FIA 2018
XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

ESTUDIO DE LA CALIDAD SONORA DE PEQUEÑOS MOTORES ELÉCTRICOS

PACS: 43.66.Lj

Poveda-Martínez, Pedro[1]; Ramis-Soriano, Jaime[1]
[1]Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías.
Universidad de Alicante
Campus de San Vicente del Raspeig
Email: pedro.poveda@ua.es; jramis@ua.es

Palabras Clave: motor DC, calidad sonora, agradabilidad, ruido

ABSTRACT

Currently, there are many products on the market whose operation is based on the movement of its components. Often, an electric motor is used as an energy source, becoming the main cause of noise in the mechanism. Throughout this work, the study of the sound quality of small electric motors is carried out, determining the parameters that better describe the subjective perception of the consumer. The main objective is to establish a metric that facilitates, during the design process, the selection of the most suitable motor for its implementation in small electromechanical devices.

RESUMEN

Actualmente, podemos encontrar en el mercado multitud de productos cuyo funcionamiento se basa en el movimiento de sus componentes. En la mayoría de casos se emplea un motor eléctrico como fuente de energía, convirtiéndose éste en la principal causa de ruido en el mecanismo. A lo largo de este trabajo se lleva a cabo el estudio de la calidad sonora de pequeños motores eléctricos, determinando los parámetros que mejor describen la percepción subjetiva del consumidor. 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.

1. INTRODUCCIÓN

En el mercado podemos encontrar inumerables productos de consumo cuyo funcionamiento implica algún tipo de movimiento. Para ello, es necesario la utilización de un motor que permita, a través de su rotación, la transmisión de fuerza y movimiento a otros componentes del dispositivo. Así, podemos encontrar diferentes tipos de máquinas y mecanismos como electrodomésticos, herramientas eléctricas de mano, o incluso vehículos. En la mayoría de casos los dispositivos son accionados por un motor eléctrico, y tal es su volumen en el mercado que representan cerca del 45% del consumo total de electricidad [1].

Es posible establecer una clasificación de los motores en función del tipo de alimentación necesaria para su funcionamiento: corriente alterna (AC) y corriente continua (DC). En la actualidad existen diferentes modelos DC, siendo el más común el motor con escobillas. Este tipo de dispositivo se divide principalmente en dos partes. Por un lado encontramos la componente estática de la estructura, denominada estator. Por otro lado tenemos el rotor, parte interna del motor cuya rotación se trasmite a través del eje de salida. La fuerza electromotiz responsable de dicho movimiento se debe a la interacción mutua entre los flujos magnéticos de rotor y estator. En este tipo de motores, la conexión entre rotor y estator tiene lugar por medio de escobillas que se deslizan por la superficie del conmutador, lo que hace necesario un mantenimiento periódico. Éste es uno de los motivos por los cuales en los últimos años se ha incrementado el uso del motor sin escobillas. Su escaso mantenimiento supone una ventaja considerable frente a otros modelos. Asimismo, la evolución de la electrónica ha promovido la utilización de motores tipo paso a paso y servomotores, mediante los cuales se obtiene un control total de la posición y la velocidad.

Los motores son elementos móviles y por tanto, susceptibles de generar ruido y vibraciones. Las fuentes principales de ruido que aparecen en un motor pueden agruparse en dos grupos. El primero de ellos corresponde al ruido de origen magnético, destacando las variaciones producidas en los materiales debidas a los efectos magnetoetrictivo y electroestrictivo, y a la desviación radial ocasionada por las fuerzas generadas en el hueco de aire entre rotor y estator. En segundo lugar tenemos los ruidos de origen mecánico causados por la estructura, el eje y los rodamientos. Asimismo, la incorporlación de ventiladores para la refrigeración del motor puede suponer una fuente de ruido considerable. El ruido global emitido por un motor eléctrico estará formado por numerosos armónicos donde el primero de ellos está relacionado con la velocidad de giro del rotor y el número de polos que lo componene [2]. De acuerdo con Zwicker et al. en [3], los sonidos con una composición espectral rica en armónicos son percividos por el oyente como ásperos. Del mismo modo, las componentes tonales del ruido afectarán a la percepción del tono [4].

Los estudios existentes sobre el ruido generado por motores se centran en su mayoría en la monitorización del estado de funcionamiento del dispositivo. La detección de fallas resulta clave, especialmente en aplicaciones industriales donde un diagnóstico temprano del defecto puede evitar costes operacionales o de mantenimiento innecesarios. Para realizar este tipo de controles existen diferentes alternativas. Liu et al. en [5] describe algunas de las técnicas más extendidas para el diagnóstico de motores de inducción a través de una revisión del estado del arte. Así, podemos distinguir entre métodos basados en la obtención de parámetros a partir de señales de vibración, análisis en el dominio de la frecuencia, análisis transitorio, análisis de orden, análisis de envolvente, etc. Del mismo modo, Glowacz et al. en [6] presentan una técnica de diagnóstico temprano de fallas basándose en el reconocimiento de señales acústicas para motores de inducción.

Como se indicó anteriormente, esta monitorización resulta de gran importancia en aplicaciones de tipo industrial. Sin embargo, en el ámbito doméstico cobra mayor relevancia la percepción subjetiva del cliente, siendo determinante a la hora de establecer la calidad del producto. El motor es una de las fuentes de ruido más importantes en la mayoría de aplicaciones de consumo. Por tanto, un mayor conocimiento en relación a su comportamiento acústico podría ser de gran utilidad durante las fases de diseño y desarrollo del producto. En este sentido, Raffaele Dagonetti et al. en [7] llevan a cabo un estudio psicoacústico donde evaluan el ruido emitido por diferentes motores DC. Para ello, por medio del método de comparación de parejas, evalúan seis modelos distintos de motores DC. Los ensayos se realizan sobre un total de 115 personas y se analizan características como el tono, la aspereza o la molestia sonora. Los autores concluyen que el tono está directamente relacionado con el número de ranuras en

el devanado. Asimismo, determinan que la molestia sonora percibida queda definida por el tono y la aspereza, incluso para motores con sonoridad distinta. El trabajo remarca la necesidad de nuevos ensayos que analicen el comportamiento sonoro de los motores y que describan la influencia de otros parámetros en la percepción del usuario.

El objetivo de este trabajo 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. Para ello, en primer lugar se estudia el comportamiento acústico de diferentes motores eléctricos. Seguidamente se llevan a cabo ensayos psicoacústicos por el método de diferencias semánticas. A partir de la correlación entre la percepción subjetiva del usuario y un análisis objetivo del ruido se establecen aquellos parámetros más relevantes a la hora de describir la calidad sonora de las muestras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el presente estudio se seleccionaron siete motores DC cuyas características se describen en la tabla 1. La adquisición de muestras sonoras se llevó a cabo en una cámara semianecoica, con los motores trabajando en vacío, mediante un micrófono de medida situado a una distancia de 10 cm de las muestras (ver figura 1). En todos los casos, la adquisición se realizó durante un intervalo de 15 segundos.

Tabla 1. Parámetros mecánicos y eléctricos de las muestras analizadas.

Muestra	Tensión (V)	Velocidad Vacio (rpm)	Consumo Vacio (A)	Velocidad * (rpm)	Consumo* (A)	Par* (g·cm)
S1	12	4000	0.23	3350	0.93	195
S2	12	4000	0.17	3335	0.84	166
S3	24	4000	0.07	3489	0.47	204
S4	24	4000	0.08	3379	0.44	171
S5	12	4000	0.17	3289	0.78	160
S6	12	3500	0.12	2976.9	0.67	164
S7	12	4650	0.17	3203.0	0.90	168

**Valores para máximo rendimiento*

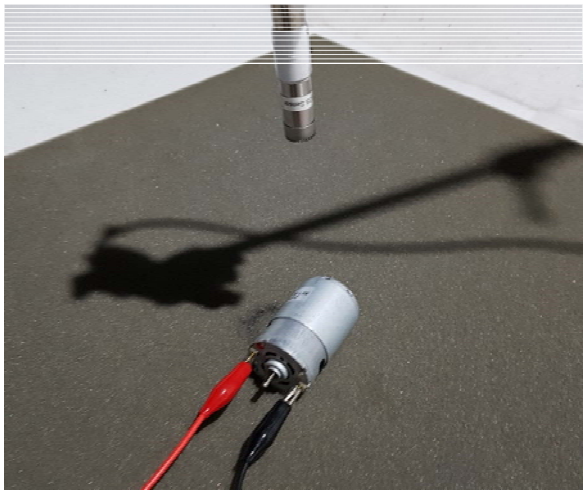

Figura 1. Configuración de medida empleada.

Para cada una de las muestras ensayadas se calcularon el nivel de presión sonora y los parámetros psychoacústicos tradicionales: sonoridad, agudeza, fuerza de fluctuación, aspereza y tonalidad. Asimismo, se obtuvieron resultados proporcionados por métricas compuestas como la agradabilidad sonora o la molestia objetiva.

A partir de las muestras de audio adquiridas se llevó a cabo un ensayo auditivo para establecer la calidad sonora de los motores. El estudio se realizó por el método de diferencias semánticas, analizando la percepción subjetiva del oyente en relación a los siguientes atributos: molestia, robustez, potencia, estado, nivel ruido, precio y calidad. Para ello, mediante el uso de auriculares y una herramienta software, se presentaron las diferentes muestras sonoras a los participantes. El oyente debía indicar, mediante un control tipo scroll, el valor percibido según el adjetivo (ver figura 3).

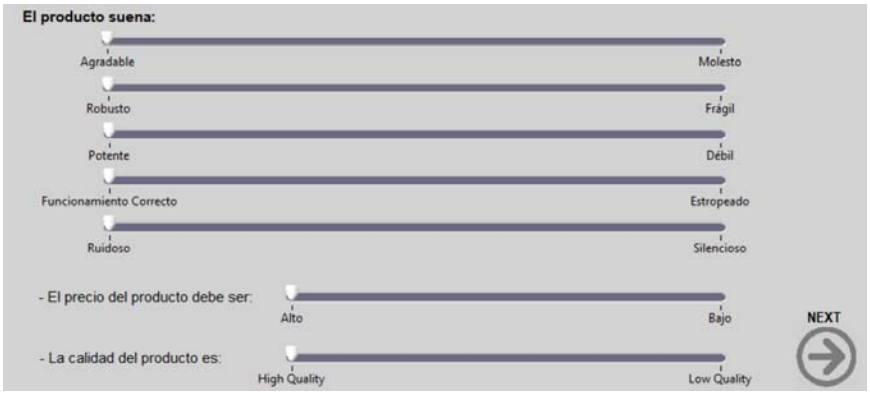

Figura 3. Software empleado para la evaluación de las muestras sonoras.

Analizando las respuestas proporcionadas por todos los oyentes, se obtuvo el valor promedio para cada una de las muestras y atributos. Posteriormente, los resultados se correlaron con los parámetros objetivos calculados.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis del ruido producido por los motores

El ruido producido por los motores DC se caracteriza por la presencia de numerosas componentes tonales. Estas frecuencias están asociadas a características como la velocidad de giro o la composición interna del motor, por lo que varían de una muestra a otra. La figura 2 representa el espectrograma obtenido en cada caso.

La tabla 2 recoge los valores obtenidos para los diferentes parámetros psicoacústicos calculados. Asimismo, se obtuvo el nivel de presión sonora global para cada una de las muestras. Los resultados indicaron una variación considerablemente del SPL de una muestra respecto a otra (diferencia máxima de 9 dB). El mismo comportamiento se produjo para los parámetros psicoacústicos, especialmente para la tonalidad y la aspereza. Según la molestia objetiva, los motores con mayor sonoridad fueron percibidos como más desagradables.

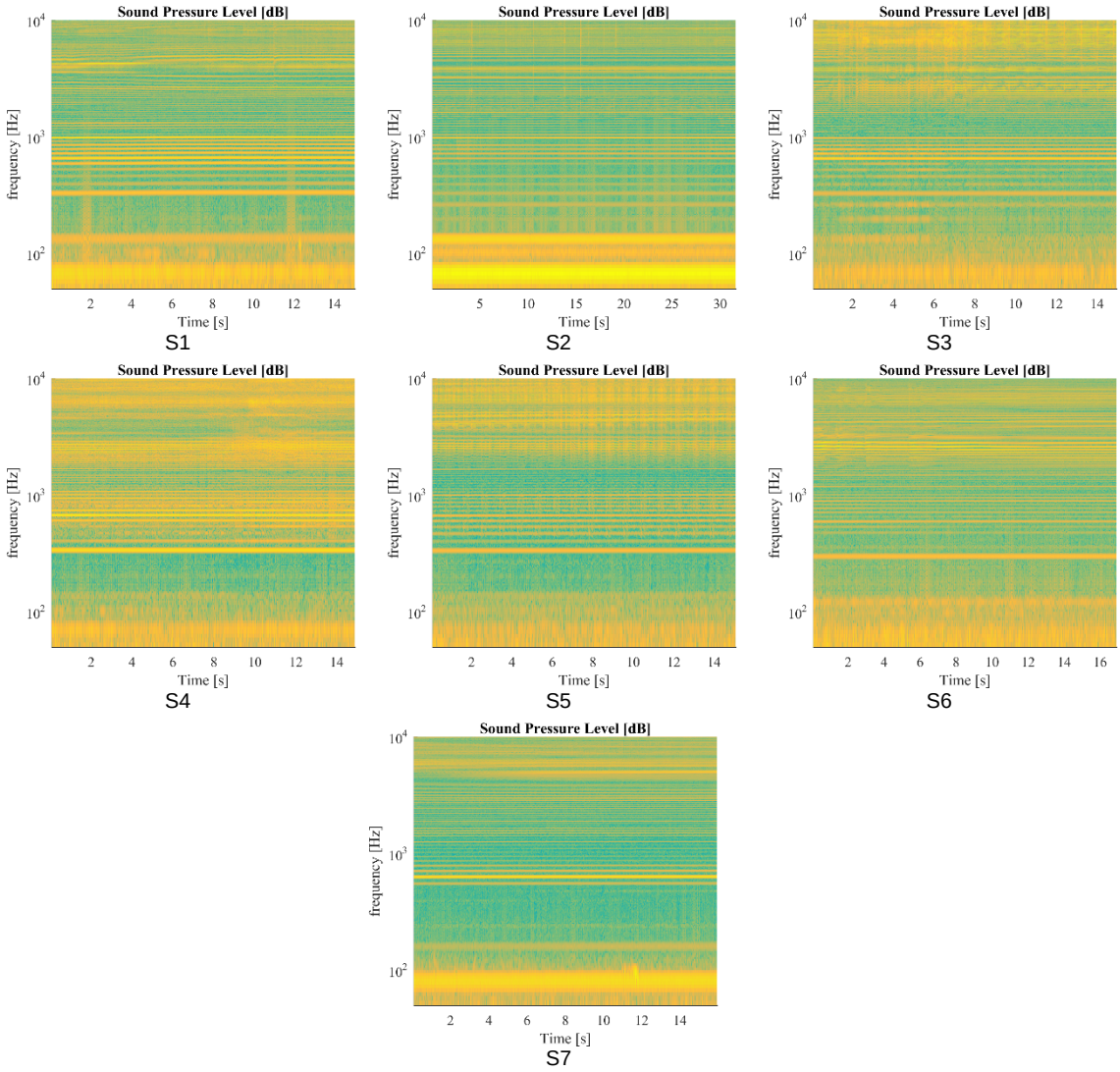

Figura 2. Espectrogramas de frecuencia obtenidos para cada una de las muestras analizadas.

Tabla 1. Parámetros mecánicos y eléctricos de las muestras analizadas.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
SPL, dB(A)	54,8	52,4	59,0	58,2	61,4	54,2	57,6
Sonoridad, sone	8,71	6,84	10,03	10,61	11,11	7,37	9,08
Agudeza, acum	2,32	2,82	2,98	2,55	2,98	2,62	2,78
Fuerza de Fluctuación, vacil	0,039	0,061	0,078	0,035	0,05	0,05	0,029
Tonalidad, tu	0,85	1,7	1,02	0,59	1,33	1,06	1,09
Aspereza, asper	0,84	0,94	1,38	1,81	1,66	1,24	1,02
Molestia objetiva, a	24,85	19,98	44,26	37,46	42,28	22,12	28,36
Sensación agrado sonoro, pu	0,18	0,11	0,06	0,06	0,05	0,11	0,1
Sonoridad 10%	9,02	7,11	12,13	11,66	11,93	7,86	9,26

3.2. Evaluación de calidad sonora

En los ensayos auditivos participan un total de 17 personas con edades comprendidas entre 20 y 57 años. A partir de todas las valoraciones realizas se estableció la preferencia medida para cada una de las características evaluadas. La siguiente figura muestra el mapa resultante para las diferentes muestras:

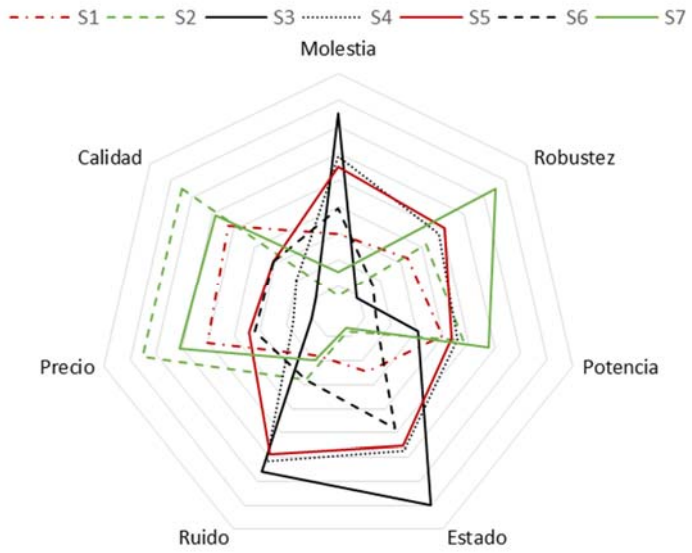

Figura 3. Percepción media del usuario para los diferentes atributos evaluados.

De acuerdo con la percepción del usuario, existe una relación directa entre muchos de los atributos evaluados. La molestia ocasionada por el ruido de las muestras presentó una correlación elevada tanto con el estado del motor como con su comportamiento acústico (ruidoso-silencioso). Por otro lado, se comportó de forma inversa a la calidad y precio del producto. La misma tendencia se obtuvo para el estado del motor y el comportamiento acústico. Un funcionamiento incorrecto o muy ruidoso se asoció con una calidad y un precio bajos. Asimismo, la robustez de las muestras y su potencia parecen ser conceptos relacionados. Por último, tal y como se oberva en la figura 4, existe una relacción clara entre los conceptos de precio y calidad de producto.

Analizando la correlación entre la percepción del usuario y los parámetros psicoacústicos calculados para cada muestra, se observó una relación clara entre métricas como la aspereza o la sonoridad al 10% y el comportamiento acústico de los motores, su precio y su calidad. Del mismo modo, el parámetro molestia objetiva definido por Aures describío en gran medida la molestia percibida por el usuario (85%), el comportamiento acústico de las muestras (89%) y la calidad de las mismas (77%). Por otro lado, cabe indicar que ninguno de los parámetros analizados fue capaz de describir de manera adecuada la potencia percibida por el usuario. En cuanto a la robustez del producto, según el coeficiente de correlación de Pearson, únicamente la fuerza de fluctuación proporció un resultado significativo.

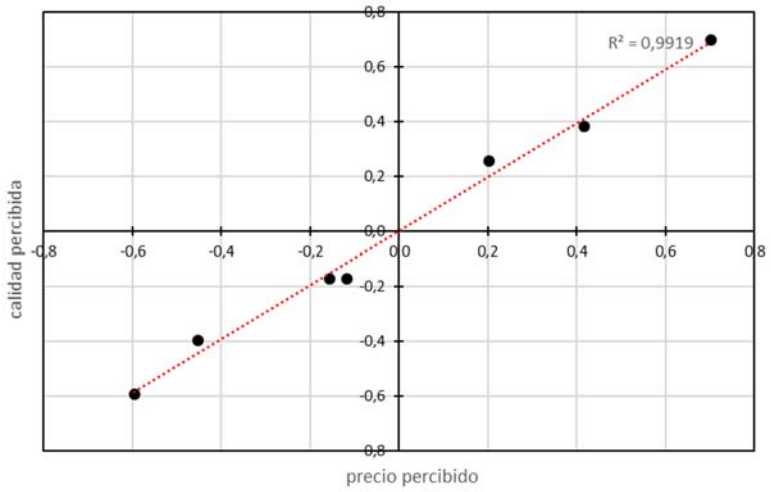

Figura 4. Relación entre la calidad y el precio percibidos para los motores analizados.

4. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se analizó el comportamiento acústico de pequeños motores eléctricos con objeto de establecer la percepción subjetiva del usuario en relación a diferentes atributos. Para ello, en primer lugar se realizó la adquisición y el análisis de muestras sonoras. En todos los casos se obtuvo un espectro de frecuencias complejo formado por diferentes componentes tonales. Asimismo, se observó una diferencia significativa en el nivel de presión sonora emitido por las muestras. Este comportamiento se repite para algunos de los parámetros psicoacústicos calculados, especialmente para la aspereza y la tonalidad.

A partir de los ensayos auditivos efectuados se constató una dependencia importante entre algunos de los atributos evaluados por los oyentes. Destaca la correlación existente entre la molestia, el estado del motor, el precio y la calidad percibida por el usuario. Del mismo modo, ciertos parámetros psicoacústicos describen de manera adecuada las características valoradas en los ensayos, especialmente la aspereza del ruido emitido, factor clave a la hora de establecer tanto la molestia del usuario como el precio o la calidad del producto. La utilización de una métrica compuesta por diferentes parámetros podría suponer una mejora considerable en la descripción de la percepción del usuario.

5. REFERENCIAS

[1] Waide, P; Brunner, C. U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency. 2011.

[2] Gieras JF, Wang C, Lay J Cho. Noise of polyphase electric motors. Boca Raton (USA): Taylor & Francis; 2005.

[3] Zwicker E, Fastl H. Psychoacoustics – facts and models. Springer. 3rd Ed. Berlin. 2007.

[4] Hansen H, Verhey JL, Weber R. The magnitude of tonal content. A review. Acta Acust. United Acust. 2011; 97:355-63.

[5] Liu, Y.; Bazzi, AM. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. ISA Transactions. 2017 Sep; 70:400-409.

[6] Glowacz, A.; Glowacz, Z. Diagnosis of stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. Applied Acoustics. 117. 20-27. 2017.

[7] Dragonetti, R.; Ponticorvo, M.; Dolce, P.; Di Filippo, S.; Mercogliano, F. Pairwise comparison psychoacoustic test on the noise emitted by DC electrical motors. Applied Acoustics 119. 108-118. 2017.