de contorno. La tabla 7 resume algunas de las características más relevantes de las motocicletas ensayadas. Las características del ruido generado por cada muestra se detallan en el capítulo 3. La adquisición de muestras sonora se llevó a cabo para los vehículos circulando a 10, 20, 30, 40 y 50 km/h.

Tabla 7. Principales características de las motocicletas empleadas en el ensayo.

<i>ID</i>	<i>Sistema de Propulsión</i>	<i>Potencia -KW-</i>	<i>Cilindrada -cc-</i>	<i>Peso -kg-</i>
<i>ICEM1</i>	ICE	5,96	108	114
<i>EM1</i>	E	0,74	49	37
<i>EM2</i>	E	13,00	125	147
<i>EM3</i>	E	4,00	125	85
<i>HEM</i>	ICE/E	--/1	125	--

2.1.3.3. Ruido de fondo

Vehículos de cuatro ruedas

Según Katsuya et al. en [77], el ruido de fondo juega un papel importante en la detectabilidad del vehículo, lo que implica que para determinados entornos urbanos el riesgo para el peatón es mayor. Las distintas zonas dentro de una ciudad pueden clasificarse acústicamente según la capacidad de sus calles y la conexión con otros entornos [119]. Para analizar la detectabilidad de los vehículos eléctricos, se realizan ensayos para tres escenarios distintos de ruido de fondo. El entorno 1 correspondía a un semáforo en una calle de tres carriles, incluía el ruido de diferentes vehículos en ralentí con un nivel de presión sonora global de 65,4 dB(A). El segundo entorno consistió en una calle peatonal próxima a un área comercial, el sonido incluía la voz de peatones y el ruido generado por las terrazas de bares y restaurantes. En este caso, el nivel de presión sonora global alcanzó los 64,3 dB(A). Por último, el entorno 3 se trataba de una zona de juegos infantiles con un nivel de presión sonora global de 55,3 dB(A). En este caso, el sonido incluía voces de niños y adultos.

Las medidas correspondientes a cada entorno, realizadas de forma binaural, fueron procesadas para eliminar su directividad. La figura 33 muestra una representación gráfica del espectro de frecuencias de cada entorno.

Vehículos de dos ruedas

El ruido de fondo empleado en los ensayos de detectabilidad de vehículos de dos ruedas se obtuvo a partir de la superposición del sonido generado por varios vehículos de combustión interna en ralentí. La señal resultante presentaba un nivel de presión sonora global de 61 dB(A).

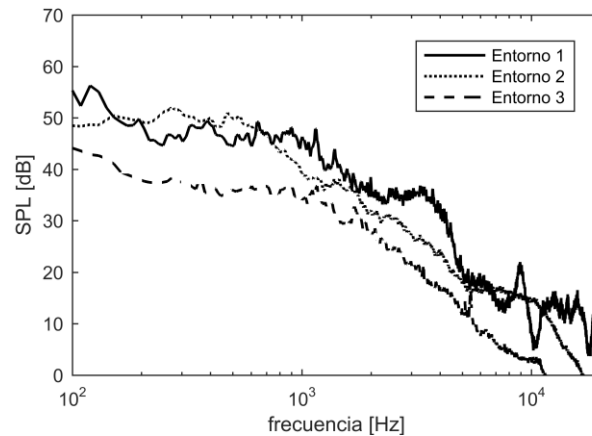


Figura 33. Espectro de frecuencias de los diferentes entornos urbanos utilizados en los ensayos auditivos.

2.2. Hipótesis

Línea de investigación 1: calidad funcional de producto. Motorreductores

Tal y como se indicó en el planteamiento del problema, los fabricantes de reductores establecen un proceso de verificación del producto al término de la cadena de producción. En la mayoría de los casos, la metodología empleada resulta completamente subjetiva, llevándose a cabo por los propios operarios de la línea. La valoración realizada por el personal se basa en la percepción auditiva de diferentes eventos sonoros, los cuales están asociados a la existencia de un fallo. Se parte de la hipótesis de que es posible establecer una correlación directa entre la percepción subjetiva del usuario ante las diferentes fallas existentes en un reductor y los parámetros psicoacústicos tradicionales.

Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto

Para garantizar el éxito de un producto en el mercado no es suficiente con verificar los requisitos funcionales definidos en la etapa de diseño. Además, este debe cumplir con las exigencias del consumidor. Pese a que existen en la actualidad un gran número de métricas orientadas a describir la calidad sonora, su validez se restringe a aquellas aplicaciones para las que fueron creadas. Se plantea como hipótesis la necesidad de combinar parámetros existentes en la literatura con objeto de determinar la calidad sonora de dos aplicaciones concretas: espejos retrovisores eléctricos y sonidos de advertencia de vehículos eléctricos.

Línea de investigación 3: calidad de producto en términos de seguridad

La utilización de motores eléctricos como sistemas de propulsión de vehículos ha dado lugar a una disminución considerable del ruido, lo cual supone un incremento del riesgo peatones y demás usuarios de la vía. Este fenómeno ha quedado ampliamente demostrado en multitud de estudios científicos, dando lugar a la incorporación de sistemas de advertencia para mejorar la detectabilidad de los vehículos eléctricos. Sin embargo, en ningún caso se hace referencia a las condiciones de ruido de fondo. Asimismo, los ensayos existentes se centran en la velocidad de 20 km/h, mientras que la diferencia de ruido entre vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos se mantiene por encima de esta cifra. Este trabajo parte de la hipótesis de que los vehículos eléctricos pueden resultar peligrosos a velocidades por encima de 20 km/h en determinados ambientes urbanos. Por otro lado, no se ha llevado a cabo ningún estudio en relación a la detectabilidad de vehículos de dos ruedas, cuya presencia en zonas urbanas aumenta constantemente. En este caso, el trabajo establece como hipótesis de partida un comportamiento de las motocicletas similar al de los vehículos de dos ruedas, disminuyendo el ruido generado y la detectabilidad por parte del peatón.

2.3. Plan de trabajo

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la presente tesis se encuentra formada por tres líneas de investigación distintas, habiéndose ejecutado todas ellas de manera casi simultánea. La línea de investigación 1, ligada a la calidad funcional de producto, se centró en el desarrollo de una herramienta capaz de monitorizar la existencia de fallas en pequeños motorreductores. La falta de un procedimiento estándar para el desarrollo de este tipo de sistemas obligó a plantearse objetivos parciales a lo largo del trabajo. De este modo, el plan establecido supuso una secuencia de actividades ligadas a las necesidades de cada momento. En primer lugar, y tras el estudio del estado del arte, se realizó una primera selección de muestras distinguiendo entre reductores en buen estado y reductores defectuosos. A partir de esta selección, se llevó a cabo un estudio subjetivo para la catalogación de los posibles defectos existentes en las muestras. Posteriormente, se definió el sistema de medida, seleccionando el transductor más apropiado para un entorno industrial. A continuación, se identificaron los patrones de vibración asociados a cada uno de los defectos, estableciendo el punto óptimo de medida en la superficie del bastidor. A partir del análisis de las señales asociadas a cada defecto, se seleccionaron los parámetros, *a priori*, capaces de describir su comportamiento. Con objeto de integrar la herramienta al control de calidad existente en la línea de producción del reductor, se analizaron diferentes configuraciones de medida enfocadas a

garantizar el contacto entre la superficie de las muestras y el sensor utilizado. Finalmente, a partir de las medidas realizadas sobre el conjunto de muestras seleccionadas, se establecieron estadísticamente los umbrales de detección, analizando el grado de validez de cada parámetro y la relación existente entre todos ellos. Asimismo, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos a través de métricas psicoacústicas y de indicadores de condición más tradicionales.

Por lo que respecta a las líneas de investigación 2 y 3, el plan de trabajo comienza con una tarea común a ambos ensayos, la adquisición de muestras sonoras. En la línea de investigación 2 se realizaron medidas de presión sonora en cámara semianecoica para diferentes espejos retrovisores. En el caso de la línea 3, se llevó a cabo una variación del método *pass-by* descrito en la normativa ISO 362. El objetivo consistía en registrar los sonidos desde el punto de vista del peatón. Asimismo, se recopilaron diferentes sonidos de advertencia existentes en el mercado. En una etapa posterior, las muestras de audio fueron analizadas, procesadas y adaptadas a los ensayos auditivos específicos de cada trabajo. A partir de los parámetros de caracterización de las muestras y de la valoración subjetiva realizada por diferentes oyentes, se estableció, por un lado, la agradabilidad del sonido generado por los espejos retrovisores; por otro lado, la molestia causada por los sonidos de advertencia; y finalmente, la detectabilidad de vehículos eléctricos de dos y cuatro ruedas.



3. Resultados. Análisis y discusión

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

3.1. Línea de investigación 1: calidad funcional de producto. Motorreductores

3.1.1. Selección del transductor empleado

De acuerdo con las ventajas e inconvenientes presentadas por cada uno de los métodos de adquisición, los acelerómetros constituyen la opción más apropiada para la implementación del sistema de control de calidad. El ruido existente en un entorno industrial impide el uso de micrófonos, mientras que el coste y la baja frecuencia de muestreo limita las posibilidades del vibrómetro láser. La figura 34 muestra el espectro de frecuencias obtenido en la superficie del reductor empleando los distintos transductores. Los resultados revelan una pérdida de información considerable en media y alta frecuencia para el vibrómetro láser. El uso de acelerómetros garantiza medidas más robustas con un ancho de banda mayor. Para el desarrollo de la investigación se ha utilizado un acelerómetro miniatura modelo Type 4519 de la marca Brüel & Kjær, con una sensibilidad de 1,059 mV/m/s².

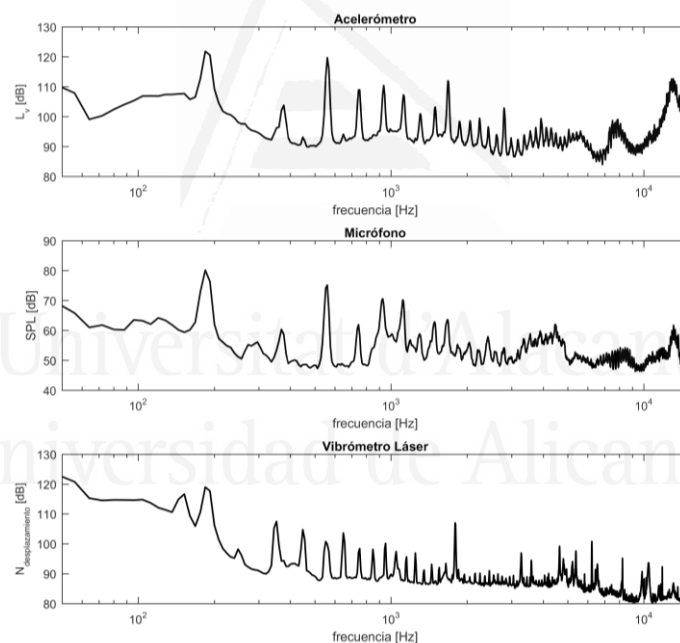


Figura 34. Espectro de frecuencias para diferentes métodos de medida

3.1.2. Patrones de vibración

El análisis de la vibración realizado para un conjunto de 87 muestras en buen estado pone de manifiesto una alta variabilidad en el contenido espectral de las señales, especialmente para las componentes de alta frecuencia. La figura 35 representa el espectro obtenido para cada uno de los reductores analizados junto con el patrón medio de vibración (línea de color negro). El rango fijado por los valores máximos y mínimos denota una alta variabilidad, dando lugar a que el espectro

obtenido para reductores defectuosos quede enmarcado dentro del margen acotado como válido (figura 36).

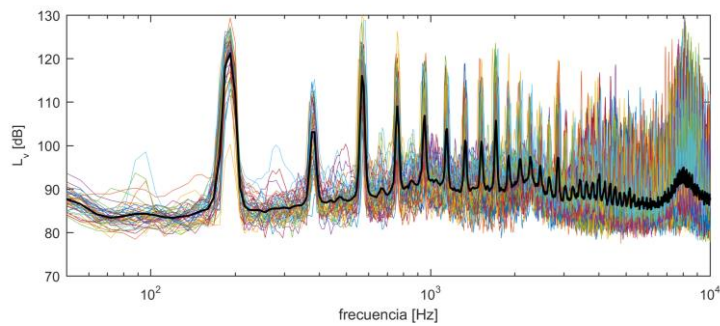


Figura 35. Patrón de ruido obtenido en medidas con acelerómetro.

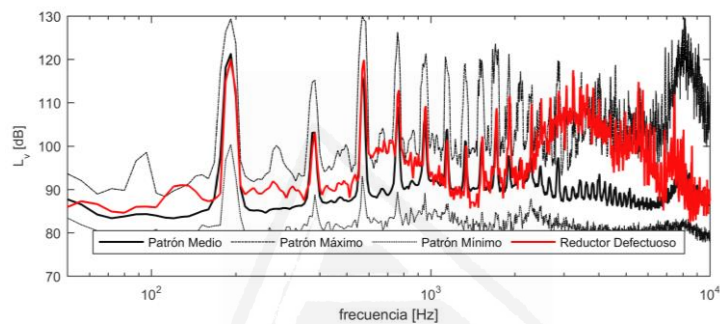


Figura 36. Comparativa patrón medio, máximo y mínimo con espectro de reductor defectuoso.

El patrón de vibración obtenido a partir del espectro de frecuencias proporciona una imagen estática del comportamiento del reductor, no dando cuenta de pequeñas variaciones asociadas a un defecto. Por el contrario, un análisis temporal de las señales permitirá identificar el evento asociado a cada uno de los fallos a través de la superficie del reductor, resultando útil a la hora de seleccionar los parámetros más apropiados para su identificación. Las siguientes figuras muestran las señales obtenidas para cada uno de los defectos descritos en la tabla 3.

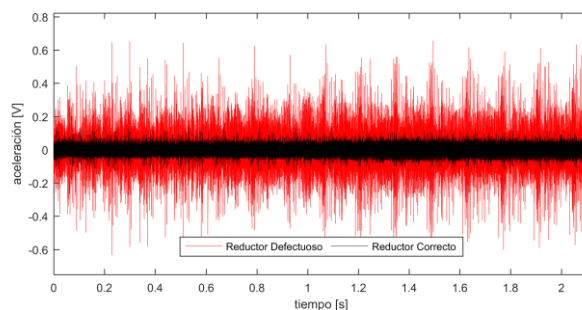


Figura 37. Señales con diferente nivel de vibración.

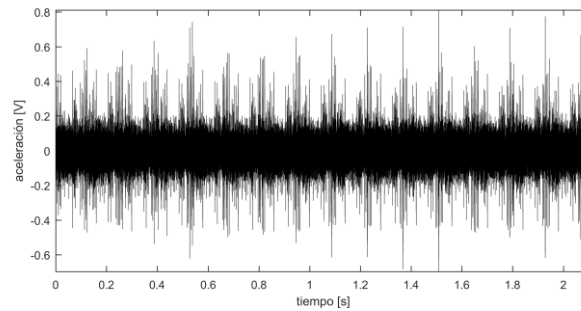


Figura 38. Señal de vibración para ruido de arrastre.

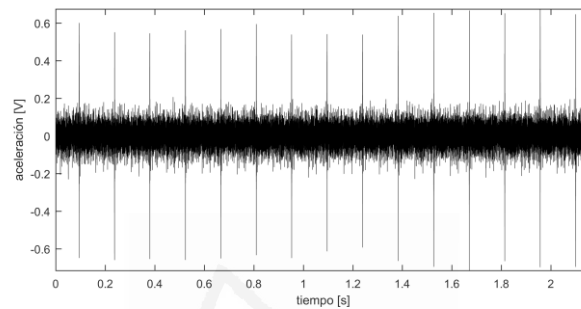


Figura 39. Señal de vibración reductor con golpeteo.

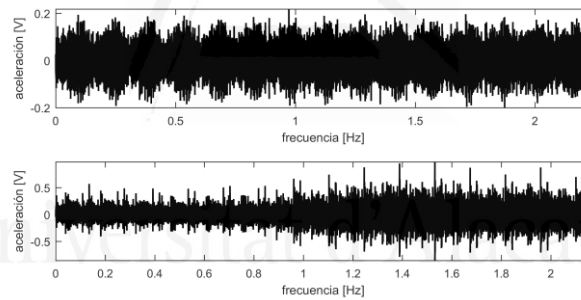


Figura 40. Señal de vibración con discontinuidades. Modulación.

3.1.3. Punto óptimo de medida

A partir de las medidas de vibración realizadas en la superficie del reductor, se establece la necesidad de utilizar dos puntos de adquisición para la detección de fallas. En primer lugar, el defecto asociado a una vibración excesiva de las muestras resulta más notable en las superficies laterales del reductor, en las zonas próximas al motor. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos subjetivos, donde los operarios empleaban el contacto directo con la muestra para distinguir el defecto. En este caso, para identificar la posición óptima del transductor, se realizan medidas en diferentes puntos de la superficie (figura 41), obteniendo la sensibilidad para cada uno de ellos a partir del nivel de vibración (figura 42). De acuerdo con los

resultados obtenidos, las posiciones 3 y 6 proporcionan un nivel de señal superior al resto de puntos (+10dB), siendo la relación señal a ruido más apropiada en el último caso.



Figura 41. Posiciones de medida en reductor.

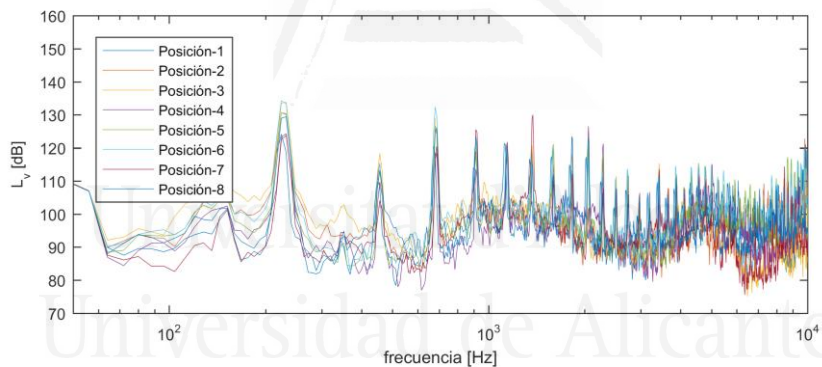


Figura 42. Espectro de frecuencias todas las posiciones. Medidas con acelerómetro.

El patrón de vibración asociado al resto de defectos se hace más patente en la superficie inferior del reductor. Por lo tanto, el sistema de monitorización desarrollado quedará formado por dos puntos de medida, uno inferior (P1) y otro lateral (P2), tal y como se indica en la figura 43.

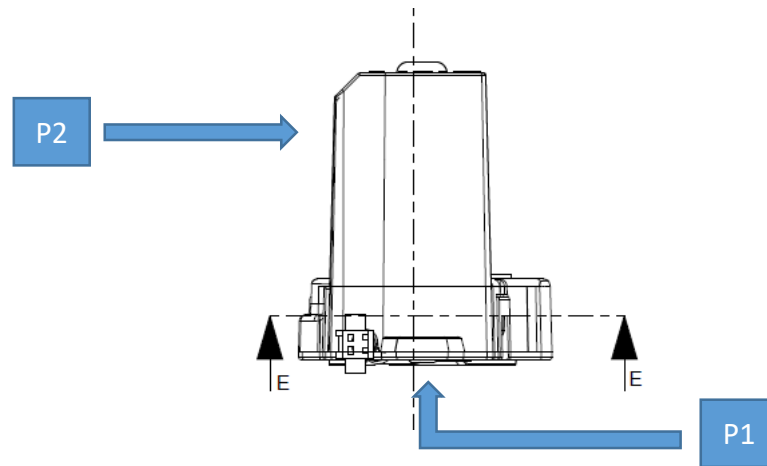


Figura 43. Puntos de medida empleados en el sistema de monitorización de fallas.

3.1.4. Adaptación del sistema de medida a la cadena de producción

Tal y como se indicó en el apartado 2.1.1.7, para adaptar el sistema de medida a la cadena de producción es necesario garantizar la adquisición de señales sin la intervención de los operarios de línea. Para ello, se realizan ensayos empleando dos posibles alternativas: palpador y fleje.

Los ensayos con palpador se llevaron a cabo empleando seis muelles con distinta constante elástica (k). Los resultados obtenidos fueron comparados con la señal proporcionada por un acelerómetro adherido mediante resina a la superficie del reductor. De acuerdo con la figura 44, el palpador tiene un efecto significativo en las medidas realizadas, actuando como filtro paso bajo de la señal de vibración. La frecuencia de corte del filtro estará directamente relacionada con la rigidez del muelle empleado, siendo menor la diferencia respecto a las medidas con acelerómetro adherido para valores de k superiores.

De acuerdo con los parámetros psicoacústicos utilizados en el control de calidad, la banda espectral comprendida entre 1.000 y 6.000 Hz juega un papel fundamental. Parámetros como la rugosidad o la fluctuación en reductores defectuosos presentan valores anormalmente elevados para dicha banda de frecuencias. Por tanto, su supresión impediría identificar determinados defectos y en consecuencia diagnosticar apropiadamente las muestras.

Un análisis más exhaustivo del dispositivo palpador empleado pone de manifiesto que una parte importante del efecto de filtrado se produce gracias al rozamiento existente entre el pistón y la camisa (zona donde queda alojado el muelle). Eliminando la camisa del dispositivo es posible reducir dicho efecto y conseguir medidas de mayor calidad. Las siguientes gráficas muestran los resultados obtenidos sin camisa empleando diferentes muelles.

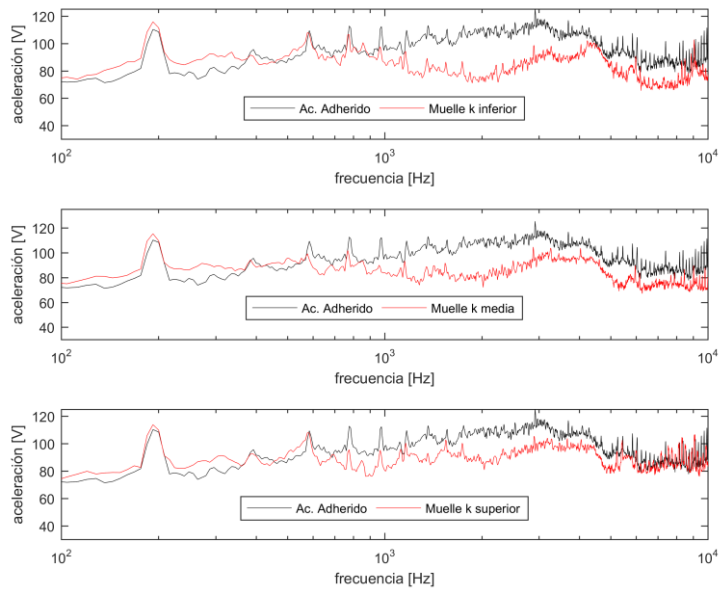


Figura 44. Espectro frecuencias medidas diferentes muelles. Comparación con acelerómetro adherido.

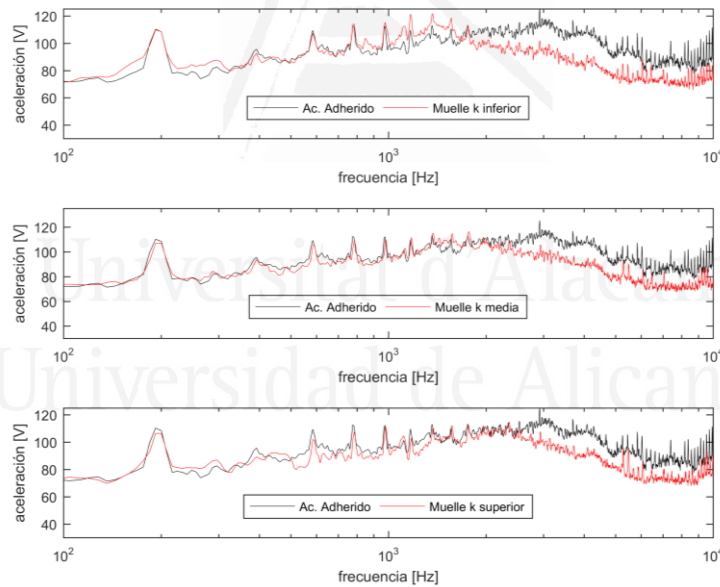


Figura 45. Medidas palpador muelle sin camisa.

La similitud entre la señal adquirida mediante acelerómetro adherido con cera y las señales con muelle mejora considerablemente al eliminar parte del dispositivo palpador. Sin embargo, a pesar de las mejoras obtenidas en las medidas sin camisa, la banda de frecuencias comprendida entre 3 y 6 kHz presenta una atenuación importante, impidiendo realizar un diagnóstico adecuado.

Una alternativa al palpador de muelle consiste en la utilización de un fleje metálico para garantizar el contacto entre la superficie vibrante y el acelerómetro. El montaje realizado permitirá modificar la longitud efectiva del fleje mediante la variación de posición del tornillo de fijación (figura 46). De esta forma es posible variar las condiciones de medida y comparar así el efecto de la rigidez del fleje. La figura 47 representa el espectro de frecuencias para cada una de las longitudes ensayadas. Según los resultados, no se aprecia una diferencia notable entre los espectros de frecuencias obtenidos.

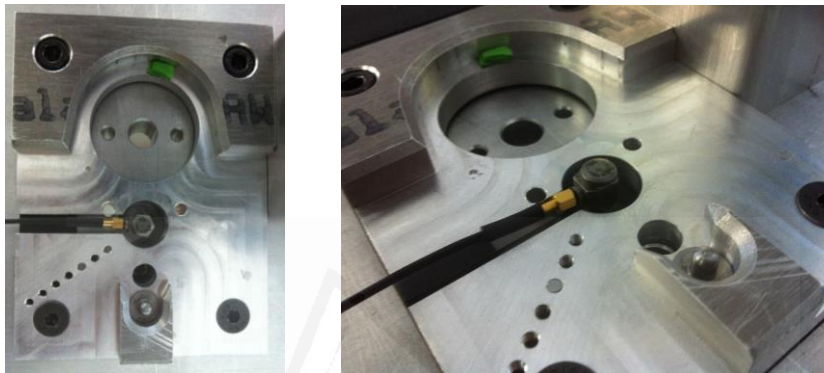


Figura 46. Montaje del fleje en la cama del reductor.

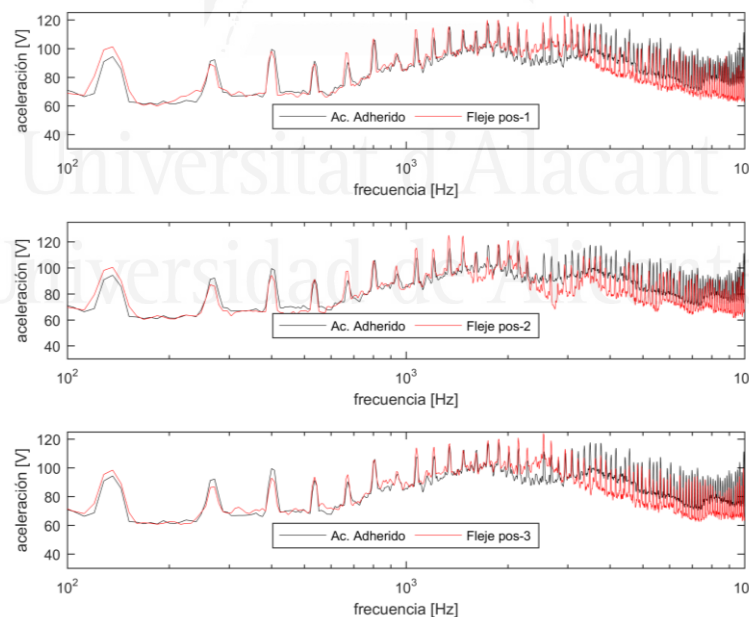


Figura 47. Espectro de frecuencias para diferentes longitudes de fleje.

Durante la realización de los ensayos se empleó un acelerómetro uni-axial, registrando la vibración correspondiente a la componente de aceleración paralelas al eje del transductor. Según el montaje experimental mostrado en la figura 48, la colocación del reductor sobre el sensor de medida

produce un desplazamiento del fleje, variando el ángulo entre la superficie de la muestra y la cara superior del acelerómetro.

MONTAJE FLEJE - ÁNGULO NULO



Figura 48. Esquema posicionamiento fleje. Ángulo respecto a reductor.

Para una correcta adquisición de la vibración, el eje del transductor deberá colocarse de manera perpendicular a la superficie de medida. Para garantizar esta situación, se realiza una pequeña modificación sobre el fleje, doblando ligeramente uno de sus extremos. En este caso, al posicionar el reductor sobre el sistema de medida, el sensor quedará orientada de manera apropiada (figura 49).

MONTAJE FLEJE - ÁNGULO CORREGIDO



Figura 49. Esquema posicionamiento fleje. Ángulo nulo respecto a reductor.

La figura 50 muestra el resultado obtenido para diferentes ángulos de contacto acelerómetro/reductor, comparando la medida realizada con fleje y la obtenida mediante el acelerómetro adherido con cera. El contenido espectral de la señal de vibración para el fleje corregido proporciona resultados más próximos a los obtenidos por medio de un acelerómetro pegado a la superficie. Este efecto se hace más notable para el rango de frecuencias comprendido entre 2 y 4 kHz.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el sistema de fleje proporcionó resultados más precisos y por tanto, fue la configuración seleccionada para la adaptación del sistema de detección de fallas a la línea de producción.

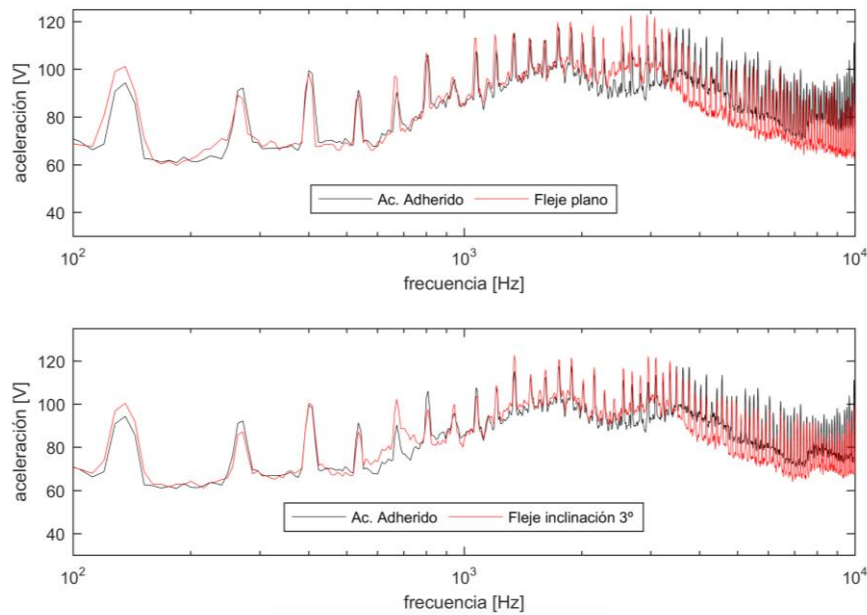


Figura 50. Comparación medidas con diferentes ángulos del fleje respecto a la superficie medida.

3.1.5. Determinación de umbrales de detección

Los umbrales de detección se establecen a partir de las medidas realizadas sobre 87 reductores en buen estado trabajando en vacío en único sentido de giro. Para cada una de las señales adquiridas en P1 se calculan los parámetros indicados en el apartado 2.1.1.5. A partir de un análisis estadístico de los datos se obtienen los descriptivos básicos para cada parámetro. Asimismo, se realiza una identificación de los valores atípicos, fijando como criterio para la eliminación de muestras superar en cuatro veces la desviación típica el valor medio para alguno de los parámetros estudiados. Finalmente se desecha una de las muestras del grupo, resultando un conjunto final compuesto por 86 reductores.

Con objeto de comparar el valor de los parámetros de detección entre reductores en buen estado y reductores defectuosos, se analizan las señales de vibración obtenidas en el punto P1 para 87 reductores con algún tipo de falla. Tal y como se observa en las siguientes figuras, los valores obtenidos para las muestras defectuosas, en la mayoría de parámetros, son superiores a los proporcionados por los reductores en buen estado.

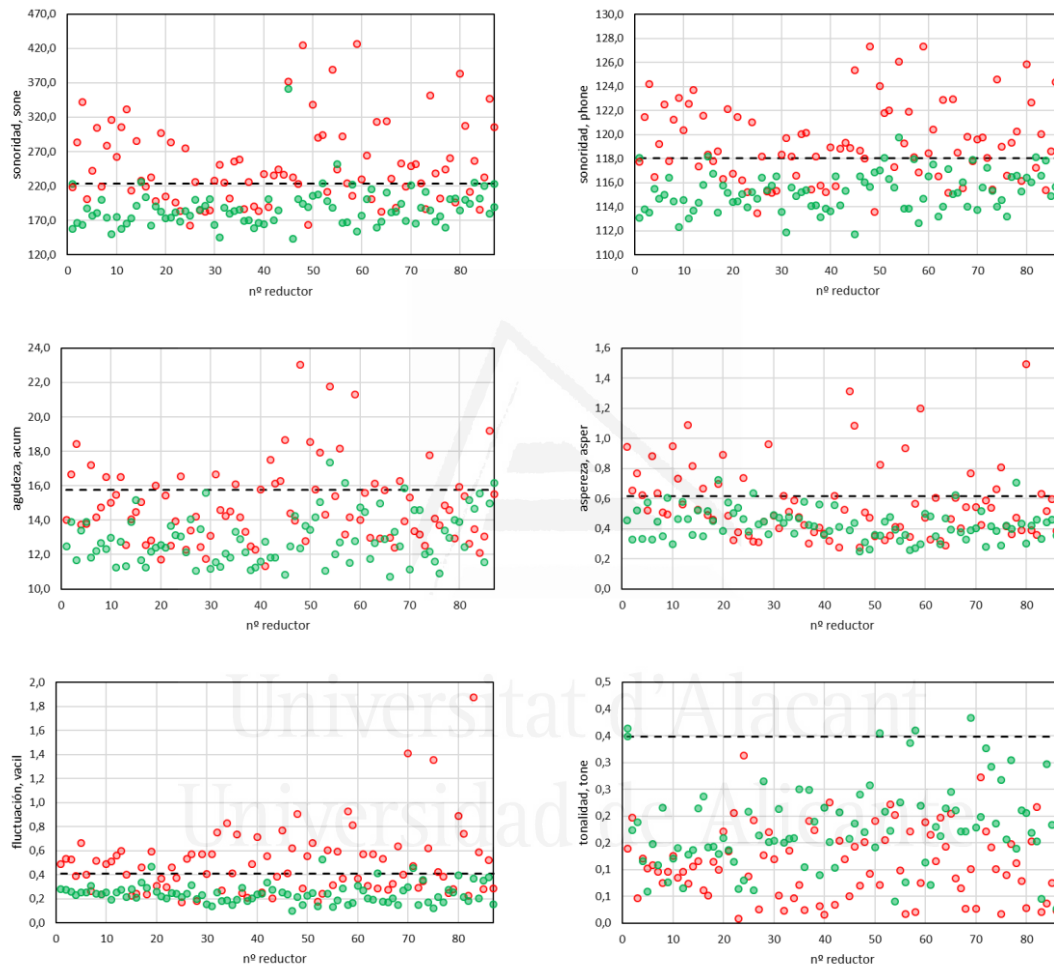


Figura 51. Comparación de los resultados obtenidos mediante parámetros psicoacústicos para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.

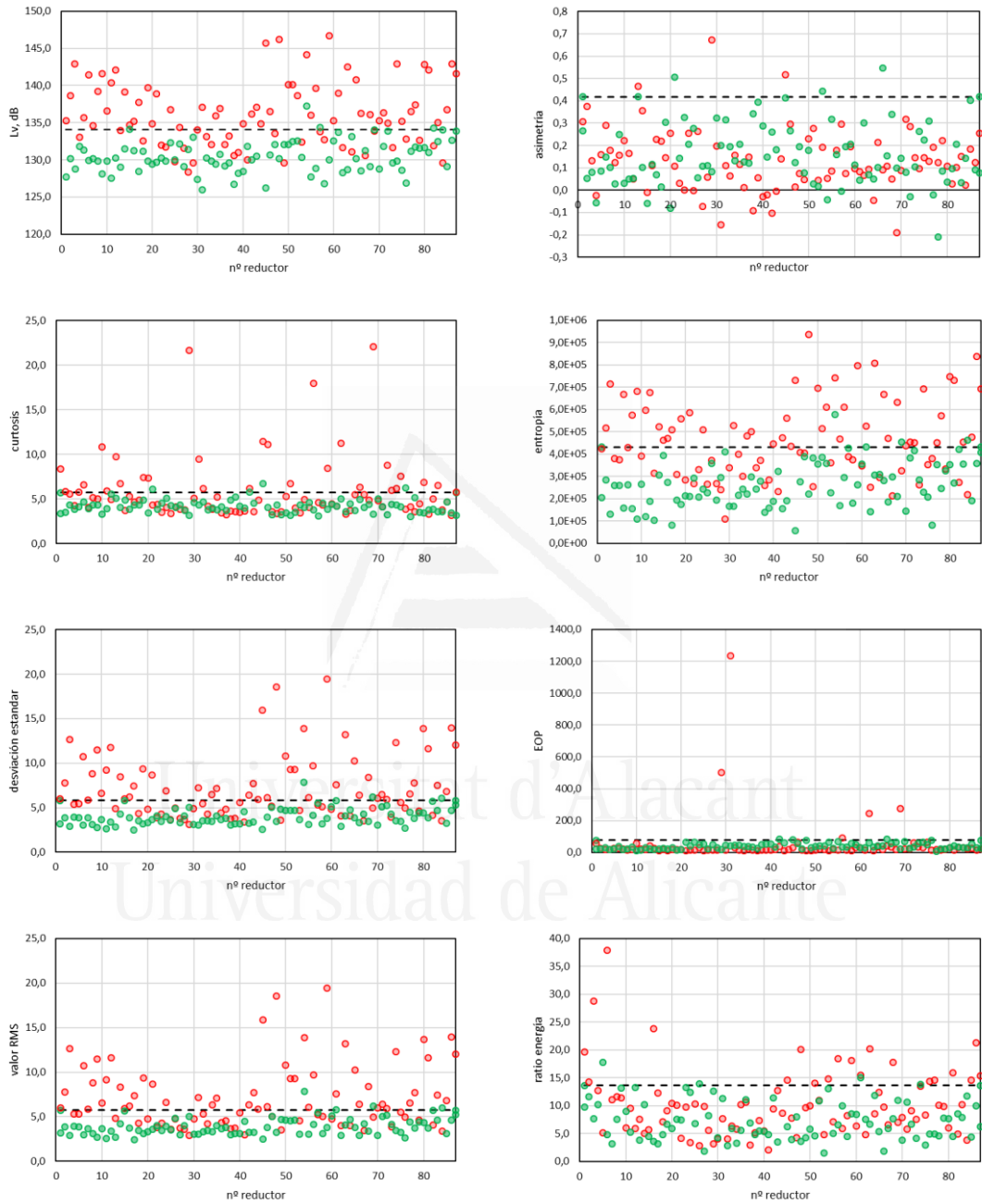


Figura 52. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.

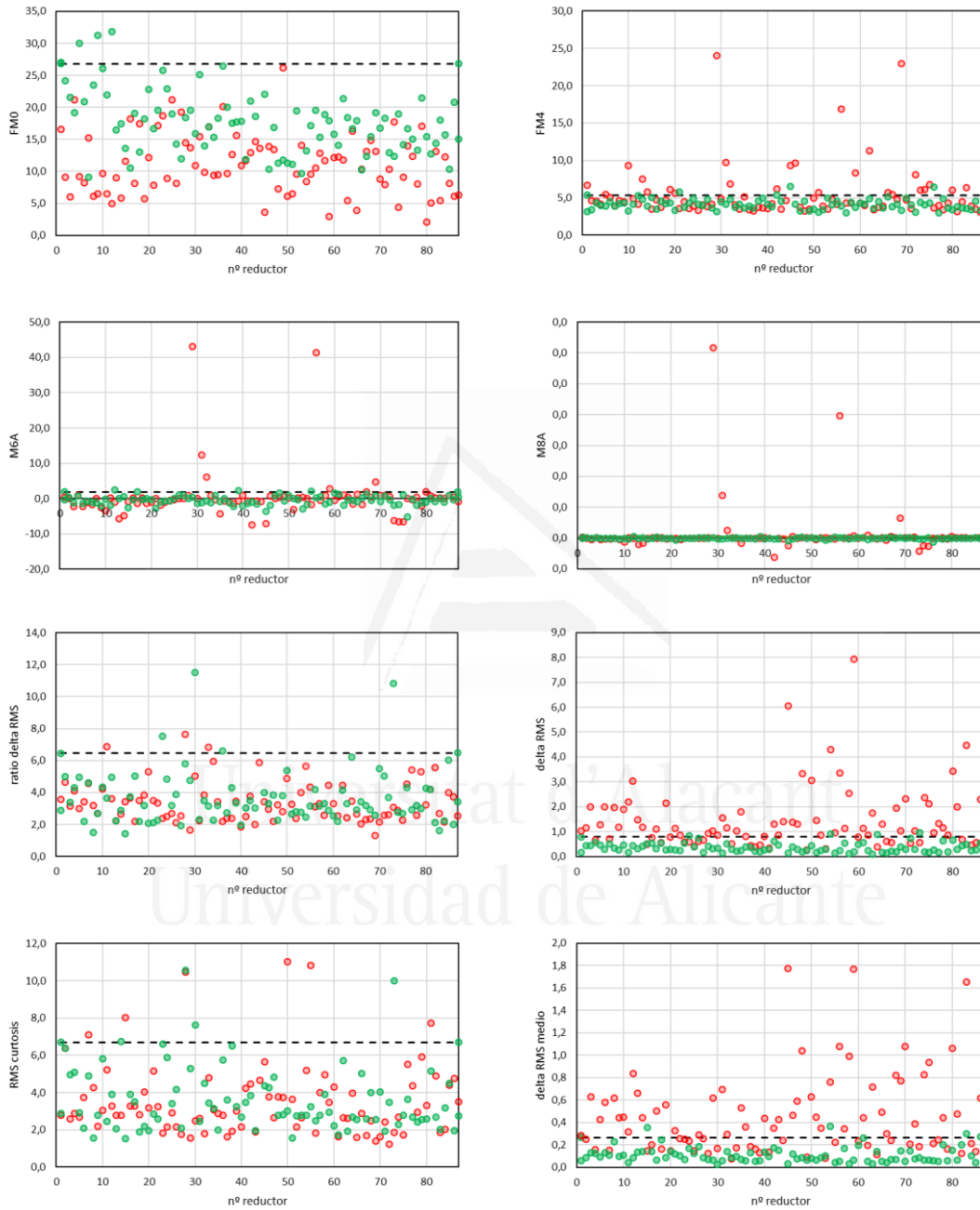


Figura 53. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.

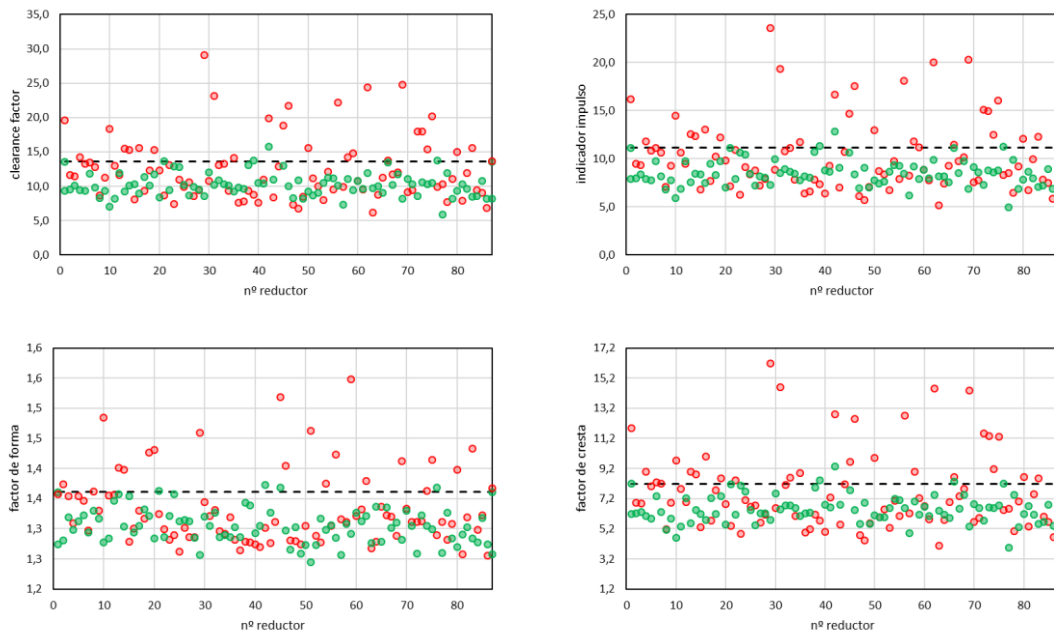


Figura 54. Comparación de los resultados obtenidos mediante indicadores de condición para reductores en buen estado (verde) y reductores defectuosos (rojo). La línea negra punteada indica el valor del percentil 95%.

Para identificar aquellos parámetros más relevantes a la hora de detectar fallas en reductores, se analizan los resultados agrupándolos de acuerdo con una variable cualitativa dicotómica con valores correcta-defectuosa. Según un ensayo de Kolmogorov-Smirnov con corrección de significación de Lilliefors aplicado a las muestras en buen estado, no todos los parámetros calculados presentan una distribución normal (tabla 8), existiendo en algunos casos asimetría positiva (figura 55). Del mismo modo, un ensayo de Levene muestra desigualdad de varianza para la mayoría de parámetros (tabla 9). Puesto que no se cumplen las condiciones de normalidad y homocedasticidad necesarias para aplicar un análisis de varianza, ANOVA, se utilizarán técnicas no paramétricas para el análisis de los datos.

Según un ensayo de Kruskal-Wallis, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores obtenidos para reductores en buen estado y reductores defectuosos con los parámetros Asimetría ($\chi^2(173)=0,932$; $p=0,334$), M6A ($\chi^2(173)=0,869$; $p=0,351$), M8A ($\chi^2(173)=1,149$; $p=0,284$), Ratio Delta RMS ($\chi^2(173)=0,286$; $p=0,593$) y RMS curtosis ($\chi^2(173)=0,137$; $p=0,711$). Estas métricas fueron eliminadas en análisis posteriores.

Tabla 8. Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov^a para los distintos parámetros de detección.

	Estadístico	gl	Sig.
Lv	0,088	86	0,094
Sonoridad (sone)	0,063	86	0,200*
Sonoridad (phone)	0,059	86	0,200*
Agudeza	0,101	86	0,031
Aspereza	0,071	86	0,200*
Fluctuación	0,115	86	0,007
Tonalidad	0,086	86	0,167
Asimetría	0,103	86	0,025
Curtosis	0,097	86	0,045
Entropía	0,067	86	0,200*
Desviación Estándar	0,113	86	0,008
EOP	0,113	86	0,009
Valor RMS	0,105	86	0,021
Ratio de Energía	0,106	86	0,019
FM0	0,098	86	0,039
FM4	0,072	86	0,200*
M6A	0,052	86	0,200*
M8A	0,133	86	0,001
Ratio Delta RMS	0,154	86	0,000
Delta RMS	0,154	86	0,000
RMS Curtosis	0,160	86	0,000
Delta RMS medio	0,147	86	0,000
Clearance Factor	0,100	86	0,035
Indicador de Impulso	0,097	86	0,043
Factor de Forma	0,071	86	0,200*
Factor de Cresta	0,095	86	0,052

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 9. Pruebas de igualdad de varianza para los distintos parámetros de detección.

	Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
Lv	33,058	1	171	,000
Sonoridad (sone)	51,664	1	171	,000
Sonoridad (phone)	31,914	1	171	,000
Agudeza	9,565	1	171	,002
Aspereza	32,148	1	171	,000
Fluctuación	36,652	1	171	,000
Tonalidad	1,028	1	171	,312
Asimetría	,455	1	171	,501
Curtosis	28,512	1	171	,000
Entropía	19,262	1	171	,000
Desviación Estándar	62,110	1	171	,000
EOP	5,862	1	171	,017
Valor RMS	61,544	1	171	,000
Ratio de Energía	8,452	1	171	,004
FM0	,018	1	171	,894
FM4	21,016	1	171	,000
M6A	5,555	1	171	,020
M8A	9,738	1	171	,002
Ratio Delta RMS	1,465	1	171	,228
Delta RMS	45,438	1	171	,000
RMS Curtosis	,404	1	171	,526
Delta RMS medio	61,561	1	171	,000
Clearance Factor	44,000	1	171	,000
Indicador de Impulso	43,835	1	171	,000
Factor de Forma	26,199	1	171	,000
Factor de Cresta	44,876	1	171	,000

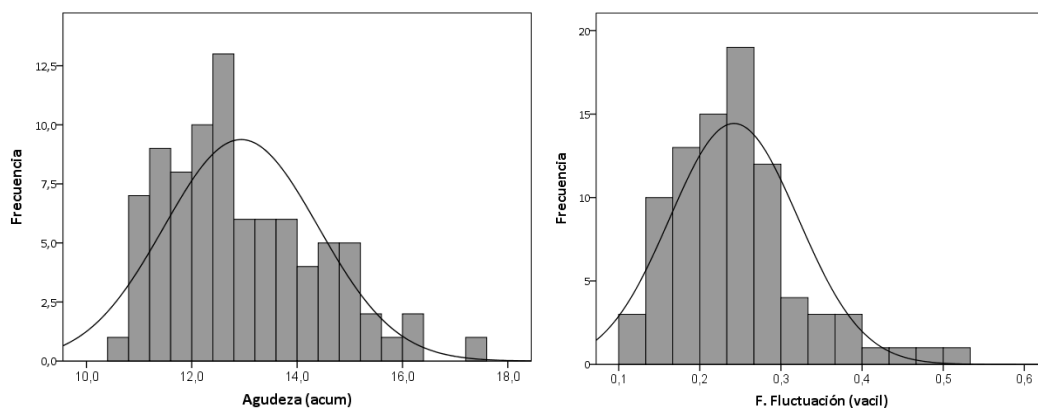


Figura 55. Distribución estadística de los datos para el parámetro agudeza y fluctuación.

A partir del ensayo subjetivo realizado durante la clasificación de muestras para la identificación del patrón de vibración asociado a cada defecto, se estableció una categorización de los reductores según el tipo de fallo existente conforme a la tabla 3. El método no paramétrico de Kurskal-Wallis reveló una diferencia estadísticamente significativa entre defectos. Un análisis post-hoc de los datos mediante comparación de parejas permitió agrupar los diferentes errores en función de las relaciones existentes (tabla 10). De los resultados se desprende la igualdad existente entre algunos de los parámetros: nivel de vibración – sonoridad; indicador de impulso – factor de cresta; delta rms medio – delta rms; desviación estándar – valor rms.

Tabla 10. Agrupación de los defectos según el parámetro de detección.

Parámetro	Agrupaciones
Lv	Grupo-1: 0; Grupo-2: 2, 3, 4. Grupo-3: 1
Sonoridad	Grupo-1: 0; Grupo-2: 2, 3, 4. Grupo-3: 1
Agudeza	Grupo-1: 0, 2, 3, 4; Grupo-2: 1
Aspereza	Grupo-1: 0, 2, 4; Grupo-2: 4, 2, 3; Grupo-3: 1
Fluctuación	Grupo-1: 0, 2, 3, 4; Grupo-2: 3, 4; Grupo-3: 1, 4
Tonalidad	Grupo-1: 1, 4, 2, 3; Grupo-2: 4, 2, 3, 0
Curtosis	Grupo-1: 0, 4, 2, 1; Grupo-2: 2, 1, 3
Entropía	Grupo-1: 0; Grupo-2: 3, 2, 4; Grupo-3: 1
Desviación Estándar	Grupo-1: 0, 3; Grupo-2: 3, 2, 4; Grupo-3: 1
EOP	Grupo-1: 0, 3; Grupo-2: 3, 1, 2; Grupo-3: 2, 4
Valor RMS	Grupo-1: 0, 3; Grupo-2: 3, 2, 4; Grupo-3: 1
Ratio de Energía	Grupo-1: 0; Grupo-2: 1, 2, 3, 4
FM0	Grupo-1: 1, 2; Grupo-2: 2, 3, 4; Grupo-3: 0
FM4	Grupo-1: 0, 4, 2, 1; Grupo-2: 2, 1, 3
Delta RMS	Grupo-1: 0, 2, 3; Grupo-2: 2, 3, 4; Grupo-3: 4, 1
Delta RMS medio	Grupo-1: 0, 2, 3; Grupo-2: 2, 3, 4; Grupo-3: 4, 1
Clearance Factor	Grupo-1: 0, 4, 2, 1; Grupo-2: 1, 3
Indicador de Impulso	Grupo-1: 0, 4, 2, 1; Grupo-2: 3
Factor de Forma	Grupo-1: 0, 4, 2, 3; Grupo-2: 3, 1
Factor de Cresta	Grupo-1: 4, 0, 2, 1; Grupo-2: 3

Para confirmar la relación existente entre los diferentes parámetros, se lleva a cabo un estudio de correlaciones bivariadas mediante el coeficiente de Pearson. Los resultados, incluidos en la tabla 11, indican una fuerte relación entre los parámetros nivel de vibración, sonoridad, entropía, desviación estándar y valor rms. Asimismo, se aprecia una correlación elevada entre el descriptor curtosis, FM4, *clearance factor*, indicador de impulso y factor de forma (tabla 11). Del mismo modo, cabe destacar un coeficiente de correlación de Pearson próximo a la unidad para los parámetros

clearance factor, indicador de impulso y factor de cresta (figura 56). Los parámetros psicoacústicos aspereza, fuerza de fluctuación y tonalidad no presentan relación con otras métricas.

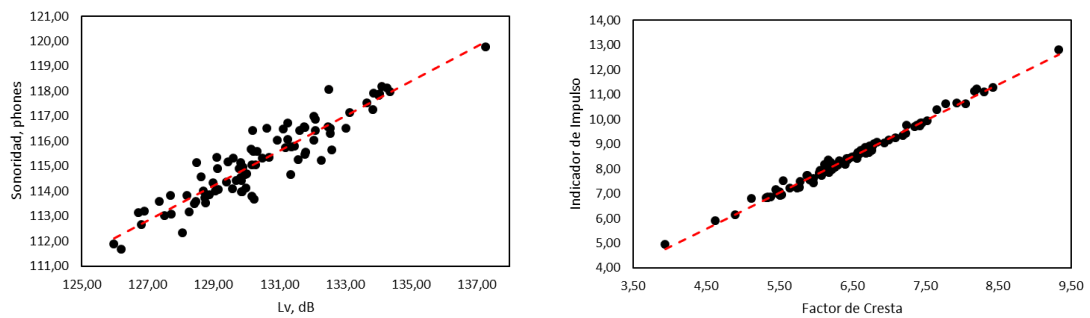


Figura 56. Correlación entre diferentes parámetros de detección.

Para poder determinar el grado de eficacia de los parámetros psicoacústicos en la detección de fallas y compararlos con los resultados obtenidos a través de indicadores de condición tradicionales, se calculan los umbrales de detección óptimos para cada conjunto de parámetros. Para ello, se realiza una simulación del proceso de detección, variando los umbrales utilizados de forma iterativa (figura 57). Para cada conjunto de datos se determina el porcentaje de muestras detectadas. La elección del umbral óptimo se basa en maximizar la diferencia entre el porcentaje de reductores detectados con fallas y el porcentaje de muestras en buen estado catalogadas como defectuosas, considerando un porcentaje aceptable de reductores correctos descartados del 10%. La optimización llevada a cabo para los parámetros psicoacústicos supuso un total de 160.000 iteraciones. En el caso de los indicadores de condición, por tratarse de un conjunto de datos mayor, las necesidades de cómputo se vieron incrementadas notablemente - 1E15 iteraciones considerando diez valores por parámetro - obligando a procesar cada parámetro de forma independiente (ver figura 58). La tabla 12 muestra el resultado obtenido para cada parámetro.

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre los diferentes parámetros de detección analizados.

	Lv	Sonoridad (sone)	Sonoridad (phon)	Agudeza (acum)	Aspereza (asper)	F. Fluctuación (vacil)	Tonalidad	Curtosis	Entropía	Desviación Est.	EOP	Valor RMS	Ratio de Energía	FM0	FM4	Delta RMS	Delta RMS Medio	Clearance Factor	Indicador de Impulso	Factor de Forma	Factor de Cresta
Lv	1.00	0.93	0.93	0.88	-0.10	0.15	0.03	-0.47	0.89	0.91	-0.41	0.90	0.35	-0.30	-0.47	0.51	0.60	-0.42	-0.42	-0.36	-0.41
Sonoridad (sone)	0.93	1.00	0.93	0.76	-0.13	0.12	0.15	-0.46	0.86	0.88	-0.33	0.85	0.07	-0.56	-0.44	0.41	0.53	-0.39	-0.39	-0.37	-0.38
Sonoridad (phone)	0.93	1.00	1.00	0.75	-0.13	0.13	0.15	-0.47	0.85	0.86	-0.34	0.84	0.06	-0.58	-0.45	0.41	0.52	-0.40	-0.40	-0.38	-0.38
Agudeza	0.88	0.76	1.00	1.00	-0.16	0.04	0.08	-0.55	0.90	0.90	-0.48	0.92	0.54	-0.02	-0.58	0.37	0.47	-0.50	-0.49	-0.48	-0.48
Aspereza	-0.10	-0.13	1.00	1.00	1.00	0.31	-0.40	0.47	-0.25	0.90	0.01	-0.18	0.19	0.18	0.42	0.21	0.11	0.41	0.39	0.51	0.36
F. Fluctuación	0.15	0.12	0.13	0.04	0.31	1.00	-0.21	0.14	-0.01	0.03	-0.11	0.01	0.02	-0.05	0.17	0.50	0.38	0.07	0.06	0.23	0.03
Tonalidad	0.03	0.15	0.15	0.08	0.40	0.08	1.00	-0.35	0.18	0.13	0.01	0.12	-0.28	-0.23	-0.33	-0.30	-0.32	-0.32	-0.31	-0.40	-0.28
Curtosis	-0.47	-0.46	-0.47	-0.55	0.47	-0.35	1.00	1.00	-0.65	-0.50	0.59	-0.50	-0.11	0.10	0.97	0.03	-0.01	0.85	0.83	0.94	0.78
Entropía	0.89	0.86	0.85	0.90	-0.25	0.18	-0.35	1.00	1.00	0.97	-0.43	0.97	0.33	-0.31	-0.65	0.34	0.41	-0.53	-0.52	-0.59	-0.49
Desviación Estándar	0.91	0.88	0.86	0.90	-0.18	0.03	0.13	-0.65	0.97	1.00	1.00	1.00	0.35	-0.31	-0.50	0.41	0.51	-0.42	-0.41	-0.42	-0.40
EOP	-0.41	-0.33	-0.34	-0.48	0.01	-0.11	0.01	0.59	-0.43	0.97	-0.40	1.00	-0.25	-0.18	0.62	-0.20	-0.29	0.69	0.70	0.48	0.70
Valor RMS	0.90	0.85	0.84	0.92	-0.18	0.02	0.12	0.01	-0.50	1.00	-0.40	1.00	0.41	-0.26	-0.51	0.42	0.51	-0.42	-0.42	-0.42	-0.40
Ratio de Energía	0.35	0.07	0.06	0.54	0.19	0.02	-0.28	-0.11	0.33	0.35	-0.25	0.41	1.00	0.59	-0.20	0.36	0.24	-0.11	-0.12	-0.04	-0.13
FM0	-0.30	-0.56	-0.58	-0.02	0.18	-0.05	-0.23	0.10	-0.31	0.35	0.41	0.41	0.59	1.00	0.03	-0.05	-0.11	0.01	0.00	0.11	0.00
FM4	-0.47	-0.44	-0.45	-0.58	0.42	0.17	-0.33	0.97	-0.65	-0.50	0.62	-0.51	0.03	1.00	1.00	0.01	-0.01	0.81	0.80	0.91	0.74
Delta RMS	0.51	0.41	0.41	0.37	0.21	0.50	-0.30	0.03	0.34	0.41	-0.20	0.41	0.36	-0.20	0.01	1.00	0.64	0.04	0.03	0.20	0.00
Delta RMS medio	0.60	0.53	0.52	0.47	0.11	0.38	-0.32	0.03	0.41	0.51	-0.29	0.51	0.24	-0.05	0.01	1.00	1.00	-0.09	-0.11	0.16	-0.15
Clearance Factor	-0.42	-0.39	-0.40	-0.50	0.41	0.07	-0.32	-0.01	-0.53	-0.42	0.69	-0.42	-0.11	0.01	0.81	0.04	0.64	1.00	1.00	0.78	0.99
Indicador de Impulso	-0.42	-0.39	-0.40	-0.49	0.39	0.06	-0.31	0.83	-0.52	-0.42	0.70	-0.42	-0.12	0.00	0.80	0.03	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00
Factor de Forma	-0.36	-0.37	-0.38	-0.48	0.51	0.23	-0.40	0.83	-0.52	-0.42	0.48	-0.42	-0.04	0.11	0.91	0.20	0.16	0.04	0.03	0.78	0.68
Factor de Cresta	-0.41	-0.36	-0.38	-0.48	0.36	0.03	-0.28	0.83	-0.49	-0.40	0.70	-0.40	-0.13	0.00	0.80	0.00	0.15	0.00	0.00	0.68	1.00

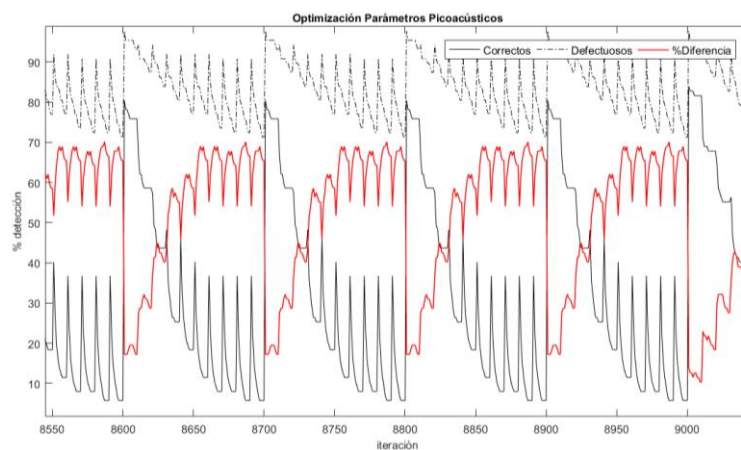


Figura 57. Resultados obtenidos para distintas iteraciones del método de optimización de los parámetros psicoacústicos.

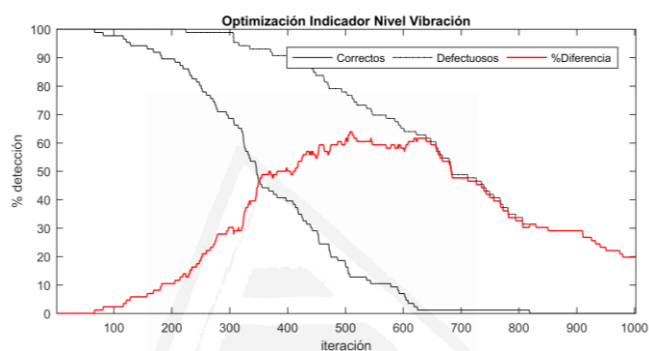


Figura 58. Resultados de detección para valores del parámetro nivel de vibración.

Tabla 12. Umbrales óptimos de detección de los diferentes parámetros.

Parámetros psicoacústicos		Indicadores de condición	
Sonoridad (phone)	118,00	Lv	134,37
Agudeza	16,20	Curtosis	5,12
Aspereza	0,58	Entropía	700000,00
F. fluctuación	0,42	Desviación estándar	5,31
Tonalidad	0,03	EOP	86,00
		Valor RMS	20,00
		Ratio de energía	14,01
		FM0	11,50
		FM4	5,39
		Delta RMS	0,74
		Delta RMS medio	0,28
		Clearance Factor	13,03
		Indicador de impulso	13,00
		Factor de forma	1,40
		Factor de cresta	7,83

A partir de los umbrales óptimos calculados se establecen los porcentajes de detección para cada uno de los métodos. En la tabla 13 se comparan los resultados con los obtenidos empleando los percentiles 98%, 95%, 90% y 85%. Debido a la relación existente entre diferentes indicadores de condición y el parámetro valor rms, y después de comprobar su influencia sobre el porcentaje de muestras detectadas, se decide eliminarlo del estudio.

Tabla 13. Porcentajes de detección.

	CORRECTOS		DEFECTUOSOS		DIFERENCIAS	
	Psicoacústica	I. Cond.	Psicoacústica	I. Cond.	Psicoacústica	I. Cond.
Percentil 98%	5%	7%	69%	76%	64%	69%
Percentil 95%	16%	25%	83%	85%	66%	60%
Percentil 90%	27%	44%	84%	91%	57%	47%
Percentil 85%	45%	56%	89%	92%	44%	35%
Óptimo	14%	36%	84%	86%	44%	50%

El ensayo da como resultado un 84% de las muestras defectuosas detectadas mediante parámetros psicoacústicos, y un 86% empleando indicadores de condición estándar. Sin embargo, atendiendo a los reductores en buen estado, un 14% son considerados como defectuosos por el método psicoacústico, mientras que un 36% son descartados por los indicadores de condición tradicionales. Los resultados derivados de un análisis de Kruskal-Wallis indican una diferencia estadísticamente significativa entre los rangos de los diferentes parámetros, $\chi^2(19)=361,07$; $p<0,05$. A partir de un ensayo de comparación de parejas se establecen las relaciones indicadas en la tabla 14. Parámetros como la tonalidad, la entropía y EOP presentan una diferencia mayor respecto al resto de índices. El factor de cresta y el indicador de impulso muestran un comportamiento similar.

Analizando el porcentaje de muestras detectadas se establece la sensibilidad de los diferentes parámetros en función del tipo de defecto. De acuerdo con la tabla 15, el nivel de vibración, la sonoridad, la desviación estándar, FMO y el parámetro Delta RMS Medio describen en mayor medida el error de tipo 1. La sonoridad proporciona una detección del 73% de los fallos de tipo 2. Respecto al error tipo 3, el parámetro factor de cresta lo describe en el 70% de los casos, mientras que la fluctuación supone el 68,4% de los defectos de tipo 4. Delta RMS actúa de una manera más global, facilitando un porcentaje de detección elevado para todas las tipologías de error. Destaca la diferencia existente entre el parámetro factor de cresta y el indicador de impulso. Pese a existir una alta correlación entre ambos indicadores, los porcentajes obtenidos para cada uno de ellos varían considerablemente.

Tabla 14. Relación entre los diferentes parámetros de detección.

	Lv	Sonoridad	Agudeza	Aspereza	F. Fluctuación	Tonalidad	Curtosis	Entropía	Desviación Estándar	EOP	Ratio Energía	FM0	FM4	Delta RMS	Delta RMS Media	Clearance Factor	Indicador de Impulso	Factor de Forma	Factor de Cresta
Lv	X	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	--	--	X	X	--
Sonoridad	--	X	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	--	--	X	X	--
Agudeza	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Aspereza	--	--	--	X	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Fluctuación	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	--	--	--	X	X	--
Tonalidad	X	X	--	X	X	X	--	X	--	X	--	X	--	X	X	--	--	--	X
Curtosis	--	--	--	--	--	X	X	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Entropía	X	X	--	X	X	--	X	X	--	--	X	--	X	X	--	--	--	--	X
Desviación Est.	--	--	--	--	--	X	--	X	X	--	--	--	--	--	--	--	X	X	--
EOP	X	X	--	X	X	--	X	--	X	X	--	X	--	X	X	X	--	--	X
Ratio de Energía	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--
FM0	--	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	X	X	--
FM4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	--	--
Delta RMS	--	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	X	--	--	--	X	X	--
Delta RMS medio	--	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	--	X	--	--	X	X	--
Clearance Factor	--	--	--	--	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	X	--	--	--
Ind. de Impulso	X	X	--	--	X	--	--	--	X	--	--	X	--	X	X	--	X	--	--
Factor de Forma	X	X	--	--	X	--	--	--	X	--	--	X	--	X	X	--	--	X	--
Factor de Cresta	--	--	--	--	--	X	--	X	--	X	--	--	--	--	--	--	--	--	X

Con objeto de mejorar el porcentaje de detección de muestras defectuosas se combinan los métodos de análisis empleados: indicadores de condición y psicoacústicos. Parámetros redundantes o cuya influencia sobre el resultado final se considera despreciable fueron eliminados. Finalmente, se incluyen la sonoridad, la fluctuación, FM4 y el factor de cresta en el sistema de análisis. Los resultados muestran un 89% de detecciones para reductores en mal estado, lo que supone un incremento del 5% respecto al método psicoacústico y del 3% respecto a los indicadores de condición por separado. Sin embargo, el porcentaje de muestras en buen estado que fueron identificadas como defectuosas se incrementó hasta el 17,5%.

Tabla 15. Porcentaje de detección de cada parámetro según el tipo de error.

	Error tipo 1	Error tipo 2	Error tipo 3	Error tipo 4
Lv	100,0%	63,6%	61,8%	60,5%
Sonoridad	100,0%	72,7%	55,9%	65,8%
Agudeza	25,0%	18,2%	32,4%	13,2%
Aspereza	75,0%	27,3%	55,9%	21,1%
F. fluctuación	75,0%	18,2%	41,2%	68,4%
Tonalidad	0,0%	0,0%	5,9%	18,4%
Curtosis	75,0%	36,4%	61,8%	21,1%
Entropía	50,0%	9,1%	2,9%	13,2%
Desviación estándar	100,0%	54,5%	64,7%	63,2%
EOP	0,0%	0,0%	14,7%	0,0%
Ratio de energía	50,0%	27,3%	20,6%	21,1%
FM0	100,0%	63,6%	38,2%	57,9%
FM4	75,0%	9,1%	47,1%	15,8%
Delta RMS	100,0%	81,8%	64,7%	73,7%
Delta RMS medio	100,0%	45,5%	52,9%	63,2%
Clearance factor	50,0%	18,2%	58,8%	21,1%
Indicador de impulso	0,0%	0,0%	35,3%	5,3%
Factor de forma	25,0%	9,1%	17,6%	13,2%
Factor de cresta	50,0%	18,2%	70,6%	18,4%

Algunos de los reductores no detectados por el sistema habían sido catalogados previamente por los operarios de producción como dudosos. En algunos casos, el análisis subjetivo determinó la existencia de fallos únicamente al someter al reductor a algún tipo de carga. En otros, la aparición del defecto se produjo al invertir el sentido de giro de las muestras. Puesto que los ensayos de vibración realizados no contemplaban tales condiciones de funcionamiento, estas muestras fueron eliminadas del cómputo general de detecciones. De esta forma, el porcentaje total de reductores defectuosos identificados ascendió al 91,7%. El 75% de las muestras no identificadas se asociaron con una vibración excesiva de la parte superior de las muestras y que, por tanto, no se hizo patente en las medidas realizadas en el punto P1. Este comportamiento se define mediante ensayos subjetivos como fallo de motor (tabla 16). Con objeto de identificar este tipo de defectos, se llevan a cabo medidas de vibración en la posición P2. Para cada muestra se analiza el nivel de aceleración en un rango de frecuencias comprendido entre 16 y 4.000 Hz, comparando los resultados con los valores obtenidos para reductores en buen estado (ver figura 59). La utilización de un nuevo sensor de medida en la posición P2 permite identificar, mediante el nivel global de aceleración, aquellos

reductores con una vibración excesiva en la zona de motor. Finalmente, del total de muestras defectuosas analizadas en las posiciones P1 y P2, el 96,4% son detectadas correctamente.

Tabla 16. Valoración subjetiva de los reductores no identificados como defectuosos a través del punto P1.

Dudoso. Al frenarlo hace un poco de ruido.
Dudoso. Queda muy poco ruido al frenarlo. Vibra, pero no se oye. Rebote motor.
Ruido de motor y golpeteo. No hace falta frenarlo. Golpeteo diferente. Parece de excentricidad.
Ruido rebote motor.
Golpeteo muy débil. Excentricidad.
Ruido de motor muy alto.
Ruido alto motor.
Ruido discontinuo. Excentricidad. Dudoso.

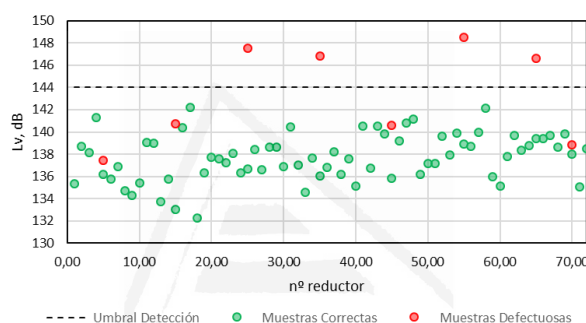


Figura 59. Medidas del nivel de aceleración global en P2. Comparación entre reductores en buen estado y muestras defectuosas.

3.2. Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto

3.2.1. Ensayo 1: calidad sonora en espejos retrovisores eléctricos

3.2.1.1. Análisis de los estímulos sonoros

El análisis de las señales adquiridas para cada muestra mostró la presencia de ruidos impulsivos al inicio del ciclo de giro de los espejos (ver figura 60). Este comportamiento resultó menos acentuado para la muestra S3, cuyo movimiento inicial resultó más suave y progresivo (figura 60c). Sin embargo, S3 presentó un ruido elevado a la finalización del ciclo.

La composición espectral del ruido generado por los espejos retrovisores está ligada a la composición interna de las muestras, variando en función de la reducción empleada en la cadena cinemática y de la velocidad de rotación de sus componentes. Todas las muestras presentan una respuesta en frecuencia de banda ancha con diferentes armónicos destacables. Para S1 se observa una concentración mayor de componentes tonales en la banda entre 1 y 2 kHz. Para S2, el rango se establece entre 500 a 2.000 Hz, pese a contener una energía elevada a más alta frecuencia. Para S3

destaca una componente armónica en torno a 1.200 Hz. La muestra S4 presenta un contenido espectral más uniforme dentro de un ancho de banda mayor, 500 - 4.000 Hz.

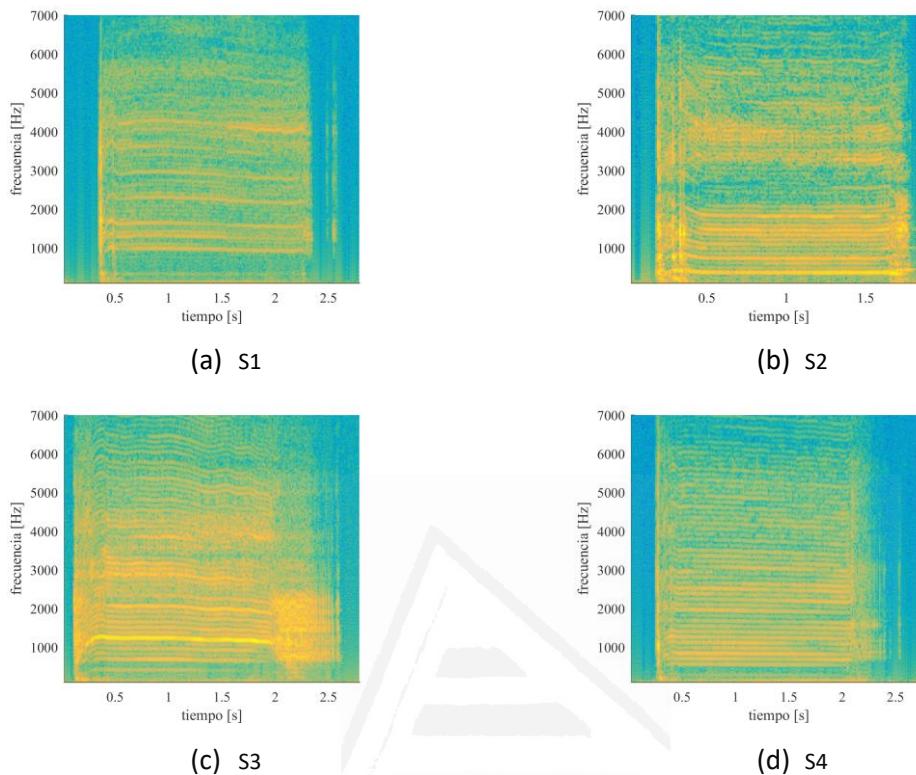


Figura 60. Espectrograma del ruido generado por los retrovisores eléctricos.

Para cada una de las muestras se calculó el nivel de presión sonora junto a diferentes parámetros psicoacústicos: sonoridad, agudeza, aspereza, fluctuación, sensación de agrado sonoro y molestia. Para ello, las señales sonoras se dividieron en tres regiones distintas correspondiendo con el inicio de giro del espejo (Z1 - ataque), la parte estable de giro (Z2 - estacionario) y el final del movimiento o bloqueo (Z3 - relajación). La tabla 17 muestra los resultados para cada región, además de los obtenidos considerando el ciclo de giro completo.

De acuerdo con los valores obtenidos para el ciclo completo, las muestras presentan un nivel de presión sonora con variaciones superiores a los 8 dB entre ellas. Los parámetros agudeza, fuerza de fluctuación y aspereza, no presentan diferencias significativas entre las muestras. Por el contrario, la sonoridad calculada sigue un patrón similar al nivel de presión sonora, con un valor claramente superior para la muestra S4. Atendiendo a la agradabilidad, el usuario preferirá la muestra S2, mientras que S1 representará el espejo con peor valoración. Este resultado contrasta con el obtenido a partir de la molestia objetiva, mediante la cual se establecen S2 y S1 como las muestras menos molestas. Tal y como se indicó anteriormente, la muestra S3 presenta un ruido

característico a la finalización del ciclo de giro. Este sonido, similar a un crujido, queda descrito a través de la aspereza en Z3, con un valor sensiblemente mayor respecto al resto de espejos retrovisores. La correlación entre los diferentes parámetros calculados y la percepción subjetiva del usuario se analizará en los siguientes apartados.

Tabla 17. Resultados de los parámetros psicoacústicos para los espejos retrovisores.

Sample	Z1 - Ataque				Z2 - Estacionario				Z3 - Relajación				Ciclo Completo			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
SPL, dB(A)	56,40	48,00	48,60	57,50	46,10	44,30	49,20	51,70	38,70	40,00	47,10	45,80	48,40	43,00	48,70	51,60
Sonoridad, sone	9,88	6,99	5,98	10,55	4,88	4,85	6,01	7,59	2,91	3,53	4,96	5,05	5,79	4,60	5,73	7,48
Agudeza, acum	1,55	1,73	1,51	1,76	2,05	1,70	1,65	2,24	1,74	1,47	1,49	2,09	1,75	1,66	1,58	2,08
Fluctuación, vacil	---	---	---	---	0,01	0,00	0,05	0,01	1,13	1,62	1,66	1,56	0,23	1,69	0,17	2,20
Tonalidad, tu	0,00	0,10	0,00	0,00	0,13	0,97	0,18	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,61	0,04	0,10
Aspereza, asper	0,68	0,68	0,69	0,60	1,53	0,87	0,92	1,38	1,34	1,42	1,63	1,38	2,96	2,48	2,71	2,47
Molestia objetiva, a	---	---	---	---	10,80	9,77	12,9	20,90	11,15	14,95	17,36	25,52	10,93	14,66	13,20	30,70
Agradabilidad, pu	0,10	0,14	0,11	0,08	0,07	0,37	0,20	0,09	0,06	0,07	0,06	0,04	0,03	0,11	0,03	0,03

3.2.1.2. Participantes

En la evaluación sonora de los espejos retrovisores participaron de forma voluntaria un total de 62 personas. Los resultados correspondientes a uno de los participantes fueron excluidos de acuerdo con los criterios definidos en el apartado 3.2.1.3, quedando finalmente un conjunto de 61 oyentes con edad media 29,4 años (rango de edades 71 – 19; 21,3% de mujeres). En el ensayo participaron tres universidades distintas - Universidad de Kyushu en Japón (JP), Universidad de Coimbra en Portugal (P); y Universidad de Alicante en España (SP). La mayoría de sujetos fueron reclutados de entre los estudiantes. La tabla 18 recoge los principales datos estadísticos de cada una de las universidades involucradas en el ensayo.

Tabla 18. Características demográficas de los participantes.

Universidad	N	Edad Media	% Fem.
Universidad de Kyushu, JP	24	22,4	20,8
Universidad de Coimbra, P	13	37,4	30,8
Universidad de Alicante, SP	24	32,1	16,7

3.2.1.3. Validación de datos. Análisis del factor de consistencia

Como etapa previa para el cálculo de la agradabilidad subjetiva de las muestras, se estudió la validez de los datos obtenidos en los ensayos auditivos. El oyente puede cometer diferentes errores a lo

largo del proceso de evaluación debido a una pérdida de atención, a una variación de su criterio o a la dificultad existente para comparar muestras similares [120]. El análisis se llevó a cabo sobre los resultados obtenidos mediante el método de comparación de parejas y teniendo en consideración los errores descritos en la tabla 19. Para cada matriz de decisión se calculó el factor de consistencia tal y como se describe en [121]. A partir de los resultados, los datos correspondientes a uno de los participantes fueron eliminados del ensayo, tanto para el método de comparación de parejas como para el procedimiento de ranking. Una vez establecida la consistencia de los datos, se calculó la agradabilidad subjetiva según el apartado 2.1.2.1.

Tabla 19. Tipos de error en matrices de decisión.

Error de valoración	Error
Comparación consigo mismo	$P_{ij} \neq 0 (i = j)$
Comparación entre dos muestras sonoras	$P_{ij} \cdot P_{ji} \geq 0$ y $P_{ij}, P_{ij} \neq 0$ al mismo tiempo
Tríadas circulares (i-j-k)	$\begin{cases} P_{ij} > 0, P_{jk} \geq 0, \text{pero } P_{ik} \leq 0 \\ P_{ij} = 0, \text{pero } P_{ik} \neq P_{jk} \\ P_{ij} < 0, P_{jk} \leq 0, \text{pero } P_{ik} \geq 0 \end{cases}$

3.2.1.4. Agradabilidad sonora de espejos retrovisores eléctricos

En un primer análisis se establecieron las diferencias entre los resultados obtenidos en cada uno de los laboratorios participantes. Según las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene, los datos no cumplen las condiciones de normalidad y homocedasticidad necesarias para implementar un análisis de varianza (ANOVA), por lo que se utilizó el método no paramétrico de Kruskal-Wallis. Los resultados indicaron una diferencia significativa entre laboratorios para los métodos de comparación de parejas y el procedimiento de ranking. Esta diferencia resulta especialmente significativa entre las preferencias obtenidas para Japón y Portugal, pudiendo deberse tanto a factores culturales como a pequeñas diferencias en el ensayo auditivo (calibración, auriculares, ...). Según los comentarios registrados por cada oyente al finalizar el ensayo, los usuarios de Japón consideran más crítico el ruido generado durante la relajación del movimiento (Z3). Este fenómeno conlleva a una penalización mayor para la muestra S3, con una desviación estándar en los datos muy reducida.

Para realizar una comparación entre la agradabilidad subjetiva de las muestras, los datos correspondientes a los diferentes laboratorios fueron agrupados. Un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó una diferencia significativa entre muestras para los dos ensayos realizados. Para el método de comparación de parejas, las muestras S1 y S2 resultan estadísticamente iguales

según demuestra un estudio *post-hoc*. En el caso de procedimiento de ranking, todas las muestras presentan diferencias. La siguiente tabla recoge los valores de agradabilidad media obtenidos para cada uno de los espejos ensayados.

Tabla 20. Agradabilidad Sonora media obtenida según el método de análisis.

Muestra	Comparación de parejas		Ranking	
	Agradabilidad	Desviación	Agradabilidad	Desviación
	media	estándar	media	estándar
S1	68,31	19,11	66,12	26,87
S2	82,92	24,79	84,14	24,80
S3	10,52	19,30	14,75	27,57
S4	39,21	25,11	34,97	24,66

Con objeto de establecer las diferencias existentes entre los métodos de ensayo empleados, se lleva a cabo un análisis de Mann-Whitney sobre el conjunto de muestras. Los resultados no indican una diferencia estadísticamente significativa para ningún espejo, lo que denota la igualdad existente entre ambos métodos. De forma gráfica, dicha igualdad queda reflejada en la figura 61.

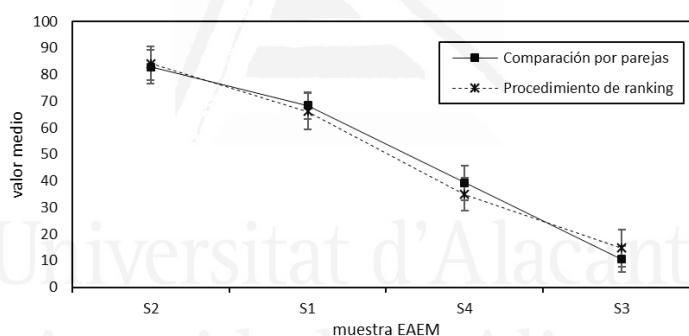


Figura 61. Agradabilidad Sonora media para los EAEM obtenida por los métodos de comparación de parejas y procedimiento de ranking.

A partir de la agradabilidad media calculada para cada método, se emplea el coeficiente de correlación de Pearson con objeto de determinar la relación existente con los distintos parámetros psicoacústicos. Los resultados indican una mayor correlación con la percepción subjetiva para las regiones estacionarias y de relajación del ciclo de giro de los espejos. Los indicadores más relevantes corresponden, de manera inversa, a aquellos relacionados con el nivel de ruido generado por la muestra: nivel de presión sonora y la sonoridad (tabla 21). Sin embargo, cabe destacar la elevada correlación existente entre la percepción del usuario y la aspereza al final del ciclo, lo que explicaría el comportamiento ante el ruido generado por alguna de las muestras.

Tabla 21. Coeficiente de correlación de Pearson entre agradabilidad subjetiva y los parámetros psicoacústicos más representativos.

	Comparación de parejas			Procedimiento de ranking		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
SPL ⁻¹ , dB(A)	-0,04	0,79	0,91	0,06	0,85	0,91
Sonoridad ⁻¹	-0,36	0,69	0,78	-0,25	0,75	0,79
Aspereza ⁻¹	-0,13	-0,07	0,74	-0,23	0,03	0,66

3.2.2. Ensayo 2: molestia producida por los sonidos de advertencia de vehículos

3.2.2.1. Participantes

Un total de 39 personas, la mayoría de ellos estudiantes universitarios, participaron en los ensayos auditivos para establecer la molestia sonora creada por los sonidos de advertencia empleados en vehículos eléctricos (edad media de 27,8 años; rango de edades 16 – 69; 25,6% de mujeres). Todos ellos tomaron parte de forma voluntaria y en ninguno caso indicaron problemas auditivos en el cuestionario previo a los ensayos.

3.2.2.2. Molestia sonora de sonidos de advertencia en vehículos eléctricos

Los datos registrados a lo largo de los ensayos fueron tratados con objeto de corregir el sesgo introducido por los oyentes a la hora de emitir un juicio. En determinadas ocasiones, los participantes pueden adoptar una actitud conservadora, evitando valorar las muestras según los extremos de la variable de enjuiciamiento. En otros casos, los oyentes actúan de manera más generosa, tendiendo a ensanchar el margen de decisión lo máximo posible. Para evitar este tipo de situaciones, los valores proporcionados por cada individuo fueron normalizados según una distribución con media nula y desviación típica unidad. Posteriormente, para mayor comodidad a la hora de analizar los resultados, los datos fueron escalados en el rango 0 – 1.000.

En primer lugar, se analizó la influencia del género a la hora de valorar la molestia originada por las muestras. Un ensayo de Shapiro-Wilk, método apropiado para un conjunto de datos inferior a 50 muestras, indicó que solo los valores obtenidos para el género femenino presentan una distribución normal – $F_{\text{MASCULINO}}(290)=0,990$, $p=0,038$; $F_{\text{FEMENINO}}(100)=0,987$, $p=0,468$. Por el contrario, los datos presentan igualdad de varianza según se desprende del ensayo de Levene - $F(1, 388)=0,006$, $p=0,94 < 0.05$. De esta forma, no se cumple la condición de normalidad necesaria para establecer un análisis paramétrico de las muestras. Sin embargo, para comprobar la robustez del método de análisis de varianza ante la violación de alguna de sus condiciones, se lleva a cabo una comparación con la prueba no paramétrica de Mann-Whitney (MW). Los resultados obtenidos en ambos casos

indican que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la molestia sonora según el género – ANOVA: $F(1,388)=0,00$, $p = 1,00$; MW: $U = 1.4322,0$, $p=0,885$.

En un segundo estudio se analizaron los resultados obtenidos en función de la edad del oyente, definiendo para ello tres categorías: menor de 25, entre 25 y 45 años, mayor de 45. De acuerdo con el método ANOVA, no existe una relación significativa entre la molestia sonora causada por los sonidos de advertencia y la edad de los participantes: $F(2,380)=0,00$, $p=1,00$. El mismo resultado se desprende del ensayo no paramétrico de Kruskal-Wallis (KW): $\chi^2(2)=0,046$; $p=0,997$.

Por último, se investiga la relación existente entre los diferentes sonidos en relación a la molestia sonora. Tal y como se muestra en la tabla 22, los datos presentan una distribución normal, a excepción de S5. Asimismo, los resultados obtenidos mediante el método de Levene establecen la igualdad de varianza para todas las muestras - $F(9, 380)=1,615$, $p=0,109 < 0,05$. Una prueba ANOVA indica una diferencia estadísticamente significativa entre las muestras - $F(9,380)=13,178$, $p<0,05$. Mediante un análisis *post-hoc* HSD de Tukey se clasifican los sonidos de advertencia en cinco grupos (ver tabla 23). Es posible establecer una diferencia clara entre las muestras [WS2, CI, WS7, EV, WS1] y [WS3, WS6, WS4, WS5]. La figura 62 recoge de manera ordenada el valor promedio de molestia sonora para cada sonido de advertencia. Cabe destacar la valoración obtenida para los vehículos sin sonido de advertencia: combustión interna (CI) y eléctrico (EV). De acuerdo con la percepción del usuario, el ruido generado por el vehículo eléctrico resulta ligeramente más molesto que el producido por un sistema de combustión interna. Este comportamiento puede deberse en parte a la aceptación socio-cultural del ruido del vehículo tradicional.

Tabla 22. Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para la molestia sonora de los diferentes sonidos de advertencia.

	WS	Estadístico	gl	Sig.
Molestia sonora	1,0	0,972	39	0,439
	2,0	0,956	39	0,126
	3,0	0,952	39	0,095
	4,0	0,971	39	0,406
	5,0	0,918	39	0,007
	6,0	0,973	39	0,468
	7,0	0,973	39	0,477
	8,0	0,964	39	0,240
	EV	0,958	39	0,157
	CI	0,967	39	0,298

Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 23. Ensayo HSD Tukey para los diferentes sonidos de advertencia.

WS	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
2,0	39	337,91				
Cl	39	363,33	363,33			
7,0	39	404,63	404,63	404,63		
EV	39	413,10	413,10	413,10		
1,0	39	415,95	415,95	415,95		
8,0	39	441,67	441,67	441,67	441,67	
3,0	39		479,78	479,78	479,78	
6,0	39			514,98	514,98	
4,0	39				559,72	559,72
5,0	39					685,84
Sig.		,232	,111	,161	,100	,058

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 39,000.

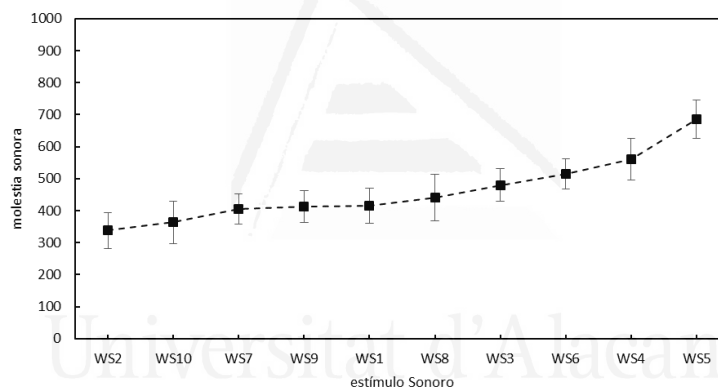


Figura 62. Molestia sonora media para los distintos sonidos de advertencia.

Atendiendo a la clasificación realizada en la tabla 6 y según se desprende de un ensayo de Kruskal-Wallis, no existe una diferencia significativa entre la molestia sonora obtenida para los sonidos de advertencia y sus características espectrales - $\chi^2(3)=1,744$; $p=0,627$.

Para cada muestra sonora se determinaron los parámetros psicoacústicos incluidos en la tabla 24. De acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson, los resultados indican una relación muy baja con la molestia media obtenida en los ensayos auditivos. Parámetros como la sonoridad, la agudeza, la fluctuación o el centroide espectral presentaron valores negativos y por tanto, un comportamiento inverso respecto a la percepción del usuario.

Tabla 24. Valores obtenidos para los parámetros psicoacústicos de los distintos sonidos de advertencia.

	WS1	WS2	WS3	WS4	WS5	WS6	WS7	WS8
Sonoridad, sone	26,03	34,14	20,91	30,7	18,66	20,76	19,63	17,23
Agudeza, acum	0,67	1,67	0,44	0,94	0,68	0,72	0,95	0,67
Fuerza de Fluctuación, vacil	2,24	2,28	0,66	1,77	1,09	0,001	1,92	1,42
Tonalidad, tone	0,61	0,11	0,001	1,78	0,2	0,98	0,6	0,2
Aspereza, asper	3,46	3,47	2,44	0,96	4,55	0,26	2,64	3,76
Molestia objetiva, a	119,18	212,07	56,79	143,41	66,62	0,001	78,72	77,91
Sensación agrado sonoro, pu	0,12	0,01	0,001	0,53	0,04	1,33	0,18	0,07
Sonoridad 10%, sone	28,1	36,49	22,49	33,12	21,74	21,03	20,25	23,12
Lpeak, dB(A)	76,5	75,9	77	76,4	76,4	76,7	76,7	76,7
Centroide, Hz	672	4161	399	1234	627	600	1656	769

3.3. Línea de investigación 3: calidad de producto en términos de seguridad

3.3.1. Ensayo 1: detectabilidad de vehículos eléctricos de cuatro ruedas

3.3.1.1. Participantes

Un total de 143 personas participaron de forma voluntaria en los ensayos auditivos para determinar la detectabilidad de los vehículos. Debido al número de errores cometidos durante las pruebas (apartado 3.3.1.2), doce de ellos fueron descartados, dejando un conjunto final de 131 personas - edad media 26 años, 16% de participación femenina - distribuidas según la tabla 25 entre los distintos ambientes urbanos analizados.

Tabla 25. Distribución de los participantes en los diferentes entornos ensayados.

	N	Edad media
Entorno 1	45	27
Entorno 2	61	27
Entorno 3	25	23

3.3.1.2. Análisis estadístico de errores

En primer lugar, se analizaron de manera estadística los errores cometidos por los participantes durante los ensayos auditivos. Los vehículos no detectados o detectados en zonas de colisión con el peatón fueron considerados como fallos, permitiendo un porcentaje máximo del 25% para cada oyente antes de ser descartado. Los resultados indican una relación entre el entorno urbano ensayado y el número de errores cometidos, $\chi^2(2)=27,697$; $p=9,67e-7$. Un ambiente ruidoso supone una mayor dificultad para el peatón a la hora de detectar los vehículos, aumentando de forma

considerable el enmascaramiento del sonido. En estos casos, el número de errores en la detección se ve incrementado en comparación con zonas como los entornos 2 y 3, donde la influencia del tráfico es reducida.

Atendiendo a los sonidos de advertencia estudiados, de nuevo se observa una relación significativa con el número de errores cometidos por los participantes. La muestra correspondiente a un vehículo híbrido circulando en modo eléctrico presentó el mayor número de fallos en la detección, seguida por WS8. Sonidos de advertencia donde ciertas bandas espectrales sobrepasan en nivel al ruido de fondo, permiten aumentar, como es lógico, la detectabilidad del vehículo.

3.3.1.3. Análisis estadístico de la detectabilidad

Tal y como se indicó en el apartado 2.1.3.1, los vehículos fueron presentados al oyente de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. De acuerdo con un ensayo ANOVA, no se apreció una diferencia significativa entre la detectabilidad obtenida para cada sentido de circulación, considerándose de forma conjunta en análisis posteriores.

Por otro lado, de acuerdo con los resultados derivados de un ensayo de Kruskal-Wallis, se obtuvo una diferencia significativa en el tiempo de reacción entre los diferentes ambientes sonoros. Con objeto de analizar más en detalle la influencia de los distintos sonidos de advertencia en el tiempo de reacción del oyente, los datos correspondientes a cada entorno fueron estudiados de manera independiente.

De acuerdo con un ensayo de Shapiro-Wilk, los tiempos de reacción obtenidos para los diferentes sonidos de advertencia en el entorno 1 presentaban una distribución normal. Asimismo, según el método de Levene, existía igualdad de varianza entre muestras, $F(9,440)=1,596$; $p=0,114$. Según un ensayo ANOVA de una vía, se clasificaron los sonidos de advertencia en tres grupos. El grupo 1, formado exclusivamente por la muestra WS1, presentaba un tiempo de reacción estadísticamente inferior ($1,43 \pm 0,40$ s). El grupo 2, compuesto por WS6, WS8, HEV en modo combustión, WS5 y WS3, indicaba un tiempo de reacción medio entre el grupo 1 y el grupo 3, formado por HEV en modo eléctrico, WS2, WS4 y WS7. Este resultado pone de manifiesto la mejora en la detectabilidad del vehículo debida al uso de sistemas de advertencia, con una diferencia máxima en el tiempo de reacción de 1,37 s (10,65 m teniendo en cuenta una velocidad del vehículo de aproximadamente 28 km/h).

Para el entorno 2 también se apreció una diferencia estadísticamente significativa entre sonidos según el método ANOVA. De acuerdo con un ensayo *post-hoc* HSD de Tukey, fue posible clasificar

las muestras en tres grupos, aunque en este caso con un fuerte solapamiento. Para los sonidos WS1 y HEV en modo combustión se obtuvo un tiempo de reacción inferior al obtenido para HEV en modo eléctrico ($TR_{WS1}=1,40$; $TR_{HEV_{combustión}}=1,47$; $TR_{HEV_{eléctrico}}=1,86$). Por lo que respecta al entorno urbano 3, un análisis de varianza indicó que no existía una diferencia significativa entre el tiempo de reacción obtenido para los diferentes sonidos. En este caso, los vehículos fueron detectados por el oyente sin ningún problema, disminuyendo la diferencia entre muestras de manera considerablemente.

Teniendo en cuenta el tiempo necesario para detener un vehículo una vez que se han activados los frenos y el tiempo de reacción del conductor ante un estímulo externo, la distancia media de frenado de un vehículo circulando a 28 km/h corresponde a 11,44 m [122]. Tal y como se observa en la figura 63, las muestras WS2, WS4, WS7 y HEV en modo eléctrico, fueron detectadas por los oyentes a una distancia inferior a la de frenado en el entorno 1, lo que supone una probabilidad elevada de atropello. Por el contrario, para los ambientes 2 y 3, ninguna de las muestras fue detectada dentro de la zona de riesgo. En estos casos no será necesario la utilización de sistemas de advertencia para peatones.

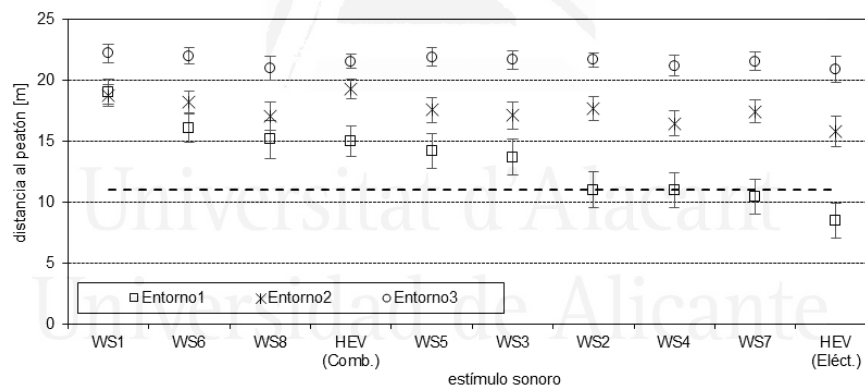


Figura 63. Distancia media de detección para los diferentes sonidos de advertencia estudiados. Comparación entre ambientes sonoros.

3.3.2. Ensayo 2: detectabilidad de vehículos eléctricos de dos ruedas

3.3.2.1. Participantes

Un total de 37 personas con edades comprendidas entre los 16 y los 70 años participaron de manera voluntaria en los ensayos auditivos para determinar la detectabilidad sonora de vehículos de dos ruedas.

3.3.2.2. Influencia de la velocidad en el nivel de ruido generado

En primer lugar, se analiza el ruido emitido por las distintas muestras en función de la velocidad. De acuerdo con la figura 64, se aprecia una diferencia significativa entre el nivel de presión sonora generado por vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos. A velocidades bajas, donde el ruido de motor resulta predominante, la diferencia entre ambos sistemas de propulsión es elevada. Por el contrario, conforme se incrementa la velocidad del vehículo, el contacto neumático-calzada y la aerodinámica adquieren mayor peso, convirtiéndose en las fuentes de ruido predominantes. De esta forma, para velocidades por encima 40-50 km/h, el ruido producido por las muestras se iguala.

Un análisis espectral del ruido emitido por los vehículos eléctricos revela la aparición de diferentes componentes armónicas en función de la velocidad. Este fenómeno, además de incrementar el nivel de presión sonora generado, puede suponer un incremento de la molestia para el oyente.

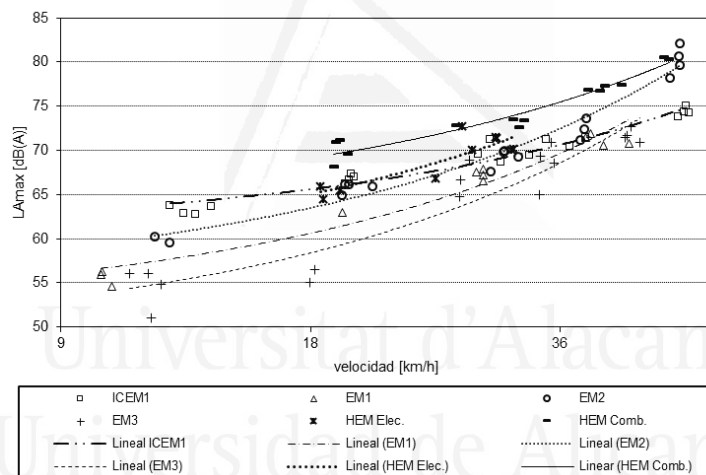


Figura 64. Nivel de presión sonora emitido por las diferentes motocicletas en función de la velocidad.

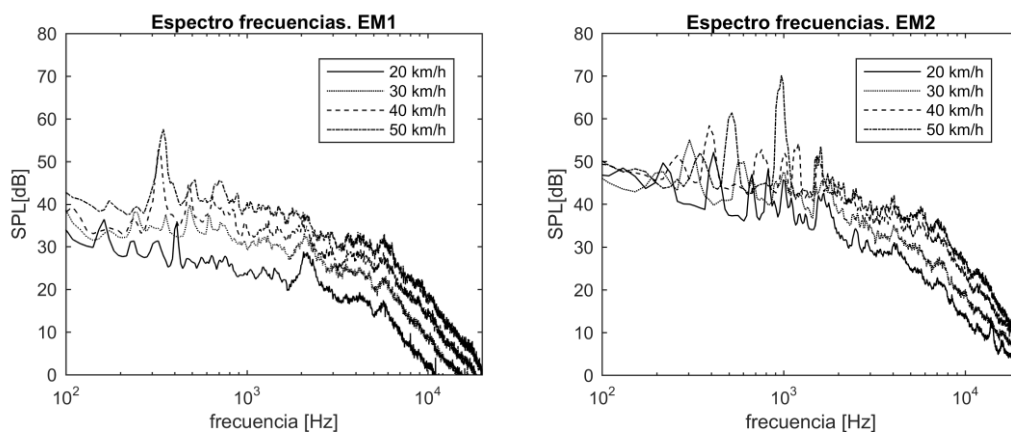


Figura 65. Espectro de frecuencias para las muestras EM1 (izq) y EM2 (dch) en función de la velocidad.

3.3.2.3. Influencia del sistema de propulsión en la detectabilidad del vehículo

Tal y como sucedía en el ensayo de detectabilidad para vehículos de cuatro ruedas, el sentido de movimiento no tuvo una influencia significativa en el tiempo de reacción para las motocicletas ensayadas: $t(36)=0,01$, $p>0,05$.

Respecto a los errores cometidos por los participantes durante la realización del experimento, un ensayo de Kruskal-Wallis indicó que no existe relación con el sistema de propulsión. Asimismo, no se observó ninguna dependencia entre los fallos cometidos y la edad de los participantes, $\chi^2(2)=1,687$; $p=0,43$. Sin embargo, existe una diferencia entre los errores cometidos para la muestra EM3, con un nivel de presión sonora inferior; y el resto de estímulos.

3.3.2.4. Análisis de la detectabilidad de vehículos de dos ruedas

Los tiempos de reacción obtenidos para cada una de las motocicletas ensayadas no cumplen con los requisitos de normalidad y homocedasticidad necesarios para el uso de herramientas paramétricas de análisis. Por este motivo, se empleó el ensayo de Kruskal-Wallis a la hora de estudiar la influencia del sistema de propulsión en la detectabilidad de los vehículos. Tal y como se muestra en la figura 66, los resultados indicaron una diferencia estadísticamente significativa entre motores de combustión interna y motores eléctricos, $\chi^2(1)=121,848$; $p<0,05$; con tiempos de reacción medios de 3,84 s y 1,55 s respectivamente (diferencia de 12 m para una velocidad de 19 km/h).

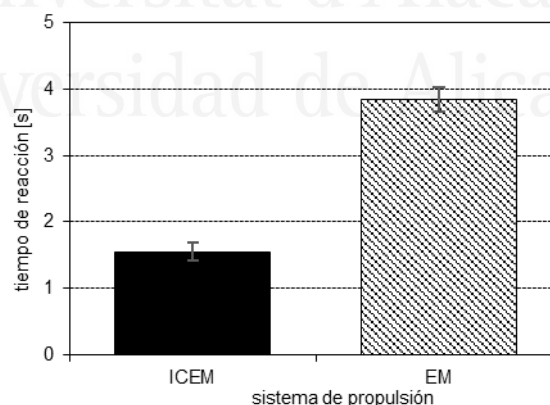


Figura 66. Comparación del tiempo de reacción medio para motocicletas con diferente sistema de propulsión.

La tabla 26 muestra los valores medios del tiempo de reacción obtenidos para cada una de las motocicletas. De acuerdo con el análisis estadístico realizado, la muestra HEM en modo combustión presenta una desviación estándar inferior al resto de estímulos.

Tabla 26. Tiempos de reacción medio para las distintas motocicletas ensayadas.

PWT	Tiempo Medio de Reacción
ICEM1	1,857
EM1	3,447
EM2	2,877
EM3	5,031
HEM ^{Eléctrica}	4,011
HEM ^{Combustión}	1,284

Un ensayo de Kruskal-Wallis indicó que existe una diferencia significativa para el tiempo de reacción entre motocicletas. Mediante un análisis post-hoc de comparación de parejas se determinaron aquellas muestras pertenecientes a un mismo grupo. De esta forma, se establecen las relaciones indicadas en la tabla 27. De acuerdo con los resultados obtenidos, los vehículos con sistema de propulsión eléctrico presentan tiempos de reacción superiores y por tanto, suponen un riesgo mayor para el peatón.

Tabla 27. Agrupación de los vehículos con tiempos de reacción equivalentes.

Grupo	Muestras
1	ICEM1 - HEV ^{Combustión}
2	EM1 – EM2
3	EM2 – HEM ^{Eléctrico}
4	HEM ^{Eléctrico} – EM3

La diferencia mínima obtenida para el tiempo de reacción entre vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos fue de 1 s. Teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados con motocicletas circulando a una velocidad aproximada de 19 km/h, la diferencia temporal corresponde a una distancia de 7 m (ver figura 67).

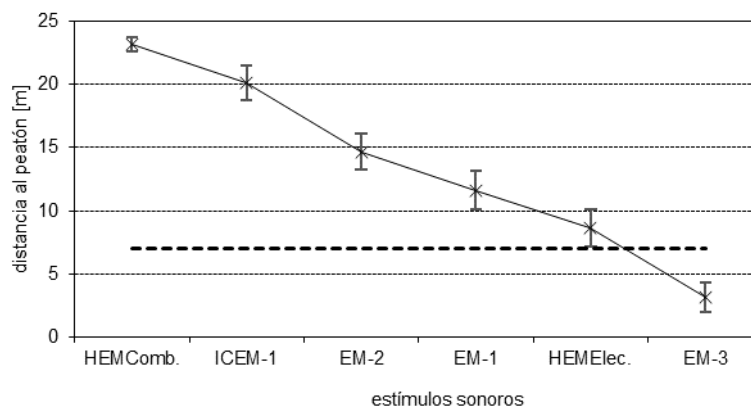


Figura 67. Distancia media obtenida para cada una de las motocicletas ensayadas. La línea negra indica el límite de seguridad o distancia de frenado.

Según [123], la distancia necesaria para detener una motocicleta circulando a 19 km/h es de 3 m. Teniendo en cuenta un tiempo de reacción del piloto de 0,75 s ante cualquier evento, esta distancia se ve incrementada hasta los 7 m, marcando el límite de seguridad. Según este dato, la muestra EM3, detectada a una distancia de 3,2 m, representa un riesgo real para el peatón.

De acuerdo con el nivel de presión sonora al que fueron detectadas cada una de las motocicletas, se establece el umbral de detección en $53,1 \pm 1,7$ dB(A). Este umbral se verá afectado por el nivel de ruido de fondo existente.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



4. Conclusiones/Conclusions

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Conclusiones

Tal y como se indicó en el capítulo de introducción, este trabajo se centra en la aplicación de diferentes métricas para la evaluación de la calidad de productos industriales y de consumo desde un punto de vista acústico. Para ello, se ha establecido una segmentación del concepto de calidad sonora basada en tres pilares fundamentales: funcionalidad, percepción y seguridad. El primero de ellos, de carácter puramente industrial, engloba tanto la evaluación de producto según las especificaciones definidas en la etapa de diseño como de la ausencia de defectos en su funcionamiento. Corresponde, por tanto, a un control de calidad tradicional, realizado generalmente al final del ciclo de producción y como etapa previa a la comercialización del producto. El segundo pilar, de carácter subjetivo, analiza la calidad desde el punto de vista del consumidor, permitiendo incorporar la percepción sonora al proceso de diseño desarrollando métricas más adecuadas para la evaluación del producto. La metodología se centra en garantizar las preferencias del cliente como requisito para la excelencia. En último lugar se encuentra la calidad de producto en términos de seguridad. Este pilar se centra en la evaluación del comportamiento acústico de las muestras analizando posibles riesgos en su interacción con el usuario.

Cada uno de los pilares descritos anteriormente dio origen a una de las líneas de investigación incluidas en esta tesis. En todos los casos se abordó el problema de forma independiente, centrándose en una aplicación o producto concreto del mercado. A lo largo de este capítulo se exponen las conclusiones más relevantes obtenidas para cada línea durante la investigación.

Línea de investigación 1: calidad funcional de producto

La primera línea de investigación se centró en la detección de defectos en pequeños motorreductores, constituyendo una herramienta para el control de calidad de producto. A lo largo del trabajo se realizó una comparación entre distintas métricas, algunas de ellas empleadas tradicionalmente para la detección de fallas en máquinas y mecanismos. El objetivo principal consistió en investigar el uso de parámetros psicoacústicos como herramienta de análisis y determinar su comportamiento para señales de vibración. En primer lugar, se realizó una clasificación de las muestras, obteniendo un conjunto de 174 reductores - 50% en mal estado. A continuación, se llevó a cabo una catalogación de los defectos según la percepción subjetiva de los operarios de fabricación, identificando los patrones de vibración asociados a cada una de las fallas. A partir del análisis de las muestras, se determinó el punto óptimo de medida, estudiando diferentes configuraciones para la adaptación del sistema a un proceso de fabricación automático.

Las medidas se llevan a cabo por medio de tres tipos de transductores: micrófono, acelerómetro y vibrómetro láser. De los resultados se establece el acelerómetro como sistema de adquisición más apropiado. El ruido existente en entornos industriales hace inviable el uso de micrófonos, mientras que las bajas tasas de muestreo y el coste elevado de los equipos dificultan el uso de vibrómetro láser. Por tanto, el control de calidad de los motorreductores se llevó a cabo a partir de señales de vibración. Como inconveniente principal del sistema elegido, destaca la necesidad de garantizar el contacto permanente entre el transductor y la superficie de la muestra.

A partir del análisis de las vibraciones se determinó el patrón espectral medio de un conjunto de reductores en buen estado. Los resultados pusieron de manifiesto una gran variabilidad entre las muestras, dando lugar a que el nivel de vibración correspondiente a productos defectuosos quedara enmarcado en el rango definido por los límites máximos y mínimos del espectro. Asimismo, quedaron patentes las limitaciones del análisis espectral como herramienta para la detección de fallas en reductores. Esta técnica proporciona una imagen estática del comportamiento de las muestras, sin apenas información relevante de los eventos transitorios asociados a los defectos. Por el contrario, un análisis temporal de las señales reveló la existencia de patrones de vibración característicos de las distintas fallas, estableciéndose dos puntos clave para la adquisición de señales.

Tal y como se indicó anteriormente, uno de los inconvenientes más relevantes en el uso de acelerómetros radica en la necesidad de garantizar el contacto permanente entre el transductor y la superficie de análisis. En este sentido, se estudiaron dos configuraciones de medida: palpador y fleje. Los resultados revelaron una influencia significativa del palpador sobre la señal de vibración adquirida, actuando como filtro en la banda de frecuencias de 1 a 6 kHz. La atenuación y frecuencia de corte del filtro se ven afectadas no solo por la constante elástica del muelle empleado en el palpador, sino también por el rozamiento existente entre el émbolo y la camisa que conforman el sistema. Este efecto disminuye notablemente mediante el uso de un fleje, obteniendo un espectro de frecuencias similar al proporcionado por un acelerómetro adherido a la superficie de la muestra.

A partir de las medidas de vibración llevadas a cabo sobre 87 muestras en buen estado y 87 defectuosas, se definió el valor para los diferentes parámetros de análisis. Una comparación estadística entre ambos grupos de muestras - correctas y defectuosas - reveló que no es posible establecer una diferencia clara entre ellas mediante los parámetros asimetría, M6A, M8A, ratio Delta RMS y RMS curtosis; por lo que fueron descartados del estudio.

Atendiendo a la tipología de fallas existentes entre las muestras, se observó una diferencia significativa para todos los parámetros, lo que permitió llevar a cabo una agrupación de los defectos. Un estudio de correlaciones bivariadas mediante el coeficiente de Pearson puso de manifiesto una fuerte relación entre las diferentes métricas, especialmente entre los parámetros sonoridad y L_v , asociados a un nivel de vibración elevada; y *clearance factor*, indicador de impulso y factor de cresta, relacionados con la aparición de ruidos impulsivos durante el ciclo de giro del reductor.

Para establecer una comparación entre los indicadores de condición y las métricas psicoacústicas, se determinaron los valores óptimos en cada caso. Los resultados revelaron un porcentaje superior de detecciones mediante el uso de técnicas tradicionales – 2%. Sin embargo, el número de falsos positivos superó considerablemente al obtenido por medio de parámetros psicoacústicos (I.C: 36%; Psicoacústicos: 14%). A partir de un análisis más profundo de las detecciones, se determinó la sensibilidad de cada parámetro en la detección de los diferentes fallos existentes en las muestras. De esta forma, los defectos asociados a un nivel excesivo de vibración, error tipo 1, fueron descritos en mayor medida por los parámetros nivel de vibración, sonoridad, desviación estándar, FM0 y Delta RMS Medio. Los errores de tipo 2 fueron detectados principalmente mediante la sonoridad. Respecto a los ruidos de carácter impulsivo - error tipo 3 - se identificaron por medio del factor de cresta. Finalmente, el parámetro fluctuación hizo lo propio con las muestras que presentaban una modulación elevada. Algunos de los parámetros analizados mostraron un comportamiento más global, detectando defectos de forma general. Asimismo, un análisis de comparación de parejas puso en evidencia la redundancia existente entre algunos de los parámetros.

La combinación de ambas técnicas de análisis - indicadores de condición y parámetros psicoacústicos - proporcionó un porcentaje de detección superior, 86%, incluyendo además el nivel de vibración obtenido en el lateral del reductor y eliminando del conjunto de muestras aquellas identificadas por los operarios de producción como dudosas, el porcentaje total de detección ascendió al 96,4%.

A la vista de los resultados, se puede concluir que la utilización de parámetros psicoacústicos como herramienta de análisis para la detección de fallas en máquinas y mecanismos resulta acertada, constituyendo un método alternativo y/o complementario a los indicadores de condición. Asimismo, su implementación sobre señales de vibración proporciona resultados satisfactorios, lo que permite solventar problemas derivados del ruido de fondo en ambientes industriales.

Línea de investigación 2: calidad perceptual de producto

A lo largo de la segunda línea de investigación se estudió la calidad de producto desde un punto de vista subjetivo, poniendo de manifiesto la necesidad de incluir las preferencias sonoras del usuario en las fases iniciales de diseño. El análisis tuvo lugar sobre dos aplicaciones distintas, exponiéndose a continuación las conclusiones derivadas de cada trabajo.

En un primer ensayo, se evaluó la calidad sonora de espejos retrovisores eléctricos en vehículos. Para ello, se realizó la adquisición de muestras sonoras, analizando los sonidos de forma temporal y frecuencial. Asimismo, se emplearon distintas métricas psicoacústicas para realizar una descripción detallada del comportamiento de las muestras. Con objeto de obtener la percepción subjetiva del usuario en relación al ruido generado por los espejos, se llevaron a cabo diferentes ensayos auditivos: comparación de parejas y procedimiento de ranking en tres laboratorios distintos. Un total de 62 oyentes participaron en la investigación, permitiendo establecer la agradabilidad sonora media de las muestras. Finalmente, se obtuvo la correlación entre los parámetros objetivos calculados y la percepción subjetiva del usuario.

Del análisis de señal realizado se deriva un comportamiento tonal de las muestras, variando el rango de frecuencias involucrado en función de la composición interna de cada espejo. Asimismo, las muestras analizadas presentan ciertas particularidades al inicio y final del ciclo de giro. Por un lado, aparecen ruidos de carácter impulsivo al comenzar el movimiento. Por otro, en función de las condiciones de bloqueo del espejo durante la fase final del ciclo, se generan ciertas discontinuidades en el sonido emitido. En relación al nivel de presión sonora generado, se obtienen una diferencia máxima de 8 dB entre muestras.

A partir de los ensayos auditivos realizados, se establece la agradabilidad sonora media para cada muestra. En un primer análisis se comparan los resultados obtenidos para los distintos laboratorios participantes, identificando una diferencia significativa entre las valoraciones realizadas en Portugal y Japón. De acuerdo con los comentarios registrados al finalizar los ensayos, la fase final del ciclo de giro de los espejos resulta crítica para usuarios de Japón, mientras que en otras regiones los oyentes tienen una percepción menos estricta.

Analizando la agradabilidad sonora media obtenida para todos los laboratorios de forma conjunta, se deriva una diferencia estadísticamente significativa entre las muestras. El resultado se mantiene tanto para el ensayo por comparación de parejas como para el procedimiento de ranking. Sin embargo, para este último, se aprecia una dispersión mayor en la evaluación de las muestras, con intervalos de confianza sobre la media superiores. A pesar de ello, el procedimiento de ranking

supone una reducción considerable del tiempo de ensayo, resultando atractivo para la comparación de grupos de muestras de pequeño tamaño (menor de seis elementos).

De acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson, la relación entre la percepción subjetiva del usuario y las métricas objetivas empleadas para describir las muestras sonoras resulta mayor en las zonas estacionaria y de bloqueo. Los parámetros nivel de presión sonora y sonoridad describen hasta en un 91% las preferencias del usuario. Un incremento en el valor de dichas métricas supondrá una reducción en la agradabilidad del producto. Asimismo, la aspereza correspondiente a la zona de bloqueo presenta una correlación alta con la percepción del oyente, lo que denota la importancia de un sonido estable en la finalización del ciclo de giro del espejo.

En relación al segundo ensayo incluido en la línea de investigación 2, se llevó a cabo un análisis de la molestia sonora causada por los sonidos de advertencia de vehículos eléctricos. Estos dispositivos, ideados para mejorar la detectabilidad del vehículo por parte del peatón, no pueden suponer un deterioro del paisaje sonoro en entornos urbanos. Se realizaron ensayos auditivos con 39 participantes, empleando para ello el método de diferencias semánticas. Finalmente, se llevó a cabo una correlación entre la percepción subjetiva y distintos parámetros psicoacústicos.

El análisis de los resultados indica que no existe una diferencia significativa entre la valoración de los sonidos según el sexo o la edad del oyente. A partir de la molestia subjetiva obtenida en los ensayos auditivos, es posible establecer una separación clara entre grupos de sonidos de advertencia: [WS2, CI, WS7, EV, WS1] y [WS3, WS6, WS4, WS5]. Según esta clasificación, no se aprecia relación entre la molestia sonora percibida por el usuario y las características espectrales de las muestras. Como resultado adicional, cabe destacar la valoración realizada por el oyente para los vehículos desprovistos de sonidos de advertencia. En este caso, el sistema de propulsión basado en un motor de combustión interna resulta menos molesto que el eléctrico. Este resultado viene motivado por la familiaridad con el vehículo tradicional, lo que supone una aceptación socio-cultural del ruido.

Línea de investigación 3: calidad de producto en términos de seguridad

Con objeto de analizar la calidad de producto desde el punto de vista de la seguridad, se lleva a cabo la línea de investigación 3. Este ensayo, dividido de nuevo en dos trabajos distintos, nace como consecuencia de la problemática suscitada por la ausencia de ruido en vehículos eléctricos. Una disminución excesiva en la emisión sonora del sistema de propulsión conlleva un empeoramiento de la detectabilidad del vehículo y por tanto, un riesgo para peatones y demás usuarios de la vía.

En un primer estudio se analizó, por medio de ensayos auditivos de laboratorio realizados sobre un total de 143 personas, la eficacia de distintos sonidos de advertencia incluidos en vehículos eléctricos de cuatro ruedas. Asimismo, se evaluó la influencia del entorno urbano en la detectabilidad del vehículo.

En primer lugar, se analizaron los errores cometidos por los oyentes durante los ensayos auditivos. Los resultados indican una relación importante entre el número de fallos cometidos y el ambiente urbano ensayado. De esta forma, entornos más ruidosos implicarán una mayor dificultad a la hora de detectar el vehículo y por tanto, un incremento del riesgo para el peatón. Estos resultados fueron confirmados a partir de un análisis del tiempo de reacción de los oyentes, obteniendo valores claramente superiores para el entorno 1. Asimismo, se evidencia la necesidad de emplear sistemas de advertencia también para velocidades por encima de 20 km/h.

Para cada ambiente urbano, se analizaron los resultados obtenidos según el sonido de advertencia empleado. Para los entornos 1 y 2, el vehículo de combustión interna procuró tiempos de reacción inferiores a los del sistema de propulsión eléctrico. Este resultado pone de manifiesto un incremento del riesgo de atropello para el peatón en presencia de vehículos silenciosos. Por el contrario, los datos obtenidos para el entorno 3, notablemente más silencioso que el resto de escenarios ensayados, reflejan igualdad entre las muestras. Este comportamiento denota la importancia del ambiente sonoro a la hora de establecer un sistema de advertencia en vehículos eléctricos. En estos casos, su utilización no será necesaria.

En relación a las características de los sonidos de advertencia ensayados, los resultados coinciden con las conclusiones obtenidas en estudios previos [115, 116]. El tiempo de reacción del peatón disminuye en presencia de sonidos formados por un número reducido de componentes tonales. Por el contrario, la utilización de modulaciones de amplitud y frecuencia no supone una mejora significativa en la detectabilidad del vehículo. La utilización de sonidos con una composición intermedia entre señales de banda ancha y componentes tonales prominentes podría suponer una solución razonable al problema, disminuyendo el tiempo de reacción del oyente sin afectar de manera notable a la contaminación acústica de las ciudades.

En un segundo trabajo se estudió el comportamiento acústico de vehículos eléctricos de dos ruedas, comparando el nivel de presión sonora con el emitido por sistemas de combustión interna. Tal y como se hizo en estudios previos, se llevó a cabo un análisis del tiempo de reacción del peatón ante la presencia de distintos vehículos. Un total de 37 oyentes tomaron parte en los ensayos auditivos.

Estudiando el nivel de presión sonora emitido por las motocicletas, se confirma una diferencia significativa entre sistemas de propulsión. Para velocidades inferiores a 40 km/h, los vehículos de tracción eléctrica resultan más silenciosos. Este comportamiento coincide con el observado para vehículos de cuatro ruedas.

Un análisis espectral de las muestras revela la presencia de componentes tonales de mayor nivel para las motocicletas eléctricas. Dichas componentes se verán afectadas por la velocidad del vehículo, lo que originará un desplazamiento de las frecuencias hacia zonas superiores del espectro. Este comportamiento, pese no haber sido analizado a lo largo del trabajo, podría suponer un incremento de la molestia sonora para el peatón [124].

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de detectabilidad muestran una diferencia significativa para el tiempo de reacción medio entre sistemas de propulsión. A la velocidad empleada en este estudio, aproximadamente 19 km/h, los vehículos provistos de motor eléctrico son detectados de forma más tardía, existiendo una diferencia máxima de 12 metros respecto a las muestras con motor de combustión interna. Cabe destacar los resultados obtenidos para el vehículo híbrido, con una diferencia espacial en la detectabilidad de 7 metros según el modo de funcionamiento seleccionado. Este resultado evidencia el riesgo que supone para el peatón la presencia de ciclomotores y motocicletas eléctricas.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las diferentes líneas de investigación incluidas en la tesis, los ensayos psicoacústicos pueden ser de gran utilidad a la hora de abordar diferentes problemas de la industria. Por un lado, la utilización de métricas para la evaluación acústica de las muestras puede ayudar a predecir y detectar funcionamientos anómalos del producto, evitando el perjuicio tanto económico como de marca que supondría su salida al mercado. Por otro lado, la incorporación de herramientas de calidad sonora a las etapas de diseño de producto puede garantizar una mayor correlación con las expectativas del cliente.

Conclusions

As indicated in section 1 *Introduction*, this work focuses on the application of different metrics to evaluate the quality of industrial and consumer products from an acoustic point of view. For that, the concept of sound quality is divided into three fundamental pillars: functionality, perception and safety. The first one, which consists of purely industrial nature, includes both the evaluation of the product according to the specifications defined during the design stage, and the absence of failures in its operation. Therefore, it corresponds to a traditional quality control carried out at the end of the production cycle and prior to the placing on the market of the product. The second pillar, containing an important subjective component, analyses the quality from the consumer point of view. It allows to incorporate the sound perception into the design process of a product and therefore establish more suitable metrics for its evaluation. The methodology focuses on ensuring the customer preferences as a prerequisite for excellence. Finally, the third pillar addresses the product quality in terms of safety. The work is focused on the evaluation of the acoustic behaviour of the samples, analysing possible risks in their interaction with the consumer.

Each of the pillars described above gave rise to one of the lines of research included in this thesis. All cases were addressed independently, focusing on a specific product or application of the market. Throughout this section the most relevant conclusions obtained for each line are exposed.

Line of Research 1: Functional Quality of a Product

The first line of research constitutes a basic tool for product quality control, focused in the detection of failures in small gearmotors. Throughout the work, it was performed a comparison of different metrics, some of them traditionally used for condition monitoring of machinery. The main objective of the research consisted in investigating the use of psychoacoustic parameters as an analysis tool of gears, determining its behaviour with vibration signals. First, a classification of samples was done, obtaining a set of 174 gearmotors - 50% defective. Then, a cataloguing of defects was implemented based on the subjective perception of manufacturing workers. Thus, the vibration patterns associated with each failure were identified. From the analysis of the samples, the optimum measurement point was determined. At the same time, different configurations were studied to adapt the system to an automated manufacturing process.

Measurements were carried out using three different types of transducers. According to the results, the accelerometer is established as the most appropriate system for signal acquisition. The background noise existing in an industrial environment made unfeasible the use of microphone. In

the same way, the low sampling rates and the high cost of equipment of laser vibrometer made them inappropriate. Therefore, the quality control of the gearmotors was carried out by means of vibration signals. As a main drawback of the selected system highlights the need to ensure permanent contact between the transducer and the surface of the sample.

From the analysis of vibrations, the average spectral pattern of a set of gearmotors without failures was determined. The results highlighted an important variability among the samples. This effect originated that the level of vibration corresponding to defective product was framed in the range defined between the maximum and minimum limits of the spectrum. Likewise, the limitations of the spectral analysis as a tool for condition monitoring of gearmotors became evident. This technique provided a static description of the behaviour of the samples, without hardly any relevant information of the transitory events associated with failures. On the contrary, a temporal analysis of the signals revealed the existence of characteristic vibration patterns for different defects. Two measurement points were defined to perform the analysis of the samples.

As indicated above, one of the most relevant drawbacks in the use of accelerometers corresponds to the need of guarantee the contact between the transducer and the analysis surface. In this sense, two measurement configurations were studied: stylus tip and metallic strip. The results revealed a significant influence of the stylus tip on the vibration signal, acting as a band stop filter on the range between 1 and 6 kHz. The attenuation and cut-off frequencies of the filter were affected not only by the elastic constant of the spring used inside the stylus tip, but also by the friction between the piston and the liner that compose the system. This effect was significantly reduced by the use of a metallic strip. In this case, it was obtained a frequency spectrum similar to that provided by an accelerometer attached to the surface of the sample.

From the vibration measurement conducted on 87 samples in good condition and 87 defective gearmotors, it was obtained the value of different analysis parameters. A statistical comparison between good and defective sample revealed that both groups cannot be separated using the parameters asymmetry, M6A, M8A, Delta RMS ratio and RMS Kurtosis. Therefore, they were discarded for further analysis.

Considering the typology of faults, a significant difference was observed for all parameters, which allowed to carry out a cluster of defects. A bivariate correlation analysis using Pearson coefficient revealed a strong relationship between different metrics, especially for parameters loudness and L_v , associated with high levels of vibration; clearance factor, impulse indicator and crest factor, related to the appearance of impulsive noises during the rotation cycle of gearmotors.

In order to establish a comparison between the diagnosis made by condition indicators and psychoacoustic metrics, the optimal values were determined for each case. The results showed a higher percentage of detections through the use of traditional techniques – 2 %. However, the number of false positives considerably exceeded that obtained by means of psychoacoustic parameters – IC: 36%; Psychoacoustic: 14%. A deeper analysis of detections allowed to establish the sensitivity of each parameter in relation to the existing failures in the samples. Thus, defects associated with an excessive vibration, error type 1, were better described by the parameters Lv, loudness, standard deviation, FMO and mean delta RMS. Type 2 errors were detected mainly by loudness. Regarding the impulsive noises corresponding to error type 3, the crest factor was the parameter that provided the best results. Finally, fluctuation strength described the samples with high modulation. Some of the studied parameters showed a global behaviour, being useful to detect faults in general. Also, a pairwise comparison revealed the redundancy between some of the parameters.

The combination of both methods – condition indicators and psychoacoustic parameters – provided a higher detection rate, 86%. Including the level of vibration on one side of the gearmotors and removing it from the set those samples identified by the manufacturing operators as doubtful, the total percentage of detection increased up to 96.4%.

According with the results, it is concluded that psychoacoustic parameters can be considered as a useful tool for the detection of failures on machinery. They constitute an alternative or complementary method to the condition indicators. In addition, their application on vibration signals provide satisfactory results and allows for solving problems derived from background noise in industrial environments.

Line of Research 2: Perceptual Quality of a Product

Throughout the second line of research product quality was studied from a subjective point of view. The work highlights the need to include the user's sound preferences into the early stages of the design. The analysis was carried out over two different applications, which most important conclusions are summarised in the following paragraphs.

In the first experiment, the sound quality of electrically adjustable exterior mirrors of vehicles was evaluated. To do this, in the first place it was performed the acquisition of sound samples. Sounds were analysed temporarily and frequently. Additionally, different psychoacoustic metrics were calculated in order to describe the behaviour of the samples. To obtain the subjective perception

of the consumers related the noise generated by the mirrors, a number of auditory tests were conducted - pairwise comparison and ranking procedure – in three different laboratories, with a total of 62 participating listeners. From its evaluation, the mean sound pleasantness of each sample was determined. Finally, the correlation between objective parameters and subjective perception was established.

A signal analysis revealed a tonal behaviour for all samples, varying the frequency range according to the internal composition of each mirror. Also, the analysed samples showed certain particularities at the beginning and the end of the rotation cycle. On the one hand, impulsive noises appeared during the first part of the movement. On the other hand, the blocking conditions of the mirror gave rise to different discontinuities during the final phase of the cycle. In relation to the sound pressure level, it was obtained a maximum difference of 8 dB between samples.

Based on the conducted auditory tests, the average sound pleasantness of each sample was determined. In a first analysis, the results obtained from different laboratories were compared, identifying a significant difference between judgements from Portugal and Japan. According to the comments registered at the end of the tests, the release phase of the cycle, in which the mirror was blocked, was critical for Japanese listeners. However, other countries seemed to have a less strict perception.

The average sound pleasantness obtained for all laboratories were collapsed for further analysis. The results revealed a statistically significant difference between samples. The same conclusions were obtained for both methods, pairwise comparison and ranking procedure. However, standard deviation was higher for the latter. Despite this, the ranking procedure allowed to reduce test times considerably so it may be attractive for the comparison of small sample groups (less than 6 elements).

According to the Pearson correlation coefficient, the relation between the subjective perception of the consumer and the metrics used to describe the sound samples was higher for the stationary part of the rotation cycle and the release phase. The parameters sound pressure level and loudness described user preferences up to 91%. Therefore, an increase in the value for these metrics will suppose a reduction in the pleasantness of the product. Also, the roughness corresponding to the release phase of the cycle showed a high correlation with listener's perception. This result denoted the importance of a stable sound at the end of the mirror movement.

Regarding the second work included in this line of research, it was carried out an analysis of the acoustic annoyance caused by different warning sounds for electric vehicles. These devices,

designed to improve the detectability of the vehicle by pedestrians, cannot lead to a deterioration of soundscapes in urban environments. Auditory tests were performed with 39 participants. In this case, the semantic differential method was used to obtain listeners perception. Finally, the correlation between subjective evaluation and different psychoacoustic parameters was established.

The results showed no significant differences between sounds according to the gender or the age of the listener. From the subjective annoyance obtained during the auditory tests, it was possible to separate warning sounds into two different groups: [WS2, CI, WS7, EV, WS1] and [WS3, WS6, WS4, WS5]. According to this classification, there was no relationship between the acoustic annoyance perceived by users and the spectral characteristics of the samples. As an additional result, it is worth noting the assessment made by users in relation to the electric vehicles without warning sound. In this case, the propulsion system based on an internal combustion engine was perceived as less annoying than the electric one. This result could be motivated by familiarity with the traditional vehicle, which implies a socio-cultural acceptance of noise.

Line of Research 3: Sound Quality of a Product in Terms of Security

With the aim of studying sound quality from a security point of view, a new line of research was opened. This experiment, divided again into two different works, was born as a consequence of the problem caused by the absence of noise in electric vehicles. An excessive decrease of the noise emitted by the propulsion system leads to a worsening of the detectability of the vehicle and therefore, it supposes a risk for pedestrians and other road users.

In the first study, by means of auditory tests conducted over 143 people in a laboratory, the effectiveness of different warning sounds used in four-wheels electric vehicle was analysed. At the same time, it was evaluated the influence of the urban environment on the detectability of the vehicle.

First, the errors committed by listeners during tests were analysed. The results showed an important relation between the number of failures and the urban environment. Thus, noisier locations imply higher difficulty to detect the vehicle and therefore, an increase of risk for pedestrians. These results were confirmed by the analysis of the listener's reaction time, with higher values for environment 1. At the same time, the study also underscores the need to use warning sounds for speeds above 20 km/h.

For each urban environment, the results were analysed according to the emitted warning sound. For locations 1 and 3, the combustion internal vehicle provided lower reaction times than the electric one. This result highlights an increased risk for pedestrians in the presence of silent vehicles. On the contrary, data obtained from environment 3, noticeably quieter than other scenarios, revealed equality between samples. This behaviour denotes the importance of the environment when establishing a warning sound system for electric vehicles. In this case, its use would not be necessary.

In relation to the characteristics of the warning sounds, the results were consistent with the conclusions obtained in previous studies [115, 116]. Pedestrian's reaction time decreased in the presence of sounds formed by a reduced number of tonal components. On the contrary, the use of signals modulated in amplitude or frequency did not suppose a significant improvement of the detectability. Sounds with an intermediate composition between broadband and prominent tonal components provided a reasonable solution of the problem. In this case, the listener's reaction time was reduced without significantly affecting the noise pollution in cities.

In a second work, it was studied the acoustic behaviour of powered two-wheelers. The sound pressure level emitted by different propulsion systems was compared and, as in previous studies, pedestrians' reaction time in the presence of different vehicles was analysed. A total of 37 participants took part in the auditory tests.

By studying the sound pressure level generated by motorcycles, a significant difference between propulsion systems was confirmed. For speeds below 40 km/h, electric powered vehicles resulted quieter. Thus, its behaviour matched with that observed for four-wheel vehicles.

A spectral analysis of the samples revealed the presence of tonal component with higher levels for electric motorcycles. Those components, caused by the engine, were affected by the speed of the vehicle, moving to higher frequencies of the spectrum as it increases. This behaviour, despite not having been studied during this thesis, could suppose an increase of the acoustic annoyance for pedestrians [124].

The results derived from the detectability tests showed a significant difference for the mean reaction time between propulsion systems. At the speed used during the experiments, approximately 19 km/h, electric powered motorcycles were detected later. There was a maximum difference of 12 meters in relation to the vehicles with internal combustion engine. It is worth highlighting the results obtained for the hybrid vehicle. In this case, a spatial difference of 7 meters was obtained in the detectability according to the selected operating mode – electric or internal

combustion. These results showed the risk that the presence of an electric motorcycle supposes for pedestrian.

In accordance with the results obtained for the different lines of research included in the thesis, psychoacoustic tests can be very useful in addressing different problems of the industry. On the one hand, the use of metrics for the acoustic evaluation of samples can help to predict and detect an anomalous behaviour of the product, avoiding the economic loss as well as the brand damage that its launch to the market entails. On the other hand, the use of sound quality tools during the product design stage can guarantee higher satisfaction levels due to covering all customer's expectations.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



5. Futuras líneas de investigación/Future Lines of Research

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Futuras líneas de investigación

Tal y como se indicó en el apartado conclusiones, la calidad sonora constituye una herramienta de gran utilidad a la hora de diseñar un producto, que permite realizar un análisis desde el punto de vista de su funcionalidad y seguridad. Asimismo, ofrece una visión más fiel de los requisitos necesarios para satisfacer los requerimientos del consumidor. La metodología empleada a lo largo de esta tesis puede ser extrapolada a cualquier producto industrial o de consumo cuyo comportamiento acústico sea susceptible de influir en la percepción del usuario.

Como continuación del trabajo desarrollado en esta tesis, se está llevando a cabo el estudio de la calidad sonora de pequeños motores eléctricos. Este tipo de componentes son una de las principales fuentes de ruido en pequeños mecanismos como, por ejemplo, máquinas de afeitar eléctricas, cepillos de dientes eléctricos o molinillos eléctricos. La investigación se centra en determinar los parámetros que mejor describen la percepción subjetiva del consumidor. En este caso, los ensayos psicoacústicos se están llevando a cabo por el método de diferencias semánticas. El objetivo pasa por establecer una métrica que facilite, durante el proceso de diseño, la selección del motor más adecuado para su implantación en pequeños dispositivos electromecánicos. Del mismo modo, se están llevando a cabo diferentes estudios sobre la influencia del pavimento en la detectabilidad del vehículo. El objetivo consiste en analizar la efectividad de diferentes soluciones constructivas en comparación con los sistemas de advertencia incluidos en vehículos eléctricos. La posibilidad de diseñar pavimentos con cierta periodicidad espacial podría permitir adaptar el sonido generado durante el contacto entre neumático y calzada a los distintos ambientes sonoros existentes en la ciudad.

A raíz de la investigación realizada junto al Dr. Katsuya Yamauchi de la Universidad de Kyushu, Japón, surge la posibilidad de colaborar con el Dr. Junji Yoshida, del Instituto de Tecnología de Osaka, en materias relacionadas con la calidad sonora de productos. Como primer trabajo, se analizará el comportamiento sonoro de robots aspiradores, obteniendo la percepción subjetiva del usuario a través de ensayos auditivos.

Una futura línea de investigación corresponde a la detección de defectos en máquinas de gran tamaño, utilizando de nuevo parámetros psicoacústicas para el análisis. Las dimensiones del producto pueden suponer un cambio importante en las condiciones de contorno y por tanto, una variación en la sensibilidad de los parámetros empleados en comparación con los resultados incluidos en la línea de investigación 1 de esta tesis. Del mismo modo, está previsto estudiar la

validez de los distintos parámetros psicoacústicos en el análisis de la evolución temporal de máquinas y mecanismos.

Por otro lado, se prevé llevar a cabo el estudio de la calidad sonora de varios productos de consumo. En primer lugar, se plantea la posibilidad de analizar el comportamiento acústico de diferentes instrumentos de cuerda. El trabajo incluiría el análisis de la influencia de los materiales constructivos y la forma en la calidad del sonido producido. Actualmente, los fabricantes de instrumentos musicales de gran calidad como guitarras y violines siguen un proceso completamente artesanal. Generalmente, el artesano es el responsable de seleccionar los mejores materiales para el diseño, basando sus decisiones en la respuesta sonora de la tapa armónica. Esto constituye un proceso notablemente subjetivo, por lo que la correlación entre la percepción del luter y ciertas métricas objetivas podría dar lugar a la implementación de nuevas herramientas orientadas a garantizar la calidad del producto. Sin embargo, la calidad no depende exclusivamente de los materiales empleados en la tapa armónica. Otros componentes como el puente o la cejuela pueden modificar las propiedades acústicas del instrumento, por lo que es necesario estudiarlas en detalle. Otro posible trabajo consiste en estudiar el sonido generado por el ratón táctil incluido en los ordenadores portátiles. Una comparativa objetivo-subjetiva permitiría establecer las bases de diseño para una mejora en la percepción del usuario. En cualquier caso, el objetivo supondría definir una metodología apropiada para la evaluación y la mejora de producto desde el punto de vista acústico.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Future Lines of Research

As indicated in the conclusions section, the sound quality is a very useful tool when designing new items. It allows to analyse the product in terms of functionality and security. Moreover, it offers a more accurate view of the requirements needed to satisfy the consumer expectations. The methodology used throughout this work can be extrapolated to any industrial and consumer product whose acoustic behaviour is liable to influence user's perception.

Continuing with the work developed in this thesis, a study regarding the sound quality of small electric DC motors is being carried out. Such component is one of the main responsible for noise in small devices like, for example, electric shavers, electric toothbrushes or electric grinders. The research focuses on determining the best psychoacoustic parameters to describe the subjective perception of the consumer. In this case, the auditory tests are being carrying out by means of the semantic differential method. The aim is to establish a new metric that makes easier, during the design stage, to select the most suitable motor for the implementation of small electromechanical devices. In the same way, different studies are being carried out on the influence of pavement on the detectability of electric vehicles. The aim is to analyse the effectiveness of this type of solutions compared to the acoustic vehicle alerting systems. The possibility of designing pavements with a certain spatial periodicity would allow to adapt the sound produced during the contact between tyre and road to a specific urban environment.

As a result of the research carried out together with Dr. Katsuya Yamauchi, from the University of Kyushu, Japan; it came up an opportunity for an inter-institutional collaboration with Dr. Junji Yoshida, from Osaka Institute of Technology, on product sound quality topics. As a first research, the sound behaviour of robot vacuum cleaners will be analysed, obtaining the subjective perceptions of the consumer through auditory tests.

A future line of research corresponds to the diagnosis of large machines and the effectiveness of psychoacoustic parameters in their faults' detection. The dimensions of the product may lead to a significant change in the boundary conditions and therefore, to a variation in the sensitivity of the parameters in comparison with the results included in the line of research 1. In the same way, it is expected to study the validity of different psychoacoustic parameters to analyse the temporal evolution of machinery.

On the other hand, it is planned to carry out an analysis of the sound quality of several consumer products. In the first place, the possibility of studying the acoustic behaviour of different string instruments has been raised. The work would include analysing the influence of constructive

materials and shapes on the sound quality. Currently, the manufacture of high-end instruments such as classical guitars or violins follows a purely traditional process. As a general rule, the luthier himself is responsible for selecting the best materials for each design, basing his decision on the acoustic response of the soundboard, being, therefore, a subjective process. The correlation between the artisan perception and certain psychoacoustic metrics could lead to the implementations of new tools that ensure the quality of the product. But quality does not depend exclusively on the materials used in the soundboard. Other components such as the bridge or the nut are liable to modify the acoustic properties of the instrument, so they must be analysed in detail. Another possible work consists of analysing the noise generated by mouse pads. In this case, an objective-subjective evaluation of different samples would allow for a better understanding of user preferences, laying the foundations for a better design. In any case, the objective involves establishing an appropriate methodology for the evaluation and improvement of products from the acoustic point of view.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



6. Referencias bibliográficas

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

- [1] UNE-EN ISO 3741; 3743; 3744. Acústica. Determinación de los niveles de potencia sonora y de los niveles de energía sonora de fuentes de ruido a partir de la presión sonora.
- [2] UNE-EN ISO 11200; 11201; 11202; 11203; 11204; 11205. Acústica. Ruido emitido por máquinas y equipos. Medición de los niveles de presión acústica de emisión en el puesto de trabajo y en otras posiciones especificadas.
- [3] ISO 362. Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles.
- [4] ISO 2671. Environmental Tests for Aircraft Equipment.
- [5] ISO 9645. Acoustics – Measurement of Noise Emitted by Two-wheeled Mopeds in Motion.
- [6] ISO 266:1997. Acoustics – Preferred Frequencies.
- [7] ISO 532. Acoustics – Method for Calculating Loudness Level.
- [8] ISO 1683:2015. Acoustics – Preferred Reference Values for Acoustical and Vibratory Levels.
- [9] Volkswagen, TL82398 Electrically Adjustable Exterior Mirrors. Ed. 02-2016.
- [10] Widmaier, M.; Lime, J. Using Virtual Reality for Quality Control and Interpretation of 4-D Reservoir Characterization and AVO Analysis. The Leading Edge 20 (12):1401-1405. December 2001. DOI 10.1190/1.1487273.
- [11] Baqqar, M.; Ahmed, M.; Gu, F. Data Mining For Gearbox Condition Monitoring. 17th International Conference on Automation and Computing. pp 138-142. Huddersfield, UK. Sept. 10, 2011.
- [12] Directiva 92/75/CEE del Consejo de 22 de septiembre de 1992 relativa a la indicación de consumo de energía y de otros recursos de los aparatos domésticos, por medio del etiquetado y de una información uniforme sobre productos.
- [13] ISO 6395:2008. Earth-moving Machinery – Determination of Sound Power level. Dynamic Test Condition.
- [14] UNE-EN ISO 9902. Maquinaria textil. Código de ensayo acústico.
- [15] ISO 13261. Sound Power Rating of Air-conditioning and Air-source Heat Pump Equipment.
- [16] ISO 13347. Industrial fans – Determination of Fan Sound Power Levels Under Standardized Laboratory Conditions.
- [17] ISO 17359:2011. Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – General Guidelines.

- [18] ISO 13373. Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – Vibration Condition Monitoring.
- [19] Derek Smith, J. Gear Noise and Vibration. 2nd Edition. April 8, 2003. CRC Press. ISBN 9780824741297.
- [20] Patel, J.; Sahu, G.; Sen P.K. A Study on Common Failure of Gears. IJIRT. Volume 2, issue 6. November 2015.
- [21] Niemann, G.; Winter, H. Getriebeschaeden and abhife, Entwicklugstendenzen, Maschinenelemente, Vol 2, 2nd ed. S.i. Springer-Verlag (Berlin), 1983.
- [22] Shipley, E.E. Failure Modes in Gears. American Society of Mechanical Engineers. Detroit. 19 Oct 1973.
- [23] American National Standard: Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure ANSI/AGMA. American National Standards Institute/American Gear Manufacturers Association. 1010-E95 ISBN: 1-55589-665-0.
- [24] Loutridis, S.J. Gear Failure Prediction Using Multiscale Local Statistics. Engineering Structures. Volume 30, issue 5. Pages 1214-1223. May 2008.
- [25] Toutountzakis, T.; Tan, C.K.; Mba, D. Application of Acoustic Emission to Seeded Gear Fault Detection. NDT & E International. Volume 38, issue 1. Pages 27-36. January 2005.
- [26] Saxena, V.; Chowdhury, N.K.; Devendiran, S. Assessment of Gearbox Fault Detection Using Vibration Signal Analysis and Acoustic Emission Technique. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vlume 7, issue 4. Pages 52-60. Jul-Aug. 2013.
- [27] Bechhoefer E.; Qu Y.; Zhu J.; He D. Signal Processing Techniques to Improve an Acoustic Emission Sensor. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. 1-8. 4, 2013.
- [28] Girdhar, P.; Scheffer, C. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Elsevier. 2004. ISBN: 978-0-7506-6275-8.
- [29] Nie, M; Wang, L. Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Wind Turbine Gearbox. 2nd International Through-life Engineering Services Conference. Procedia CIRP 11, 287-290. 2013.

- [30] McFadden P. D. Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*. 108, pp. 165–170. 1986.
- [31] Lebold, M.; McClintic, K.; Campbell, R.; Byington, C.; Maynard, K., Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics, Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, VA. pp. 623-634. May 2000.
- [32] Stewart, R.M. Some Useful Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics, Technical Report MHM/R/10/77, Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, July 1977.
- [33] Zakrajsek, J. J.; Townsend, D. P.; Decker, H. J. An Analysis of Gear Fault Detection Methods as Applied to Pitting Fatigue Failure Data, The Systems Engineering Approach to Mechanical Failure Prevention, 47th Meeting of the MFPG, 1993.
- [34] Sharma, V; Parey, A. A Review of Gear Fault Diagnosis Using Various Condition Indicators. *Procedia Engineering*. 144, pp. 253-263. 2016.
- [35] Eltabach, M.; Vervaeke, T.; Sieg-Zieba, S.; Padioleau, E.; Berlingen, S. Features Extraction Using Vibration Signals for Condition Monitoring of Lifting Cranes. CETIM.
- [36] Zhang, X. H.; Kang, J. S.; Zhao, J. S.; Cao, D. C. Features for Fault Diagnosis and Prognosis of Gearbox. *Chemical Engineering Transactions*, 33, 1027-1032. 2013.
- [37] Ma J. Energy Operator and Other Demodulation Approaches to Gear Defect Detection. Proceedings of the 49th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT), Virginia Beach, VA. pp. 127–140. 1995.
- [38] Decker, H. J.; Lewicki, D. G. Spiral Bevel Pinion Crack Detection in a Helicopter Gearbox. Proceedings of the American Helicopter Society 59th Annual Forum, Phoenix, AZ. 1222–1232. 2003.
- [39] Loutridis, S.J. Instantaneous Energy Density as a Feature for Gear Fault Detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 20(5), pages 1239–1253. 2006.
- [40] Loutridis, S.J. Damage Detection in Gear Systems Using Empirical Mode Decomposition. *The Journal of Earthquake, Wind and Ocean Engineering*. Nº 12, pages 1833-1841. 2004.
- [41] Fog C. L. Product Sound as an Important Part of Product Design. *International Congress on Acoustics*. 8. 182-185. Rome. 2002.

- [42] Zwicket E., Fastl H. Psychoacoustics: Facts and Models. Springer-Verlag. 1990.
- [43] Head Acoustics. Application Note. Conducting Listening Tests.
- [44] Parizet E.; Hamzaoui N.; Sabatie G. Comparison of Some Listening Test Methods: a Case Study. Acta Acustica United with Acustica, Hirzel Verlag, 91, pp.356-364, 2005.
- [45] Wickelmaier F.; Umbach N.; Sering K.; Choisel S. Scaling Sound Quality Using Models for Paired-comparison and Ranking Data. Conference Paper, DAGA 2012. Congress 38th German Annual Conference on Acoustics (2012).
- [46] Horvat, M.; Domitrovic, H.; Jambrosic, K. Sound Quality Evaluation of Hand-held Power Tools. Acta Acustica United with Acustica. Vol. 98, 487-504. 2012.
- [47] Altinsoy, E; Gul, M; Kuyumcuoglu, A. Washing Machine Sound Quality. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics. 2016.
- [48] Hastings A.; Davies P. and Takatab H. Effects of Modulation on the Quality of Diesel Engine Noise. ICA2001.
- [49] Parizet E.; Segaud L.; Koch J.R. and Barbelon D. Continuous Evaluation of Sound Quality in a Bus. Acta Acustica United with Acustica. 89 (5): 900-907. Sept. 2003.
- [50] Weber R. The Continuous Loudness Judgement of Temporally Variable Sounds with an "Analog" Category Procedure. Proc. 5th Oldenburg Symposium on Psychol. Acoustics, 267-294. 1991.
- [51] Nosulenko V.; Parizet E.; Samoylenko E. The Emotional Component in Perceived Quality of Noises Produced by Car Engines. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, Inderscience. 9 (1-2), pp.96-108. 2013.
- [52] Patsouras Ch.; Fastl H.; Patsouras D.; Pfaffelhuber K. Psychoacoustic Sensation Magnitudes and Sound Quality Ratings of Upper Middle Class Cars' idling noise. In Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Rome, Italy, 2001.
- [53] Kuwano S.; Fastl H.; Namba S.; Nakamura S. and Uchida H. Quality of Door Sounds of Passenger Cars. Acoust. Sci. & Tech, 27, 5. 2006.
- [54] Parizet E.; Guyader E.; Nosulenko V. Analysis of Car Door Closing Sound Quality. Applied Acoustics, Elsevier. 69, pp.12-22. 2008.

- [55] Kim W.; Ryu T.; Lee Y.; Park D.; Hwan Yun M. Modelling of the Auditory Satisfaction Function for the Automobile Door Opening Quality. *The Japanese Journal of Ergonomics*. August 2015.
- [56] Volandri G.; Di Puccio F.; Forte P.; Carmignani C.; Becattini F. A Psychoacoustic Approach for Sound Quality Assessment of Automotive Power Windows. *Proceedings of ISMA2012*.
- [57] Jo, H.; Kang, Y.J.; Kim, S.; et ál. Measurement of Perceived Window Lift Sound Quality Via Factor Analysis. *Noise Control Engineering Journal*, 64(4), 432-443. July 2016.
- [58] Patterson, R.D.; Mayfield, T.F. Auditory Warning Sounds in the Work Environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. Vol. 327, nº 1241. *Human Factors in Hazardous Situations*. Pages 485-482. Apr. 12, 1990.
- [59] Lemaitre, G.; Susini, P.; Winsberg, S.; McAdams, S. The Sound Quality of Car Horns: a Psychoacoustical Study of Timbre. *Acta Acustica United with Acustica*. Vol 93. Pages 457-468. 2007.
- [60] Marshall, D. C., Lee, J. D., & Austria, P. A. Alerts for In-vehicle Information Systems: Annoyance, Urgency, and Appropriateness. *Human Factors*, 49, 145–157. 2007.
- [61] Balastegui, A.; Romeu, J.; Clot, A.; Martín, S.R. New Siren Tones Optimised for Increased Detectability Distances of Emergency Vehicles. *Applied Acoustics*. Vol. 74, issue 6. Pages 803-811. June 2013.
- [62] Parizet, E.; Robart, R.; Ellermeier, W.; Janssens, K.; Biancardi, F.; et al. Warning Sounds for Electric Vehicles. *Fisita World Automotive Congress 2014*, 2014, Maastricht, Netherlands. pp.1, 2014.
- [63] Jacobser, G.N.; IH, J.; Song, W.; MacDonald, E.N. Predicting Detectability and Annoyance of EV Warning Sounds Using Partial Loudness. *Inter-noise 2016*. Hamburg.
- [64]. Moore B C J, Glasberg B R, Baer T. A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness and Partial Loudness. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(4), April 1997.
- [65]. Moore B C J, Glasberg B R. A Model of Loudness Applicable to Time-varying Sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(5), May 2002.
- [66]. Moore B. C. J.; Glasberg B. R. Development and Avaluation of a Model for Predicting the Audibility of Time-varying Sounds in the Presence of Background Sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, 53(10), October 2005.

[67] Directiva 2009/48/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2009 sobre la seguridad de los juguetes.

[68] Clean Energy Ministerial: Global EV Outlook, Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. April 2013.

[69] Clean Energy Ministerial: Global EV Outlook. Update, 2015.

[70] Lelong J., Michelet R. Passenger Cars. Power Unit and Tyre-road Noise, Driving Behaviour: What Are the Stakes?. In: Proc. Internoise, The Hague, 2001, p. 135-8; 2001.

[71] Old I., Kaliski K., Blomberg L. Sound Emissions from a Plug-in Electric Vehicle. In: Proc. Internoise, New York; 2012.

[72] Cai. C. Noise Emission from Electric Cars. Master's Thesis, Technical University of Denmark; 2012.

[73] Burden of Disease from Environmental Noise Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. OMS.

[74] Garay-Vega L., Hastings A., Pollard J., Zuschlag M., Stearns M. Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians: Phase I, Report DOT HS 811 304, Tech.rep., National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, April; 2010.

[75] Altinsoy E. The Detectability of Conventional, Hybrid and Electric Vehicles Sounds by Sighted, Visually Impaired and Blind Pedestrians. In: Proc. Internoise, Innsbruck; 2013.

[76] C. C. Wu J, Austin R. Incidence Rates of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles: an Update, DOT HS 811 526. Annals of Emergency Medicine 64, 2, p. 195-196, 2014. doi:10.1016/j.annemergmed.2014.05.017.

[77] Yamauchi K., Menzel D., Takada M., Nagahata K., Ichiro Iwamiya S., Fastl H. Psychoacoustic Examination of Feasible Level of Additional Warning Sound for Quiet Vehicles. Acoust. Sci. & Tech. 36, 2, p. 120-125, 2015. doi:10.1250/ast.36.120.

[78] Parizet E., Ellermeier W., Robart R. Auditory Warnings for Electric Vehicles: Detectability in Normal-vision and Visually-impaired Listeners. Applied Acoustics 86, p. 50-58, 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2014.05.006.

[79] Dalrymple G. Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles, Tech. Rep. NHTSA-2011-0148, National Highway Traffic Safety Administration; 2011.

- [80] T. Ministry of Land, Infrastructure, Tourism. Japanese Activities on Approaching Vehicle Audible System for HEVs and EVs. Tech. rep., may 4th; 2010.
- [81] Roudard I. Proposal for a European Parliament and Council Regulation on Community Design (94/c 29/02) COM (93) 342 final - COD 463 (submitted by the commission on 3.12.93) Proposal for a European Parliament and Council Directive on the Legal Protection of Designs (93/c 345/09) COM (93) 344 final - COD 464, Computer Law & Security Review 10, 26-31, 1994. COM (2011) 856. doi:10.1016/0267-3649(94)90135-x.
- [82] Landström, U. Noise and Fatigue in Working Environments. Environment International. Vol. 16, issues 4-6, pp. 471-476. 1990.
- [83] MacGarrigle, R.; Munro, KJ.; Dawes, P.; Stewart, AJ.; Moore, DR.; Barry, JG.; Amitay, S. Listening Effort and Fatigue: What Exactly Are We Measuring? A British Society of Audiology Cognition in Hearing Special Interest Group "white paper". International Journal of Audiology. 53 (7), pp. 433-40. July 2014. DOI: 10.3109/14992027.2014.890296.
- [84] MacGarrigle, R.; Dawes, P.; Stewart, AJ.; Kuchinsky, SE.; Munro, KJ.; Amitay, S. Measuring Listening-related Effort and Fatigue in School-aged Children Using Pupillometry. Journal of Experimental Child Psychology. 161:94-112. Sep. 2017. DOI: 10.1016/j.jecp.2017.04.006.
- [85] Chacron, M. J; Lindner, B.; Longtin, A. Threshold Fatigue and Information Transfer. Journal of Computational Neuroscience. 23(3): 301-311. 2007.
- [86] Charron, S.; Botte, M. C. Frequency-selectivity in Loudness Adaptation and Auditory Fatigue. Journal of the Acoustical Society of America, 83(1), 178-187. 1988.
- [87] Chen, C.J.; Dai, Y.T.; Sun, Y.M.; Lin, Y.C; Juang, Y.J. Evaluation of auditory fatigue in combined noise, heat and workload exposure. Industrial Health. 45(4):527-534. 2007.
- [88] Webster, J.C.; Lepor, M. Noise, You Can Get Used to It. The Journal of the Acoustical Society of America. 45, 751 (1969). <https://doi.org/10.1121/1.1911457>.
- [89] Kane, PV.; Andhare, AB. Application of Psychoacoustics for Gear Fault Diagnosis Using Artificial Neural Network. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. Vol 35 (3), pp. 207-220. 2016.
- [90] Van Elslande, P.; Feypell-de la Beaumelle, V.; Holgate, J.; et al. Mobility and Safety of Powered Two-wheelers in the OECD Countries. Transport Research Arena. Paris. 2014.

- [91] Rogers, N. Trends in motorcycle fleets worldwide. International Transport Forum. Organisation for Economic Co-Operation and Development. Workshop on Motorcycling safety. Lillehammer. June 2008.
- [92] MacDonald, J. Bloomberg New Energy Finance. <http://about.bnef.com> (01/08/2016)
- [93] World Health Organization. Global Status Report on Road Safety 2015.
- [94] European Road Safety Observatory. European Commission. Annual Accident Report 2015.
- [95] Krautscheid, Rainer; Krzywinski, Jens. Conspicuity of Powered-two Wheelers. Bast. ISAL 2009.
- [96] Bastiaensen, Edwin. The Shared Road to Safety – A Global Approach for Safer Motorcycling. International Transport Forum. Leipzig 2014.
- [97] Paul D. Walker, Holger M. Roser. Energy Consumption and Cost Analysis of Hybrid Electric Powertrain Configurations for Two Wheelers. Applied Energy. Vol. 146. Pages 279-287. May 2015. doi:10.1016/j.apenergy.2015.02.009.
- [98] Lelong, J., Chatagnon, R., Clerc, C., Jamin, D., Seigner, M., Thivant, M., 2014. Towards a Reduction of Noise Emission of Powered Two-wheels — Part 1. Inter-noise 2014. 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control, Melbourne, Australia.
- [99] N. Sheng, X. Zhou, Y. Zhou. Environmental Impact of Electric Motorcycles: Evidence from Traffic Noise Assessment by Building – Based Data Mining Technique. Science of The Total Environment. March 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.148.
- [100] Hough, David. Proficient Motorcycling - The Ultimate Guide to Riding Well. BowTie Press. USA. ISBN 1-889540-53-6 (2008 2nd ed. ISBN 978-1-933958-35-4).
- [101] Fletcher & Munson, Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. 1933.
- [102] BS ISO 226. Acoustics - Normal Equal Loudness Level Contour. 2003.
- [103] BS 4198, Method for Calculating Loudness. 1967.
- [104] Zwicker, E. Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands. The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 33, Issue 2, pp. 248-248, 1961.
- [105] Blommer M., Otto N., Wakefield G., Feng B. J., Jones C. Calculating the Loudness of Impulsive Sounds. SAE Transactions 104/6, Pt2, pp. 2302-2308, 1996.

- [106] Zwicker E.; et al. Program for Calculating Loudness According to DIN 45631 (ISO 532B). Journal of the Acoustical Society of Japan Vol 12, part 1, pp 39-42, 1991.
- [107] Zwicker E.; et al. BASIC-Programme for Calculating the Loudness of Sounds from Their 1/3-Oct Band Spectra According to ISO 532B. Acustica, vol 55, Letters to the Editor, pp. 63, 1984.
- [108] Zwicker, E. Procedure for Calculating Loudness of Temporally Variable Sounds. Journal of the Acoustical Society of America, Vol 62, No.3, P675-682, 1977.
- [109] Aures, W. Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit ("A Procedure for Calculating Auditory Roughness"). Acustica 58, pp. 268-281, 1985.
- [110] Widmann, U; Fastl, H. Calculating Roughness Using Time-varying Specific Loudness Spectra. Proc. Sound Quality Symposium 98, pp. 55-60, 1998.
- [111] Jeong, H. Sound Quality Analysis of Nonstationary Acoustic Signals. Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 1999.
- [112] Unit 11: Noise Concepts and Terminology. T237: Environmental Control and Public Health Noise. OU Course Text. 2nd edition, 2000.
- [113] Fastl, H. Psychoacoustics and Sound Quality Metrics. Sound Quality Symposium 98.
- [114] Huang, Y.; Di, G.; Zhu, Y.; Hong, Y.; Zhang, B. Pair-wise Comparison Experiment on Subjective Annoyance Rating of Noise Samples with Different Frequency Spectra but Same A-weighted Level. Applied Acoustics. 69(12):1205–1211. 2008.
- [115] Parizet, E.; Robart, R.; Chamard, J.Ch.; Schlittenlacher, J.; Pondrom, P.; Ellermeier, W.; Biancardi, F.; Janssens, K.; Speed-Andrews, P.; Cockram, J. Detectability and Annoyance of Warning Sounds for Electric Vehicles. ICA 2013. Montreal.
- [116] eVADER project. Seventh Framework Programme. theme 7. Transport SST.2011.RTD-1 GA Nº. 285095. Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response. Workgroup 2, Tech. rep., European Commission; 2014.
- [117] Peeters G. A Large Set of Audio Features for Sound Description. Tech. rep., IRCAM, section 9.1; 2003.
- [118] Algazi V., Duda R., Thompson D., Avendano C. The CIPIC HRTF Database. In: IEEE (Ed.), Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and

Acoustics (Cat. No.01TH8575), Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2001, p. 90-102. doi:10.1109/aspaa.2001.969552.

[119] Gozalo G. R., Morillas J. M. B., Escobar V. G., Sánchez-Gómez R. V., Sierra J. A. M., del Río F. J. C., Gajardo C. P. Study of the Categorisation Method Using Long-term Measurements. Archives of Acoustics 38, 3, 2013, p. 397-405. doi:10.2478/aoa-2013-0047.

[120] Weber, R. Interior Car Sound Quality - Assessment of Acceleration Noises. 2nd Forum Acusticum, Berlin (1999).

[121] Dongxing M.; Wuzhou Y.; Zuomin W. Statistical Validation and Criterion for Paired Comparison Data in Sound Quality Evaluation. Acta Acustica 2005; 30:468–72 [in Chinese].

[122] Glaeser, K.; Marx, T.; Schmidt, E. Testing the Sound Detection of Electric Vehicles by Blind or Visually Impaired Persons. In: Proc. Forum Acusticum. Kraków; 2014.

[123] Hough, David. Proficient Motorcycling - The Ultimate Guide to Riding Well. BowTie Press. USA. ISBN 1-889540-53-6 (2008 2nd ed. ISBN 978-1-933958-35-4).

[124] Parizet, E.; Bolmont, A.; Fingerhuth, S. Subjective Evaluation of Tonalness and Relation Between Tonalness and Unpleasantness. Proc. Internoise, Ottawa, 2009.



PARTE SEGUNDA

Compendio de publicaciones

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Artículo primero

Poveda-Martínez, P.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Nescolarde-Selva, J.; Lloret-Climent, M.; Ramis-Soriano, J. Study of the Effectiveness of Electric Vehicle Warning Sounds Depending on the Urban Environment. *Applied Acoustics*. 116, pp. 317 - 328. 2017. ISSN 0003-682X. Revista. Fecha de publicación: enero de 2017.

DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.10.003

Abstract

Electric and Hybrid Electric vehicles (EV and HEV) seem to be the future of transport in smart cities and the key for the total reduction of noise disturbance and pollution in urban areas. However, several problems have to be solved to guarantee the safety of these types of vehicle. Up to now, the use of HEV has shown the dangers of a “quiet” transport system in urban environments; in fact, it has been estimated that an HEV is twice as likely to be involved in a pedestrian crash as would be an internal combustion engine (ICE) vehicle in the same situation. With the aim of improving their safety, different kinds of warning sounds are being designed to increase the detectability of EV and HEV without themselves becoming new annoying sound sources. The sound directivity, frequency of emission and intensity of warning sound systems will guarantee their efficiency and limited noise impact.

Several research works bring to the fore a significant variation of the pedestrian response time to different acoustic stimuli. However, it is necessary to examine the suitability of these warning sounds according to the urban environments in which they are going to be emitted. Distinct areas inside the city have different soundscapes whose spectral content can vary significantly, masking some of the sounds suggested as an alert.

This paper analyses in detail the main characteristics of several warning sounds proposed by the industry, conducting a comparative study of the different design trends. A total of 131 sighted listeners were exposed to a virtual road-crossing test. The behaviour and appropriateness of warning sounds are analysed depending on the urban environment. For this purpose, three clearly different soundscapes have been selected: stopped vehicles at a traffic light, a pedestrian shopping area and the vicinity of a playground. The results highlight the wide variability in pedestrian reaction time for the different warning sounds used. Some signals considerably improve the detectability of the vehicle, providing results even above the ICE vehicle ones. However, other warning sounds do not decrease the reaction time with respect to the EV. In addition, a clear dependence is observed between the detectability and the soundscape involved, changing the results for the same warning sound depending on the acoustic environment.

Keywords: Acoustic Vehicle Alerting Systems, Warning Sound, Electric Vehicle, Hybrid Electric Vehicle, Internal Combustion Engine Vehicle, Reaction Time.



2. Artículo segundo

Poveda-Martínez, Pedro; Peral-Orts, Ramón; Campillo-Davo, Nuria; Campello-Vicente, Hector; Ramis-Soriano, Jaime. Acoustic Directivity and Detectability of Electric Powered Two-Wheelers. Acta Acustica United with Acustica. 103, pp. 1014 - 1024. 2017. ISSN 1610-1928. Revista, Fecha de publicación: diciembre de 2017.

DOI: 10.3813/AAA.919131

Abstract

Since motorcycles are one of the main sources of noise in urban environments, the use of electric powered two-wheelers may contribute to the improvement of soundscapes in Smart Cities. However, quiet vehicles can lead to an increased risk of accident for pedestrians and other drivers.

In order to assess the noise generated by powered two-wheelers and their detectability, five different low capacity motorcycles were measured in a pass-by noise test. The measurements were performed at different speeds using a linear microphone array and a dummy head. The sound directivity radiated by the moving sources was studied by the microphone array. In turn, to establish the detectability of powered two-wheelers, thirty-seven subjects were exposed to an auditory test consisting on a virtual road-crossing scenario. The subjects had to detect the approaching of a vehicle at 20 km/h.

The results showed a significant reduction in the sound pressure level emitted by electric motorcycles at low-speed, as well as a notable increase in sound directivity with velocity. At once, the reaction time obtained for the detection of electric powered two-wheelers was higher compared to the traditional propulsion ones. The results highlighted the risk posed by this kind of electric vehicles for pedestrians.

Keywords: Powered Two-Wheelers (PTWs), Mopeds, Electric Vehicle (EV), Detectability, Directivity.

Universidad de Alicante
Universidad de Alicante



3. Artículo tercero

Universitat d'Alacant

Universidad de Alicante

Poveda-Martínez, Pedro; Mizuki Kawagucho; Katsuya Yamauchi; Ramis Soriano, Jaime.
Sound Pleasantness of Electrically Adjustable Exterior Mirrors in Vehicles. Submitted to
Applied Acoustics: 2 march 2018.

Abstract

Consumers increasingly demand high quality products, forcing manufacturers to a greater effort when designing. During the last years, the noise has become a key factor in valuing a product, so the use of psychoacoustic techniques has been extended considerably. The automotive sector has always taken in consideration the noise when designing vehicles. A large number of tools and analysis methods have been developed in order to determine the sound quality of their products. Although the first efforts focussed on establishing the sound quality of the propulsion system, they rapidly spread to other parts of the vehicle like doors, powered windows, etc.

The present work focuses on studying the behaviour of electrically adjustable exterior mirrors in vehicles. In order to analyse the noise produced by this kind of devices, four different samples were measured in a semi-anechoic chamber. To establish the pleasantness descriptor of the samples, sixty-two subjects were exposed to an auditory test using two different methods: paired comparison and ranking procedure. The experiments were carried out in three different laboratories: University of Kyushu in Japan (JP), University of Coimbra in Portugal (PT) and University of Alicante in Spain (SP); leading to a cross-cultural study. The results showed a great similarity between the preferences obtained by the two methods. The subjective perception was correlated with different psychoacoustic parameters in order to determine a quality metric.

A high correlation was established between the pleasantness perceived by the listeners and parameters such as sound pressure level, loudness or roughness.

Keywords: Acoustic, Electrically Adjustable Exterior Mirror, Vehicle, Sound Quality, Pleasantness.