

Establecimiento de un protocolo de ensayos normalizado para el estudio del ruido aéreo emitido por máquinas eléctricas rotativas (9CHLIE)

Lara Raya, Fco. Ramón¹, Serrano Lorenzo-Arroyo, Antonio¹, Barranco López, Vicente¹ y Pérez Hidalgo, Fco. Manuel²

¹ Departamento de Electrotecnia y Electrónica, Área de Ingeniería Eléctrica
E.P.S., Universidad de Córdoba

Campus Menéndez Pidal, C/ María Virgen y Madre s/n – Córdoba, 14071 (España)
Tel.:+34 957 218356, fax:+34 957 218316, e-mail: el1laraf@uco.es, p12seloa@uco.es, el1balov@uco.es

² Departamento de Ingeniería Eléctrica

E.T.S.I.I., Universidad de Málaga
Campus El Ejido, Málaga (España)

Tel.:+34 952 131377, e-mail: fmperrez@uma.es

Resumen

En este trabajo se establece una solución procedimental para el estudio del ruido aéreo generado por máquinas eléctricas rotativas, en base a directrices de carácter normativo, así como a la naturaleza de las componentes de dicho ruido.

La necesidad de obtener unos resultados fiables, ajenos a interferencias debidas al ruido ambiente, así como a los equipos auxiliares utilizados, unida a la conveniencia de poder comparar los resultados obtenidos en diferentes máquinas sin depender de parámetros subjetivos, como la distancia de los micrófonos, el ambiente acústico, etc., obliga a observar aquellas normas y directrices relacionadas de forma directa o indirecta con el estudio de dicho ruido.

El trabajo aquí presentado recopila y traduce dichas normas y directrices, tratando de convertirse en un sistema de aplicación de las mismas, enfocado a establecer un protocolo que permita el estudio del ruido aéreo generado por las máquinas eléctricas rotativas, de la forma más fiable y rigurosa posible.

Palabras llave: Ruido, Máquinas Eléctricas Rotativas, Protocolo, Normativa.

1. Introducción

Si imaginamos un motor eléctrico trabajando, siempre irá acompañado de un ruido que no es especialmente agradable, y no sólo para nuestros oídos, sino también para nuestro bolsillo, ya que si vamos más allá, deduciremos también que ese ruido es una parte de la energía consumida que se transforma en energía sonora perjudicando el rendimiento de nuestra máquina, o sea,

que además de ser una molestia, tiene asociado un gasto económico.

Será pues de gran interés el poder establecer una metodología eficaz, que permita cuantificar las componentes del espectro sonoro generado por una máquina eléctrica, con objeto de poder analizar si es posible reducir aquellas componentes que podrían ser consideradas como innecesarias y/o perjudiciales.

2. Origen de ruido en las Máquinas Eléctricas Rotativas

Las diferentes causas que generan ruido en una máquina eléctrica rotativa pueden resumirse en tres grupos principales: el ruido originado por el sistema de refrigeración de la máquina, denominado ruido aerodinámico, el ruido generado por las fricciones y funcionamiento de las partes móviles de la máquina, denominado ruido mecánico y por último, el debido a la interacción de fuerzas electromagnéticas en el entrehierro de la máquina, denominado ruido electromagnético. Por tanto, la emisión total de ruido de una máquina eléctrica rotativa, puede considerarse como una combinación de tres fuentes no correlacionadas actuando a la vez[1][2] y para su estudio deberán atenderse, por tanto, a las características propias de cada una de estas componentes. A continuación se detalla algo más el origen y características de dichas fuentes.

A. Ruido de origen aerodinámico.

Esta componente es debida al sistema de ventilación y al paso de elementos móviles cerca de las partes fijas de la propia máquina y es particularmente importante en motores de bajo número de polos (2 ó 4), ya que en éstos la velocidad alcanzada por el eje del motor y por ende, del sistema de ventilación y elementos móviles acoplados a él es mayor que en el caso de elevado número de polos.

En estos motores, ésta es la componente más significativa en lo que se refiere a emisión de ruido.

Existen, por tanto, dos causas del ruido de origen aerodinámico, una es la surgida de una alta velocidad de flujo de aire y la otra por la presión pulsante en el aire por el denominado “efecto sirena”. La mayor parte del ruido está asociado al ventilador, bien por la velocidad del flujo de aire, o bien porque las aspas del ventilador pasan muy cerca de algún componente, causando el ya mencionado efecto.

De manera aproximada, puede esperarse de cualquier ventilador con una velocidad periférica lineal superior a 50 m/s, un nivel de emisión de ruido elevada. De manera aproximada y como guía para estimar el nivel de ruido medido como nivel de presión sonora con ponderación A emitido por un ventilador típico se considera proporcional a la raíz cúbica de la velocidad periférica expresada en m/s.

Los efectos sirena se producen, como ya se ha comentado, cuando el ventilador se encuentra cerca de un componente. El aire puede entonces experimentar una pulsación cada vez que un aspa pasa por dicho componente, lo que origina un ruido de frecuencia discreta en el flujo de aire a velocidades bajas. En casos extremos parte del circuito de circulación del aire podría resonar.

Las frecuencias estarán relacionadas con el número de aspas del ventilador. Por ejemplo, un ventilador de nueve álabes, girando a 3600 rpm, (60 rps) emite a una frecuencia de 540 Hz. No existe una relación entre el número de aspas y el nivel de ruido, ya que lo único que modifica es la frecuencia a la que éste se reproduce.

B. Ruido de origen mecánico

Este ruido es debido principalmente al rozamiento de los cojinetes y partes móviles de la máquina. Se puede asegurar que éste no es significativo en comparación con otras causas cuando el estado de los cojinetes es bueno. De otra manera el ruido puede incrementarse mucho cuando están dañados.

Los cojinetes planos, aun cuando necesiten lubricación, pueden considerarse bastante apropiados. Un mal alineamiento u otros problemas pueden ser origen de ruido. Pero si éste es el caso, es un síntoma claro de que pueden empezar a existir serios fallos en la máquina. Los cojinetes correctamente fijados, tanto en motores pequeños como en grandes, producirán un nivel de ruido menor que el debido a origen aerodinámico o electromagnético.

En el caso de cojinetes a bolas, éstos son relativamente más ruidosos que los planos, pero todavía se puede considerar que su poder de generación de ruido es inferior al que generan las componentes aerodinámica y electromagnética, tan sólo cuando éstas son muy bajas, el ruido de los rodamientos podrá predominar. Cualquier irregularidad en los propios rodamientos, así como en los

anillos que los sustentan pueden ser origen de ruido, que en el caso de una pequeña muesca en alguno de los anillos, producirá un ruido a una frecuencia bien definida, función de la velocidad de rotación de la máquina, que como todas las formas de ruido, puede presentar algún armónico de la frecuencia fundamental. Sin embargo, si existen varias muescas, los niveles de ruido de los armónicos pueden ser muy superiores.

C. Ruido de origen electromagnético

Este tipo de ruido es generado en las máquinas eléctricas por la interacción de las ondas de inducción, tanto de la fundamental como de sus armónicos, presentes en el entrehierro.

Estas ondas son variables en el espacio y en el tiempo y existen por la distribución de los bobinados y variación de la permeancia magnética del entrehierro, debido a las ranuras del estator y rotor, a la saturación y a la excentricidad. Se descartan las componentes tangenciales de la inducción en el entrehierro, considerando sólo las radiales. Estos armónicos de inducción combinados entre sí, generan ondas de fuerza periódicas en dirección radial en el entrehierro, deformando el núcleo del estator y excitando el aire circundante.

La frecuencia de este tipo de ruido será función de la frecuencia de las ondas de inducción existentes en el entrehierro y por tanto, de la frecuencia de la señal de alimentación de la máquina, que en caso de ser alimentada a frecuencia industrial, será de 50 Hz y armónicos y en caso de ser alimentada mediante un variador de frecuencia, ésta será la que determine a su vez la frecuencia de ruido electromagnético emitido por la máquina.

En máquinas de elevado número de polos (6 ó más), ésta es la principal componente de ruido. Hay dos razones para ello. Por un lado, como la velocidad del ventilador disminuye cuando aumenta el número de polos, el ruido aerodinámico asociado disminuye también. Y por otro, si el número de polos aumenta, el grosor del núcleo del estator disminuye. Por tanto, como es más fácil deformar un núcleo de estator con una unión delgada que con una gruesa, el ruido debido al circuito magnético es superior.

3. Base Normativa aplicable

Existe numerosa documentación normativa que hace referencia a las características que deben rodear a ensayos donde intervienen medidas de niveles acústicos, bien sean niveles de presión, intensidad o potencia sonora. En el caso específico que nos ocupa, lo primero será discernir qué tipo de magnitud acústica es la que deseamos obtener. Debido a la dependencia con la distancia a la que se realiza la medida, el nivel de presión sonora no es el más aconsejable como magnitud de referencia, ya que para una misma máquina, los valores obtenidos pueden diverger según las posiciones del micrófono seleccionadas. El nivel de potencia sonora, en cambio, es una magnitud que caracteriza el nivel de emisión de la fuente, independientemente de la distancia

a la que se realicen las mediciones. Será, por tanto más conveniente este patrón de medida para nuestro objetivo.

Una vez justificada la necesidad de establecer como patrón de medida el nivel de potencia acústica, pasaremos a establecer el criterio de selección de la normativa específica a aplicar. Para ello nos basaremos en la Norma UNE-EN ISO 3740, “*Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido*”, versión española de la Norma Europea EN ISO 3740:2000, que a su vez adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 3740:2000. Dicha norma establece una guía para la utilización de normas básicas relacionadas con la medida de potencia acústica, estableciendo un criterio de selección de normas específicas, basándose en criterios como el grado de precisión requerido, la calificación del entorno de ensayo, volumen de la fuente, instrumentación, etc. y son válidas para la medida de ruido generado por maquinaria y equipos en general.

Centrándonos en el establecimiento del código de ensayo propiamente dicho, encontramos la norma UNE-EN ISO 12001 “*Ruido emitido por máquinas y equipos. Reglas para la preparación de un código de ensayo de ruido*”, versión española de la Norma Europea EN ISO 12001, adopción de la Norma Internacional ISO 12001:1996. Pero si concretamos en lo que se refiere a máquinas eléctricas rotativas, podemos referirnos a la Norma UNE-EN ISO 1680 “*Código de ensayo para la medición del ruido aéreo emitido por máquinas eléctricas rotativas*”, versión oficial en español, de la Norma Europea EN ISO 1680, que a su vez adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 1680:1999. Esta Norma tiene por objetivo especificar la información necesaria para realzar eficientemente y en las condiciones normalizadas la determinación, declaración y verificación de las características de emisión acústica de las máquinas eléctricas rotativas, especificando los métodos de medida, las condiciones de funcionamiento y de montaje que deben utilizarse para el ensayo, siendo aplicable a máquinas eléctricas rotativas de cualquier longitud, anchura y altura, estables por sí solas (motores y generadores de corriente continua y corriente alterna), sin limitación de tensión, pudiendo ser alimentadas por una red sinusoidal o por un convertidor, incluyendo además los elementos auxiliares necesarios para el funcionamiento de la máquina siempre que formen parte de la máquina.

Podría desprenderse de lo hasta ahora comentado, que nos encontramos ante la solución al problema planteado y aunque en parte es así, basta con echar un vistazo a su contenido para comprender que el mismo incluye un cúmulo de referencias a normas específicas de aplicación, que a su vez llaman a otras, encontrándonos en un bucle de difícil salida, a menos que se esté bastante familiarizado con este tipo de documentación. Como ya se comentó anteriormente, este trabajo pretende evitar ese problema.

Tanto en la Norma ISO 3740, como en las ISO 12001 y 1680, los procedimientos y métodos descritos para la determinación de los niveles de potencia acústica se

basan en las Normas ISO 3741, 3743-1, 3743-2, 3744, 3745, 3746 y 3747 (en el caso de usar como base el nivel de presión acústica), así como las Normas ISO 9614-1 y 9614-2 (en el caso de basarse en el nivel de intensidad acústica). La selección de la Norma más adecuada se fundamenta, como ya se ha comentado, en parámetros objetivos, principalmente el grado de precisión requerido, ambiente de ensayo, volumen de la fuente de ruido, tipo de ruido emitido por dicha fuente, límite de ruido de fondo y equipo de medida.

A continuación se describe de forma resumida el contenido de las Normas observadas para la determinación del nivel de potencia acústica, con objeto de allanar el camino para la elección de la más idónea. Una vez hecho esto proseguiremos con la aplicación de la Norma ISO 1680, específica para ensayos acústicos de máquinas eléctricas rotativas.

A. *Norma ISO 3741. “Método de precisión para cámaras reverberantes”*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en cámara reverberante de volumen entre 70 y 300 m³, en función de la banda de frecuencias de interés.
Comprende todos los tipos de ruido descritos por la Norma ISO 12001 excepto el impulsivo.
- 2) *Incertidumbre en la medida.* Inferior a 0.5 dB en niveles de potencia acústica ponderados A y espectro de frecuencias prácticamente plano. Oscila entre 1 dB y 3 dB en función de la banda de frecuencias estudiada.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora en bandas de 1/3 de octava en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas, bien de forma directa o por comparación con una fuente de referencia.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica en bandas de frecuencia, niveles ponderados A, de potencia acústica a partir de los anteriores y eventualmente niveles de potencia acústica con otras ponderaciones en frecuencia.
- 5) *Magnitudes que no pueden determinarse.* Características de directividad de la fuente e historia temporal del ruido radiado por fuentes que emitan ruido no estable.

B. *Norma ISO 3743-1. “Método de ingeniería para fuentes móviles y pequeñas en campos reverberantes mediante comparación en cámaras de ensayo de paredes duras”*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en cámara de superficies duras y reflectantes, con coeficientes de absorción inferior a 0.20 a cualquier frecuencia y con un volumen superior a 40 m³ y 40 veces el volumen del paralelepípedo de referencia.
Las fuente de ruido pueden ser máquinas pequeñas, dispositivos y componentes y sub-conjuntos, especialmente adecuada a pequeños

equipos móviles, no adecuada a equipos fijos más grandes.

La mayor dimensión de la fuente no debe ser superior a 1,0 m en cámaras de ensayo de volumen inferior a 100 m³ y no mayor de 2,0 m en cámaras de ensayo mayores.

Comprende todos los tipos de ruido descritos en la Norma ISO 12001, excepto los de tipo impulsivo aislados.

- 2) *Incertidumbre en la medida.* Inferior a 1.5 dB en niveles de potencia acústica ponderados A. Oscila entre 1.5 dB y 3 dB en función de la banda de frecuencias de interés.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora en bandas de octava en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica en bandas de octava y niveles ponderados A de potencia acústica a partir de los anteriores.
- 5) *Magnitudes que no pueden determinarse.* Características de directividad de la fuente e historia temporal del ruido radiado por fuentes que emitan ruido no estable.

C. *Norma ISO 3743-2. “Método de ingeniería para fuentes móviles y pequeñas en campos reverberantes en cámaras de ensayo reverberantes especiales”*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en cámara reverberante especial con características determinadas, con un volumen comprendido entre 70 m³ y 300 m³. El tiempo de reverberación a frecuencias bajas y medias debe reducirse instalando materiales absorbentes en paredes y techo.

Las fuentes de emisión de ruido pueden ser máquinas pequeñas, dispositivos, componentes y ensamblajes, especialmente adecuada a pequeños equipos móviles, no adecuada a equipos fijos grandes.

El volumen de la fuente no debe ser superior al 1% del volumen de la cámara de ensayo.

Comprende todos los tipos de ruido descritos en la Norma ISO 120001, excepto los de tipo impulsivo aislados.

- 2) *Incertidumbre en la medida.* Inferior o igual a 2 dB en niveles de potencia acústica ponderados A. Oscila entre 2 dB y a 5 dB en función de la banda de frecuencias de interés.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora ponderados A para el método directo y niveles de potencia acústica en bandas de octava y ponderados A para el método de comparación en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Para el método directo, niveles de potencia acústica ponderados A y para el método de comparación, niveles de potencia acústica en bandas de octava y niveles ponderados A de potencia acústica a partir de los anteriores.

- 5) *Magnitudes que no pueden determinarse.* Características de directividad de la fuente e historia temporal del ruido radiado por fuentes que emitan ruido no estable.

D. *Norma ISO 3744. “Método de ingeniería utilizando una superficie de medida envolvente en un campo esencialmente libre sobre un plano reflectante”*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en un campo esencialmente libre próximo a uno o varios planos reflectantes (en cámara o al aire libre). La cámara puede ser semi-anecoica o cámara ordinaria grande. El (Los) plano(s) reflectante(s) sobre los que se sitúa la fuente deben extenderse al menos hasta la superficie de medida, con un coeficiente de absorción preferentemente inferior a 0,06. La corrección del entorno no deberá sobrepasar 2 dB.

El tipo de fuente de ruido incluye cualquier fuente fija o móvil y su tamaño sólo está limitado por el entorno de ensayo disponible.

Comprende todos los tipos de ruido declarados en la Norma ISO 12001.

- 2) *Incertidumbre en la medida.* Inferior o igual a 1.5 dB en niveles de potencia acústica ponderados A (fuentes de espectro relativamente plano). Oscila entre 1,5 dB y 5 dB en función de la banda de frecuencias de interés.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora ponderados A y/o en bandas de frecuencia, en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica ponderados A y/o en bandas de frecuencia, niveles de potencia acústica con otras ponderaciones en frecuencia a partir de dichas bandas, niveles de presión acústica de superficie, niveles de presión acústica en posiciones determinadas, de suceso único, medida de impulsividad, características de directividad e historias temporales del nivel de presión acústica y del nivel de potencia acústica.

E. *Norma ISO 3745. “Método de precisión para cámaras anecoicas y semi-anecoicas”*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en un campo libre (cámara anecoica) o un campo libre sobre plano reflectante (cámara semi-anecoica). El plano reflectante sobre el que se sitúa la fuente debe extenderse al menos la mitad de la longitud de onda de la frecuencia más baja de interés y más allá de la proyección de la superficie de medida, con un coeficiente de absorción inferior a 0,06.

Las fuentes de ruido posibles son principalmente pequeñas fuentes fijas o móviles de tamaño no superior a la mitad del radio de medida.

Comprende todos los tipos de ruido descritos en la Norma ISO 12001.

- 2) *Incertidumbre en la medida.* Para cámaras anecoicas oscila entre 0,5 dB y 2 dB en función de la banda de frecuencias de interés.
Para cámaras semi-anecoicas la desviación típica oscila entre 1 dB y 2 dB en función de la banda de frecuencias de interés.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora en bandas de 1/3 de octava, en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica ponderados A y/o en bandas de frecuencia, niveles de energía acústica y de presión acústica de suceso único para fuentes de ruido impulsivo, niveles de potencia acústica con otras ponderaciones en frecuencia a partir de dichas bandas, niveles de presión acústica de superficie, niveles de presión acústica en posiciones únicas, medida de impulsividad, características de directividad e historias temporales del nivel de presión acústica y del nivel de potencia acústica.

F. *Norma ISO 3746. "Método de control utilizado en superficie de medida envolvente sobre un plano reflectante"*

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno de ensayo basado en cámara o al aire libre con uno o varios planos reflectantes con los requisitos especificados en la citada Norma.
El tipo de fuente de ruido incluye cualquier fuente fija o móvil de tamaño tan sólo limitado por el entorno de ensayo disponible.
Comprende todos los tipos de ruido descritos en la Norma ISO 12001.
- 2) *Incertidumbre en la medida.* Para fuentes que emitan ruido de banda ancha estable, la desviación típica inferior o igual a 3 ó 4 dB, en función del factor de corrección del entorno.
Para fuentes con tonos puros predominantes, inferior o igual a 4 ó 5 dB en función del factor de corrección del entorno.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora ponderados A, en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica ponderados A, niveles de presión acústica de superficie, niveles de presión acústica en posiciones únicas, medida de impulsividad, características de directividad e historias temporales del nivel de presión acústica y del nivel de potencia acústica.

G. *Norma ISO 3747. "Método de comparación o de ingeniería para su uso en un campo esencialmente reverberante in situ"*

- 1) *Campo de aplicación.* Cualquier entorno de ensayo interior, diferente del de un laboratorio, con ruido de fondo suficientemente bajo y campo acústico suficientemente reverberante.

El tipo de fuente de ruido incluye fuentes acústicas no transportables in situ sin restricciones de tamaño.

Comprende principalmente ruidos de banda ancha, pero también de banda estrecha y tonos puros.

- 2) *Incertidumbre en la medida.* Desviación típica inferior o igual a 1,5 dB, para niveles de potencia acústica ponderados A (clase de predicción 2). En entornos no cualificado inferior o igual a 4 dB para niveles de potencia acústica ponderados A (clase de control).
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de presión sonora en bandas de octava, en posiciones fijas de micrófono a lo largo de trayectorias especificadas.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica en bandas de octava y niveles de potencia acústica ponderados A a partir de los anteriores.

H. *Norma ISO 9614. "Método de precisión, de ingeniería o de control utilizando la intensidad acústica"*

Mediciones en puntos concretos o por barrido, por barrido sólo adopta las clases de precisión de ingeniería o de control, lo que afectará a la incertidumbre de medida.

- 1) *Campo de aplicación.* Entorno especificado por la Norma.
El tipo de fuente de ruido incluye cualquier fuente fija o móvil para cámara o aire libre sin restricciones respecto al tamaño.
Comprende principalmente ruidos de la fuente y parásitos estables durante el tiempo de medición.
- 2) *Incertidumbre en la medida.* Oscila entre 1 y 2 dB para la clase de precisión, en función de la banda de frecuencia seleccionada. Entre 1,5 y 3 dB para la clase de ingeniería e inferior o igual a 4 dB para la clase de control, referido en este último caso a niveles de potencia acústica ponderados A.
- 3) *Magnitudes a medir.* Niveles de intensidad acústica y niveles de presión acústica sobre una superficie de medida envolvente.
- 4) *Magnitudes a determinar.* Niveles de potencia acústica en bandas de octava o de 1/3 de octava y niveles de potencia en bandas de frecuencia o ponderados en frecuencia.

4. Factores influyentes en la elección del método de medida

A continuación se describen los factores a tener en cuenta para la elección de la Norma específica más adecuada para la determinación del nivel de potencia acústica emitido por la máquina, resumiéndose posteriormente en una pequeña guía.

A. Tamaño de la fuente de ruido comparado con el volumen de la cámara de ensayo

Algunos métodos imponen restricciones al volumen máximo de la fuente. En el caso de la Norma ISO 3741 (cámara reverberante), el volumen de la fuente no debe ser superior al 2% del volumen de la propia cámara. En las Normas ISO 3743-1 e ISO 3743-2 (métodos en campo reverberante), el volumen de la fuente no deberá superar el 1% del volumen total de la cámara. Las Normas ISO 3744, 3746, 3747, 9614-1 y 9614-2, no imponen, en cambio, restricciones al tamaño de la fuente.

B. Entorno de ensayo disponible para las mediciones

Si la fuente es móvil y no demasiado grande, puede instalarse en cualquier entorno de ensayo (cámaras o aire libre). Si la fuente no es móvil, el ruido deberá medirse *in situ*. En este caso podrán aplicarse los métodos descritos por las Normas ISO 3744, 3746, 3747, 9614-1 o 9614-2. En anexo de las Normas ISO 3744 (método de ingeniería) e ISO 3746 (método de control) se especifican métodos de cualificación y requisitos del entorno que permitan discernir cuál aplicar. Si el ruido de la fuente es estable en el tiempo y el ruido de fondo es elevado, se recomienda usar las Normas ISO 9614-1 y/o 9614-2.

Para máquinas instaladas al aire libre y máquinas grandes (volumen significativamente superior a 2 m³), no son aplicables los métodos descritos por las Normas ISO 3741, 3743-1 y 3743-2. Para el caso de pequeñas máquinas móviles (volumen preferentemente inferior a 1 m³) que emitan un ruido de banda ancha esencialmente estable, podrá aplicarse cualquiera de las Normas Internacionales descritas. En este caso, será el entorno de ensayo disponible y la precisión deseada los que determinen el método a seleccionar.

C. Características del ruido

Si el ruido generado por la fuente es de banda ancha estable o si el espectro contiene componentes de frecuencia discretos o ruidos de banda estrecha, podrá aplicarse cualquier método. Si el ruido es impulsivo compuesto por impulsos aislados de energía acústica no podrán seleccionarse las Normas ISO 3741, 3743-1, 3743-2 ni 3747, debiendo recurrir a alguno de los métodos descritos por las Normas ISO 3744, 3745 o 3746. Las Normas ISO 9614-1 y 9614-2 sólo serán aplicables si el ruido es estable en el tiempo. Si el ruido de la fuente emite de forma predominante en bandas comprendidas entre 31,5 y 40 HZ y/o entre 8000 y 10000 Hz, no podrán aplicarse las Normas ISO 9614-1 ni 9614-2.

D. Clase de precisión requerida

Los métodos de mayor precisión (laboratorio) se describen en las Normas ISO 3741 (cámaras reverberantes), 3745 (campo libre) y 9614-1 (intensimetría). Los métodos de ingeniería (precisión media) se describen en las Normas ISO 3743-1, 3742-2 (campo reverberante), 3744 (campo libre sobre plano

reflectante), 3747 (comparación en campo esencialmente reverberante *in situ*), 9614-1 y 9614-2 (intensimetría). Los métodos de control (precisión más baja) se describen en las Normas ISO 3746, 3747, 9614-1 y 9614-2.

E. Datos acústicos requeridos

Variarán en función del objetivo de la medición:

- 1) *Estudios de reducción de ruido.* Requieren información cuantitativa sobre el espectro del nivel de potencia acústica (en bandas de octava o de 1/3 de octava), pudiendo necesitarse mediciones complementarias de componentes frecuenciales discretos o de características de directividad o vibratorias. Aunque se aconseja usar métodos de laboratorio, a menudo los métodos de ingeniería son suficientes.
- 2) *Ensayos de ruido y comparación del ruido de máquinas.* Para declaración de la emisión de máquinas o para comparar máquinas del mismo tipo, basta generalmente con una simple determinación global del nivel de potencia acústica ponderado en frecuencia (normalmente A). Son más útiles si incluyen información más detallada de las características del ruido (como la distribución del nivel de potencia acústica en bandas de octava o de 1/3 de octava). El espectro del nivel de potencia acústica es útil si se tienen que comparar máquinas de diferente tipo o tamaño. En cualquier caso se recomienda un método de ingeniería.

5. Guía para la elección de la Norma Internacional adecuada para la determinación del nivel de potencia acústica de la fuente

El diagrama de la Figura 1 muestra una guía básica y general para la elección de la(s) Norma(s) adecuada(s), dentro de lo estipulado por la Norma ISO 1680, que recordemos, es en la que se basa principalmente este trabajo. Dicha elección requiere considerar atenta y detalladamente los siguientes puntos:

- La posibilidad de utilizar un método de ingeniería (sólo deberá utilizarse un método de control si es el único método práctico).
- La Norma Internacional contemplada a fin de garantizar que todos los requisitos puedan cumplirse.
- Los aspectos económicos.

Si no se posee mucha experiencia en la medición de emisiones acústicas se debería:

- Averiguar si existe un código de ensayo de ruido para la máquina en cuestión. Si es así, la norma observada debería ser una de las propuestas por dicho código. En caso de que no exista, ponerse en manos expertas en la determinación de emisión acústica de maquinaria.

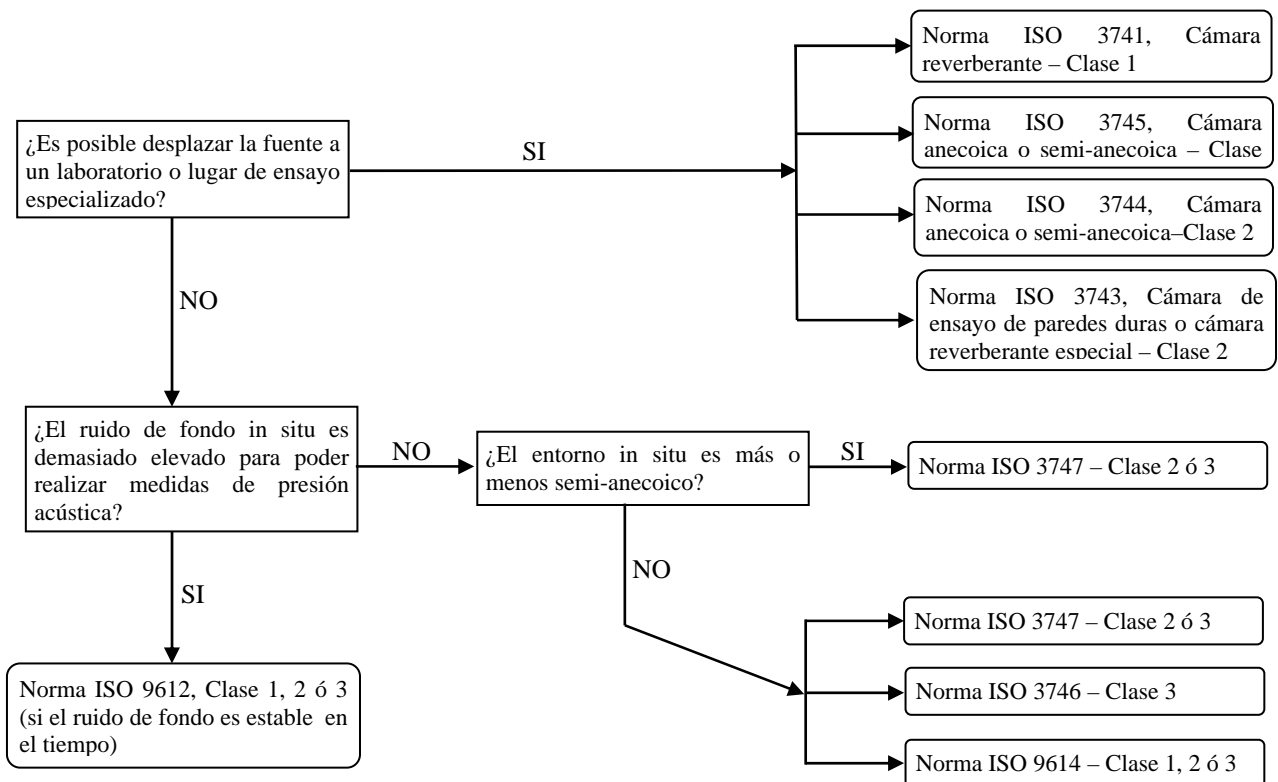


Fig. 1- Diagrama guía para la elección de la (las) Norma(s) adecuada(s) para la determinación del nivel de potencia acústica

- Investigar la practicabilidad de un lugar de ensayo en laboratorio, en cuyo caso no debería ser costoso.

aquellas Normas que admitan el grado de ingeniería (Normas ISO 3747 y 9614, Clase 2).

Atendiendo a estos factores y en el caso que nos ocupa del ruido emitido por máquinas eléctricas rotativas, deberíamos actuar de la siguiente manera:

- Si disponemos de un lugar de ensayo adecuado según lo descrito por las Normas ISO 3741, 3743, 3744 ó 3745 y la máquina a ensayar es de pequeña o mediana potencia y fácilmente trasladable, se optará por alguna de estas opciones, preferentemente optando por un método de ingeniería (Normas ISO 3743 y 3744, Clase 2).
- Si no disponemos de entorno de ensayo adecuado o la máquina, bien por su modo de funcionamiento o por sus dimensiones, no es fácilmente trasladable, optaremos por las siguientes vías en función del entorno donde se realicen las mediciones:
 - A) Si el ruido de fondo en el entorno de medición es excesivamente elevado y estable en el tiempo, se optará por atender la Norma ISO 9612, usando preferentemente el método de ingeniería (Clase 2).
 - B) Si el ruido de fondo no es excesivamente elevado, contando además con un ambiente más o menos semianecoico, se aplicará la Norma 3747, usando preferentemente el método de ingeniería (Clase 2).
 - C) Si el ruido de fondo no es excesivamente elevado y el ambiente no es más o menos semianecoico, se atenderán preferentemente

Evidentemente, una vez seleccionada la Norma básica a aplicar, existen factores muy determinantes, que condicionarán la aplicabilidad o no de la misma. Entre ellos está el equipo de medida disponible, el cual determinará sin duda alguna el grado de precisión de la medición y por tanto, si se corresponde o no con las exigencias de la Norma básica correspondiente. La Norma ISO 60651, establece los tipos de sonómetros y su grado de precisión correspondiente.

6. Código de ensayo

Una vez determinada la Norma específica, para la determinación del nivel de potencia acústica, estamos en condiciones de proseguir con el establecimiento del Código de ensayo, basado en la Norma ISO 1680.

A. Condiciones de instalación y montaje

Preferiblemente la máquina deberá montarse de la misma forma que en su uso normal, minimizando la transmisión y radiación de ruido estructural, mediante montaje elástico (máquinas pequeñas) o rígido (máquinas grandes). Si se ensayan en carga deberán llevar montaje rígido, debiendo entonces separar el ruido de la carga propio de la máquina. La masa del soporte deberá ser al menos dos veces la de la máquina de ensayo.

Si necesita equipos auxiliares (engranajes, transformadores, convertidores,...) no deben afectar al

ensayo, por lo que si es preciso se aislarán acústicamente o basarse en la Norma ISO 9614.

B. Condiciones de funcionamiento

Deberá operar a la tensión y velocidad nominales, debiendo en cualquier caso recogerse las condiciones de funcionamiento en el informe.

El ensayo preferiblemente se realizará sin carga. Si trabaja a diferentes velocidades se deben determinar aquellas que generan más ruido.

C. Incertidumbre en la medida

Puede deberse a factores asociados a las condiciones ambientales o a técnicas experimentales.

Puede ocurrir que exista cierta dispersión entre los valores de potencia acústica de una máquina medidos en diferentes laboratorios. Con pocas excepciones, esta desviación no excederá ciertos valores, denominados desviaciones estándar de reproducibilidad σ_R (Tabla I), definidos por la Norma ISO 7574-1.

Tabla I. – Valores estimados de la desviación estándar de reproducibilidad del nivel de potencia acústica ponderado A para diferentes grados de precisión

Grado de precisión	Desviación estándar de reproducibilidad (σ_R) en dB
Grado 1	1
Grado 2	1,5
Grado 3	3

La incertidumbre también dependerá del grado de confianza deseado, expresado por el grado de precisión utilizado.

D. Indicación de los valores de emisión acústica

Según la Norma ISO 1680, los valores de emisión acústica deben ir determinados por un doble número, correspondiendo el primero de ellos a la propia Norma y el segundo la Norma básica utilizada para la determinación del nivel de emisión acústica (Ejemplo: ISO 1680/ISO 3744)

E. Información a consignar

- 1) *Máquina objeto de ensayo.* Descripción de la máquina (tipo, tamaño, equipo auxiliar,...), condiciones de funcionamiento (tensión, convertidor, carga,...) y condiciones de montaje
- 2) *Entorno acústico.* Determinado por la Norma básica utilizada
- 3) *Instrumentación.* Determinada por la Norma básica utilizada.
- 4) *Datos acústicos.* Determinados por la Norma básica utilizada.

F. Información a presentar en el informe

Se debe indicar que los niveles de potencia acústica se han obtenido en total conformidad con los métodos descritos por esta Norma. En caso contrario se debe indicar toda desviación, además de:

- 1) *Descripción de la máquina de ensayo*
- 2) *Condiciones de funcionamiento*
- 3) *Nivel de potencia acústica ponderado A, en decibelios y si es necesario el nivel de potencia acústica no ponderado por bandas de frecuencia, referencia I_pW .*
- 4) *Si es relevante, información de la presencia de tonos discretos.*
- 5) *Fecha de realización de la medida.*

7. Conclusiones

Tras una ardua labor de recopilación documental y normativa, persiguiendo la máxima rigurosidad en la obtención de resultados en función del grado de precisión requerido, se puede concluir con la obtención de un protocolo eficaz, fiable y riguroso para la determinación del nivel de ruido aéreo emitido por máquinas eléctricas rotativas, basado en Normas Internacionales, las cuales determinarán para cada caso concreto el entorno, instrumentación y procedimiento a seguir, quedando tan sólo la tarea de recurrir a la Norma más adecuada, una vez aplicado el procedimiento de selección especificado en este trabajo.

Referencias

- [1] Harris, C., Manual de Medidas Acústicas y Control del Ruido. Traducción: Suengas, A. 3ª Edición. McGraw Hill. (1991).
- [2] Beranek, L., Noise and Vibration Control Engineering. John Wiley & Sons, Inc. (1992).
- [3] Normas ISO 1680, 12001, 60651, 3740, 3741, 3743-1, 3743-2, 3744, 3745, 3746, 3747, 9614-1, 9614-2, 60804, 61260.
- [4] Normas CEI 60034-1 y 60651