

ANÁLISIS DE RUIDOS DE MOTORES ELÉCTRICOS APLICANDO INTENSIMETRÍA SONORA

Jorge A. Pérez Villalobo^a, Oscar A. Ramos^{a,b}, Alan J. Urquiza Manzanelli^a, Horacio H. Contrera^a y David A. Novillo^a

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica, CINTRA, Unidad Asociada del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, X5016ZAA Córdoba, Argentina, jperez@electronica.frc.utn.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Miembro de la Carrera del Investigador Científico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras clave: intensidad sonora - potencia acústica – ruido de motores eléctricos.

Resumen. En este estudio se analizan los ruidos generados por distintos motores eléctricos de lavarropas en diferentes condiciones de funcionamiento, utilizando intensimetría sonora. Se construyen mapas de directividad para detectar las zonas de mayor nivel de emisión sonora, permitiendo optimizar las soluciones de control de ruido. Así mismo, se aplica la técnica para el cálculo de los niveles de potencia acústica emitida por cada motor. Los resultados muestran las bondades de la técnica para este tipo de problemas.

El estudio se enmarca dentro del Proyecto de Investigación “Intensimetría sonora: una nueva técnica de medición del ruido aplicada en áreas no convencionales” acreditado por la Universidad Tecnológica Nacional.

1 INTRODUCCIÓN

La intensimetría sonora es el área de la acústica dedicada a la medición y análisis de la intensidad sonora para el estudio de fuentes y campos sonoros. De manera clásica, se ha utilizado la medición del nivel de presión sonora para la caracterización de fuentes de ruido, pero esta magnitud depende tanto de la potencia acústica de la fuente como de las condiciones del medio. Por el contrario, la intensidad sonora, depende exclusivamente de la potencia acústica de la fuente (Harris, 1999; Jacobsen, 2011), característica que la hace más adecuada para el estudio de fuentes sonoras.

En la primera parte del estudio se exponen los conceptos fundamentales de la técnica de intensimetría. Luego, se describen los fundamentos de las sondas de medición de intensidad sonora más utilizadas y las principales fuentes de error relacionadas a su uso. Finalmente, se muestra una aplicación de la técnica en un caso práctico de medición de la potencia acústica emitida por motores eléctricos y posteriormente se desarrollan mapas de directividad.

2 INTENSIDAD SONORA

2.1 Fundamentos teóricos

La intensidad sonora es una magnitud vectorial que describe la cantidad y la dirección del flujo neto de energía en un punto de una superficie dada (Gade, 1982). Este vector es perpendicular a la superficie en estudio. Si no existe flujo neto de energía en un punto entonces la intensidad sonora será nula. De este modo la intensidad sonora en la dirección r está dada por:

$$I_r = \frac{dE_r}{dt \cdot dA} \quad (1)$$

Donde E_r es la energía que fluye a través del diferencial de área dA perpendicular a la dirección de propagación r , durante el período de tiempo dt . A partir de esta definición podemos expresar la potencia sonora de una fuente como el flujo de energía que atraviesa una superficie cerrada –que contiene a la fuente– en función de la intensidad sonora como:

$$W = \int_A \vec{I} dA \quad (2)$$

Las tres magnitudes (presión, intensidad y potencia sonora) en la condición de campo libre se relacionan por la fórmula siguiente:

$$I_r = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r_i^2} = \frac{p_i^2}{\rho c} \quad (3)$$

En donde p_i es la presión sonora instantánea, ρ y c la densidad y velocidad de propagación del medio respectivamente y r_i la distancia a la fuente sonora.

Como puede observarse en la Figura 1, la intensidad y la presión sonora se atenúan con la distancia existente entre el punto de medición y la fuente sonora siguiendo la ley de los cuadrados inversos. Sin embargo la potencia sonora es independiente de la distancia en la que se realice la medición, ya que si bien la intensidad sonora disminuye con el cuadrado de la distancia, la superficie aumenta en igual proporción.

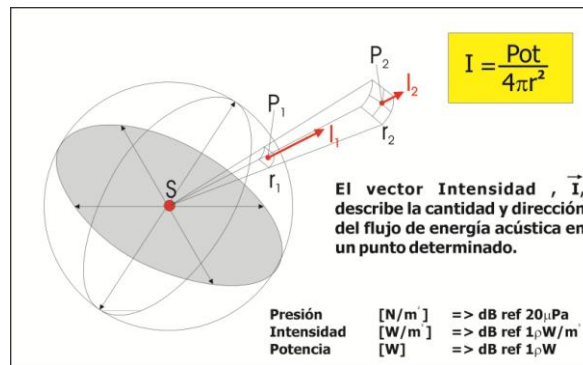


Figura 1: Relación entre la presión, intensidad y potencia sonoras.

Recordando la Ec. (1) y debido a que la energía sonora puede fluir en un sentido u otro, la intensidad sonora neta será la que se corresponde con el balance entre la energía entrante y la saliente. Considerando que la energía resultante es igual a la fuerza resultante F_r aplicada por el desplazamiento dr ; y la fuerza resultante es igual a la presión total p_t por diferencial de área dA , entonces:

$$dE_r = F_r \cdot dr = p_t \cdot dA \cdot dr \tag{4}$$

La presión total es la suma de la presión atmosférica (p_a) y la variación que se produce respecto de ella (Δp_a); el término de presión atmosférica representa la componente continua de la presión total, mientras que el incremento de la presión respecto de la atmosférica representa la componente alterna, que puede ser generada por una onda sonora.

De estas ecuaciones tenemos que:

$$I_{r_{instantánea}} = \frac{dE_r}{dt \cdot dA} = \frac{p_t \cdot dA \cdot dr}{dt \cdot dA} = (p_a + \Delta p_a) \cdot \frac{dr}{dt} = p_a \cdot u_r + \Delta p_a \cdot u_r \tag{5}$$

La componente continua de la intensidad sonora instantánea tiene un valor promedio cero, ya que no aporta flujo neto de energía. El segundo término es el producto de la presión sonora instantánea por la velocidad de las partículas u_r en la dirección r . Por lo tanto, denominando p al incremento de presión respecto a la presión atmosférica, tenemos que el vector intensidad sonora promedio es igual al producto entre la presión sonora y la velocidad de las partículas del medio, promediado en el tiempo:

$$\vec{I}_r = \overline{(p(t) \cdot \vec{u}_r(t))} \tag{6}$$

Para un campo sonoro sinusoidal, donde:

$$p(t) = p_o \cos(\omega t + \phi_1) \tag{7}$$

$$\vec{u}_r(t) = \vec{u}_o \cos(\omega t + \phi_2) \tag{8}$$

Y sustituyendo en (6), tendremos:

$$\vec{I}_r = \overline{(p(t) \cdot \vec{u}_r(t))} = \frac{1}{T} \int_0^T p_o \cdot \vec{u}_o \cdot \cos(\omega t + \phi_1) \cdot \cos(\omega t + \phi_2) dt \tag{9}$$

Resolviendo la integral para un tiempo lo suficientemente extenso, nos queda:

$$\vec{I}_r = \frac{1}{2} \cdot p_o \cdot \vec{u}_o \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) = p_{RMS} \cdot \vec{u}_{RMS} \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \tag{10}$$

A partir de esta ecuación podemos ver que la intensidad sonora no sólo depende de la presión sonora y la velocidad de las partículas sino también del desfase entre estas señales. Cuando p y u están en fase, se dice que el campo es activo; en este caso se presentan las

condiciones de campo libre y el producto de p y u da un valor definido. Entonces existe un flujo neto de energía. De la expresión anterior tenemos:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (11)$$

Recordando que:

$$|\vec{u}| = \frac{p}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

Y para el caso en que ambas señales están en fase (es decir, $\phi_1 = \phi_2$), será:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(0^\circ) = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \quad (13)$$

Por el contrario, si la presión sonora y la velocidad de las partículas están desfasadas 90° entre sí, el campo se denomina reactivo. El producto de p y u varía sinusoidalmente alrededor de cero por lo que su valor promedio es nulo; de la Ec. (11) tendremos:

$$|\vec{I}_r| = p_{RMS} \cdot |\vec{u}_{RMS}| \cdot \cos(90^\circ) = 0 \quad (14)$$

Generalmente, los campos sonoros no son ni activos puros, ni reactivos puros, por lo tanto el desfase entre p y u puede variar entre -180° y 180° . Como la velocidad de las partículas es una magnitud vectorial, puede descomponerse en dos componentes, una activa en fase con la presión sonora y otra reactiva desfasada 90° con la misma. Sólo la componente activa de la velocidad de las partículas multiplicada por la presión sonora dará un resultado no nulo. Por ello:

$$\vec{I} = \vec{I}_{ac} + j\vec{I}_{re} = \vec{I}_{ac} \quad (15)$$

En la mayoría de los casos en que se efectúan mediciones de intensidad, lo que interesa es su componente activa, ya que es ésta la que nos informa a cerca del flujo neto de energía.

Asimismo, resulta interesante también destacar el siguiente análisis que hace Fahy (1995) para la intensidad sonora activa y reactiva. Podemos expresar la presión sonora y la velocidad de las partículas como:

$$p(x, t) = P(x) \cdot e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (16)$$

$$u(x, t) = \left(\frac{j}{\omega \cdot \rho_0} \right) \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (17)$$

En la notación compleja de p y u debemos saber que la presión sonora se escribe como una magnitud compleja en la que solo tiene sentido físico la parte real, en el caso de la velocidad de las partículas la notación compleja representa las dos componentes de la misma, una en fase (la parte real) y otra en cuadratura (la parte imaginaria) con la presión sonora.

Por lo tanto, el gradiente de presión puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \left[\frac{dP}{dx} + j \left(\frac{d\phi_P}{dx} \right) P \right] \cdot e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (18)$$

Entonces u es:

$$u(x, t) = \left(\frac{1}{\omega \cdot \rho_0} \right) \left[-P \left(\frac{d\phi_P}{dx} \right) + j \frac{dP}{dx} \right] e^{j(\omega t + \phi_P(x))} \quad (19)$$

Por lo que:

$$I = p \cdot u = I_{ac}(x, y) + jI_{re}(x, t) \quad (20)$$

En donde:

$$I_{ac} = -\frac{1}{\omega \cdot \rho_o} \cdot \left[P^2 \left(\frac{d\phi_P}{dx} \right) \right] \cos^2(\omega t + \phi_P) \quad (21)$$

$$I_{re}(x, t) = -\frac{1}{4\omega \cdot \rho_o} \left[\frac{dP^2}{dx} \right] \sin(2(\omega t + \phi_P)) \quad (22)$$

Y el valor promedio en el tiempo será:

$$\overline{I_{ac}}(x) = -\frac{1}{2\omega \cdot \rho_o} \left[P^2 \left(\frac{d\phi_P}{dx} \right) \right] \quad (23)$$

$$\overline{I_{re}}(x) = 0 \quad (24)$$

De aquí podemos observar como el promedio temporal de la intensidad sonora activa es un valor finito, mientras que el valor medio de la intensidad sonora reactiva es nulo. Además se infiere que la intensidad sonora activa depende del gradiente de fase de las componentes, y la componente reactiva depende del gradiente de la presión cuadrática media (Fahy, 2001). Este concepto es de vital importancia al momento de estudiar los errores y limitaciones de la técnica de intensimetría sonora.

Como expone Jacobsen (2011) la intensidad sonora reactiva describe la no propagación, el flujo oscilatorio de energía sonora que es característico del campo sonoro en el cual la presión sonora y la velocidad de las partículas están en cuadratura.

2.2 Sonda de intensimetría

Como ya se mencionó, para medir la intensidad sonora es necesario conocer simultáneamente la presión sonora instantánea y la velocidad de las partículas. Para ello se puede utilizar dos metodologías diferentes. La primera consiste en usar dos transductores distintos, uno para medir la presión sonora y otro para la velocidad de las partículas, en este caso hablamos de una sonda p-u. La segunda, se basa en el uso de dos transductores de presión sonora separados una distancia conocida y, por medio de ellos, hacer una estimación del gradiente de presión sonora y de la presión sonora media en el centro de los transductores, en este caso hablamos de una sonda p-p. Actualmente las más utilizadas son las sondas p-p, por su simplicidad y robustez, aunque con el avance de la tecnología los transductores de velocidad de las partículas están siendo cada vez más accesibles.

Analizaremos ahora la sonda p-p, que es la utilizada en este trabajo. El desarrollo de estas sondas, se fundamenta en la relación de Euler, la cual estipula que en un determinado fluido de densidad ρ , el gradiente de presión es quien acelerará ese fluido en una dirección dada. Así conociendo la densidad del fluido y el gradiente de presión, se puede conocer la aceleración del mismo; luego integrando esta se obtiene la velocidad de las partículas del medio.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \therefore u_r = -\frac{1}{\rho} \cdot \int \frac{\partial p}{\partial r} \cdot dt \quad (25)$$

En la práctica podemos medir la presión sonora en dos puntos (p_A y p_B) separados una distancia Δr utilizando una sonda p-p como muestra la Figura 2. Si dividimos la diferencia $p_B - p_A$ por la distancia Δr , obtenemos una muy buena aproximación del gradiente de presión siempre y cuando la separación entre los micrófonos sea mucho menor que la longitud de onda del sonido a medir, es decir, $\Delta r \ll \lambda$. Entonces:

$$\hat{u}_r = -\frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \cdot \int (p_B - p_A) dt \quad (26)$$

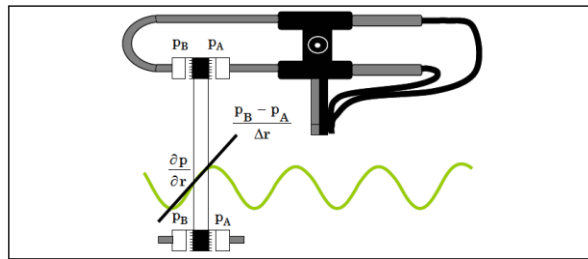


Figura 2: Determinación del gradiente de presión con una sonda p-p.

Debemos saber que dependiendo el orden en el que se tomen los micrófonos respecto de la dirección de propagación podemos tener valores positivos o negativos de intensidad sonora.

Otra característica importante de estas sondas de medición es la direccionalidad. Las sondas son muy sensibles en la dirección r para la cual han sido diseñadas, sin embargo la medición es nula cuando la fuente sonora está situada perpendicularmente a la dirección de propagación r . Si la sonda de intensidad no se orienta en la dirección de la fuente, la intensidad medida por ésta es la resultante de proyectar el vector intensidad sobre la recta de dirección r como muestra la [Figura 3](#). Entonces la intensidad sonora medida y la emitida por la fuente se relacionan a través de la siguiente ecuación:

$$|I_r| = |\vec{I}| \cdot \cos \theta \quad (27)$$

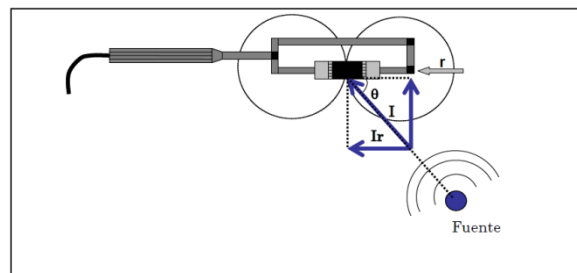


Figura 3: Direccionalidad de las sondas p-p.

2.3 Errores

Existen varias fuentes de error en la medición de la intensidad sonora utilizando sondas p-p. Algunos de ellos ligados al método en sí mismo y otros a deficiencias técnicas en las mediciones ([Herráez, 1996](#)). Por un lado, el método es muy dependiente de las condiciones del campo sonoro (viento, ruido ambiental, reverberación, etc.). Por otro lado, pequeños errores en las mediciones pueden ser amplificados debido a las integraciones necesarias en los cálculos.

De esta manera, se presentan tres principales fuentes sistemáticas de error (aparte de los errores aleatorios que existen en cualquier tipo de medición).

2.3.1 Error por la aproximación de diferencias finitas

Así como [Fahy \(1995\)](#) demuestra matemáticamente que la aproximación por diferencias finitas genera un error sistemático que aumenta con la frecuencia de la onda sonora que deseamos medir, [Munuera \(2008\)](#) simplifica el panorama y concluye que el error por aproximación de diferencias finitas impondrá un límite en alta frecuencia para el cual el error de medición es aceptable.

Esto es debido a que los micrófonos se encuentran separados una distancia conocida y que el gradiente de presión se aproxima mediante una recta delimitada por la presión sonora en

cada punto del espacio donde se ubican los micrófonos, cuando la longitud de onda de la señal disminuye (o sea que aumenta la frecuencia) ésta se vuelve comparable con la distancia que separa los micrófonos, por lo que la aproximación deja de ser exacta (ver Figura 4).

Según Munuera (2008) se puede obtener una precisión de ± 1 dB si se cumple que la longitud de onda de la señal a medir sea al menos 6 veces mayor que la longitud del espaciador. Existen varios separadores estándares cuyos límites en alta frecuencia son detallados en la Tabla 1.

Longitud del espaciador	Límite superior en frecuencia
50 mm	1,25 kHz
12 mm	5 kHz
6 mm	10 kHz

Tabla 1: Límite en alta frecuencia según el espaciador.

Para una onda sinusoidal plana en campo libre con propagación en la dirección del eje de la sonda de medición, se asume que la relación entre la intensidad sonora estimada \hat{I}_r y la real I_r se expresa por la siguiente ecuación:

$$\frac{\hat{I}_r}{I_r} = \frac{\text{sen}(k \cdot \Delta r)}{k \cdot \Delta r} \quad (28)$$

De igual manera, Jacobsen (2002, 2011) plantea estas expresiones que limitarán el empleo de la técnica de medición en alta frecuencia. Es importante que reconozcamos que estas fórmulas no sirven para corregir los valores ya medidos sino que son meros indicadores del límite superior de frecuencia según el espaciador usado.

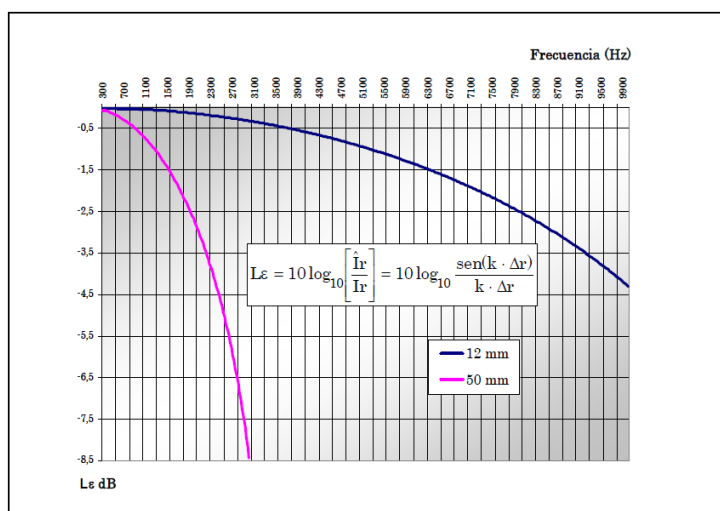


Figura 4: Error en la medición de intensidad sonora debido a la aproximación por diferencias finitas según el espaciador usado.

2.3.2 Error por scattering y difracción

La Ec. (28) solo es válida para una sonda ideal que no perturba el campo en ninguna manera. Esta aproximación solo es buena cuando el tamaño de los micrófonos es pequeño comparado con la distancia entre ellos. Como se puede deducir de diferentes trabajos (Jacobsen, 1992 y 2011; Pérez et al., 2007; Munuera, 2008) el límite superior de frecuencia se

puede extender al cancelarse el error producto de la aproximación por diferencias finitas con la propia interferencia que produce la sonda en el campo sonoro. Sin embargo, esto solo ocurre si se usan micrófonos de ½ pulgada montados cara a cara con un separador de 12 mm. Bajo estas circunstancias el límite superior de frecuencia puede extenderse hasta los 10 kHz sin cometer un error apreciable. Este fenómeno se debe a que la resonancia de las cavidades frontales de los micrófonos incrementa el nivel de presión sonora compensando el error cometido por la aproximación por diferencias finitas.

2.3.3 Error por desfasaje entre los canales

Las diferencias de fase entre las mediciones de ambos micrófonos son la fuente de error más importante en la medición de intensidad sonora, aún con los mejores equipamientos disponibles en la actualidad.

Aunque los equipos actuales han evolucionado mucho y están en mejora continua, todos tienen algún desfasaje entre ambos canales que se suma al ángulo de fase detectado por los micrófonos; a bajas frecuencias la diferencia de fase en el campo sonoro entre ambos micrófonos es extremadamente pequeña y la más mínima diferencia de fase introducida por el equipo puede generar grandes errores en la estimación de la intensidad sonora.

El equipo mide un ángulo (Φ) que es la suma entre el desfasaje real del campo sonoro, \emptyset , y el desfasaje introducido por la cadena de medición, φ .

$$\Phi = \emptyset + \varphi \quad (29)$$

Como se puede ver cuanto mayor es \emptyset , menor será el error relativo de la medición; por ello a bajas frecuencias donde \emptyset y φ pueden ser del mismo orden, el error introducido por el equipo puede llegar a ser considerable (Gade 1982; Fahy, 1995).

Por otra parte, estos límites no dependen exclusivamente del equipo de medición sino que además son función del campo acústico bajo estudio.

3 MEDICIÓN DE POTENCIA ACUSTICA

Una de las aplicaciones más difundidas de la intensimetría es la medición *in situ* de la potencia acústica generada por una fuente. Para lo que es necesario definir una superficie cerrada de integración –que contenga la fuente– a lo largo de la cual se medirán los diferentes valores de intensidad sonora mediante puntos discretos o mediante un barrido continuo a través de la misma.

El procedimiento de medición para determinar la potencia acústica con una sonda p-p usando el método de medición de puntos discretos está reglado por la norma ISO 9614-1:1993, la que especifica grados de precisión de acuerdo a la cadena de instrumentación empleada, así como también algunas recomendaciones a la hora de llevar a cabo la medición. De igual manera, el procedimiento de medición por barrido continuo se regla por la norma ISO 9614-2:1993.

De acuerdo a la norma ISO 9614-1:1993, la potencia acústica emitida por una fuente puede calcularse de la siguiente manera:

$$W = \sum_{i=0}^n I_i \cdot S_i \quad (30)$$

En donde I_i es el valor de la intensidad sonora medida en cada segmento de superficie S_i .

En este estudio, se relevó por intensimetría el ruido emitido por dos motores eléctricos y se calculó la potencia acústica generada a través de mediciones en puntos discretos. A los fines de analizar las virtudes y limitaciones de la técnica, se realizaron mediciones en ambientes sonoros totalmente diferentes; por un lado se midió en una cámara semianecoica (simulando

una medición en campo libre y sin fuentes sonoras parásitas), y por otro, se midió en un taller de mecánica con un torno de control numérico en funcionamiento (lo que nos brinda un campo altamente reverberante y con la influencia de una fuente parásita externa).

Para emplear la técnica de puntos discretos, se escogió una superficie virtual de medición de forma esférica, cuyo radio fue de 32 cm desde el centro geométrico del motor. En la misma se relevaron 26 puntos de medición, cada uno de ellos distantes a 45° entre sí (ver [Figura 5](#)).

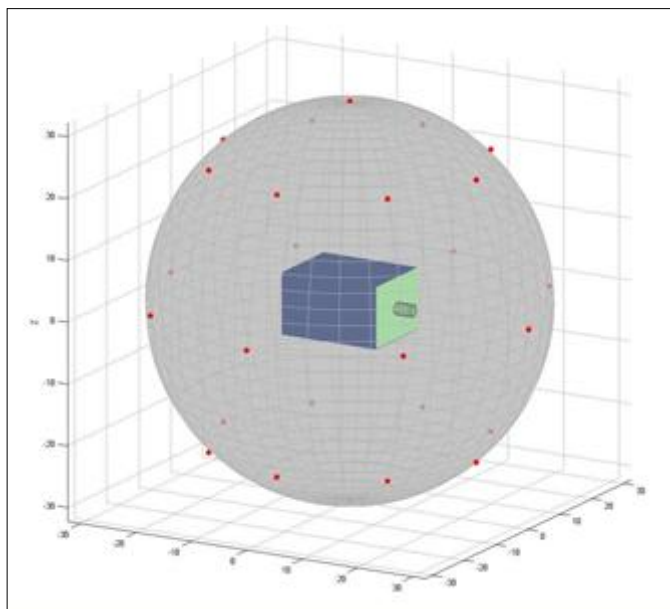


Figura 5: Distribución de puntos alrededor de la superficie esférica.

Para llevar a cabo las mediciones se utilizó un analizador de espectro de dos canales Bruel&Kjaer 2144, una sonda de intensidad p-p Bruel&Kjaer 3548 con micrófonos apareados tipo 4181 de $\frac{1}{2}$ " de diámetro ubicados frente a frente separados por un espaciador de 12 mm (otorgando un ancho de banda teórico de 250 Hz a 5 kHz), y una estructura circular especialmente desarrollada (Sistema de Mediciones Esféricas, SME, ver [Figura 6](#)) para guiar la sonda de medición permitiendo desplazamientos con radios constantes (el cual puede ser ajustado), en ángulos de azimut y elevación a pasos de 5° . Mediante este SME se obtienen los puntos deseados, todos sobre la misma superficie.

Las fuentes sonoras medidas son dos motores universales, empleados en lavarropas automáticos. Ambos funcionaron a 10.500 rpm, siendo la velocidad típica de trabajo. Ver [Tabla 2](#).

MOTOR 1	Nidec U112G40
MOTOR 2	Welling HXGNL.62

Tabla 2: Motores universales seleccionados como fuentes sonoras.



Figura 6: Sistema de Mediciones Esféricas (SME) con motor y sonda.

Los resultados esperados deberían mostrar una clara determinación de la potencia acústica emitida por las fuentes bajo prueba en las frecuencias medias y altas, aunque una medición con una gran incertidumbre hacia las bajas frecuencias. Claro está, que las mediciones deberían ser, hasta cierto punto, independientes de la influencia de la fuente parásita (en la medición en taller). Además, en la cámara semianecoica deberíamos obtener una incertidumbre menor en frecuencias bajas con respecto al taller, debido a la reactividad del campo sonoro generado en este último.

Es necesario volver a mencionar que, el ancho de banda teórico de nuestra cadena de medición es de 250 Hz a 5 kHz, límite calculado matemáticamente por Fahy. Sin embargo, Jacobsen, concluye que cuando se usa la configuración utilizada en nuestro caso, el límite superior de frecuencia puede llegar a extenderse hasta los 10 kHz.

Las mediciones arrojaron los siguientes resultados, presentados en niveles de potencia acústica lineal.

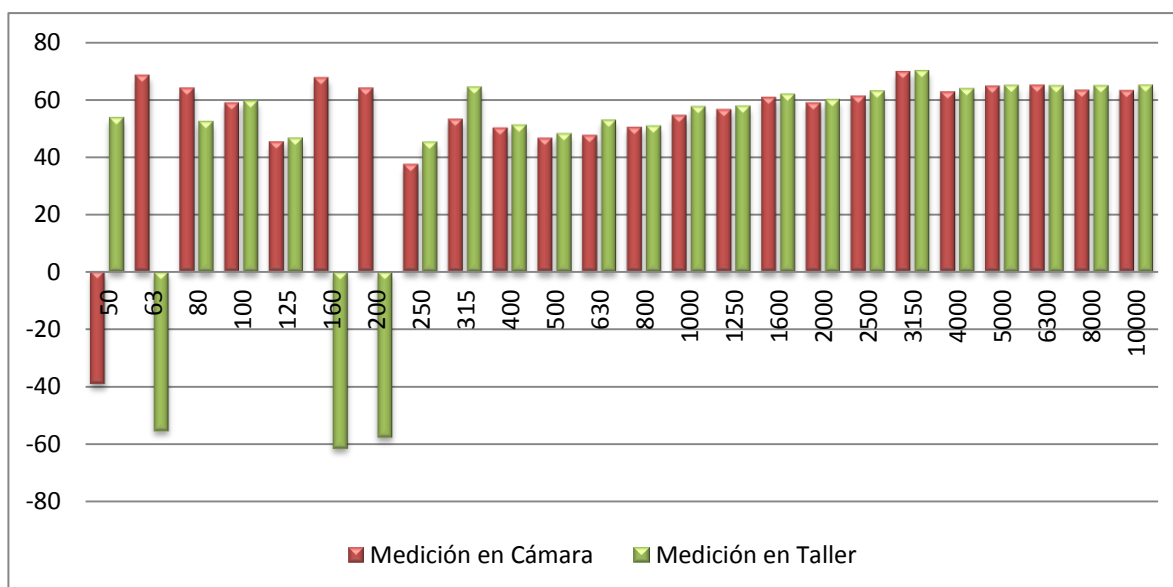


Figura 7: Niveles de potencia acústica – Motor 1.

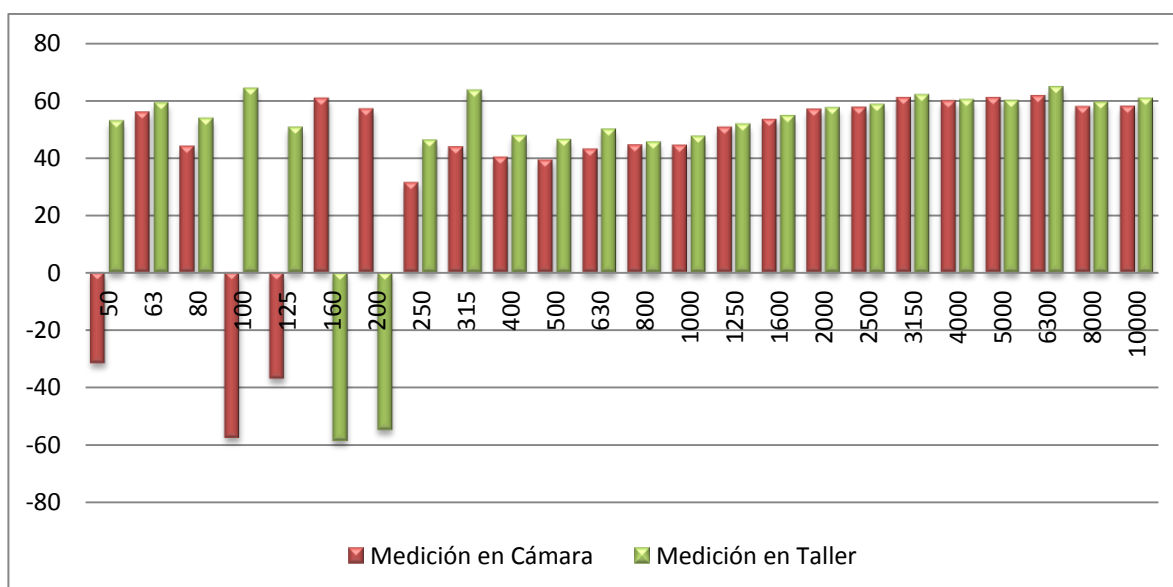


Figura 8: Niveles de potencia acústica – Motor 2.

Si analizamos ambas gráficas podemos observar que a partir de los 800 Hz, tanto para el MOTOR 1 como para el MOTOR 2 las mediciones realizadas en la cámara y en el taller arrojan resultados similares. Esto demuestra que en esa zona del espectro obtenemos una dispersión baja, ya que nuestros resultados difieren muy poco.

Sin embargo, por debajo de los 250 Hz, se obtienen resultados muy poco coherentes. Los mismos varían en varias decenas de decibeles, e incluso llegan a ser de signos opuestos. Aquí es donde aparece una de las mayores limitaciones de medir potencia acústica a través de la técnica de intensimetría, el ancho de banda. Comentamos anteriormente que se empleaban dos micrófonos con un separador de 12 mm, según las características del equipo y el espaciador empleado, se podrían realizar mediciones con una baja incertidumbre por encima de los 250 Hz. Esto explica los resultados tan disímiles que podemos observar en esta zona del espectro. Por debajo de los 300 Hz, el desfase agregado por el equipo de medición y las dimensiones del separador empleado juegan un papel clave a la hora de buscar precisión en la medida.

Hay una tercera zona de análisis en los espectros de medición, la comprendida entre 250 Hz y 800 Hz. Como se puede observar en ambos motores, los resultados de las mediciones en el taller son algo mayores a los obtenidos en la cámara. Incluso, puede notarse un gran nivel de potencia sonora en el tercio de octava correspondiente a los 315 Hz. Para explicar esto recurriremos a un gráfico comparativo de los niveles de presión sonora de los dos motores de prueba y la fuente parásita.

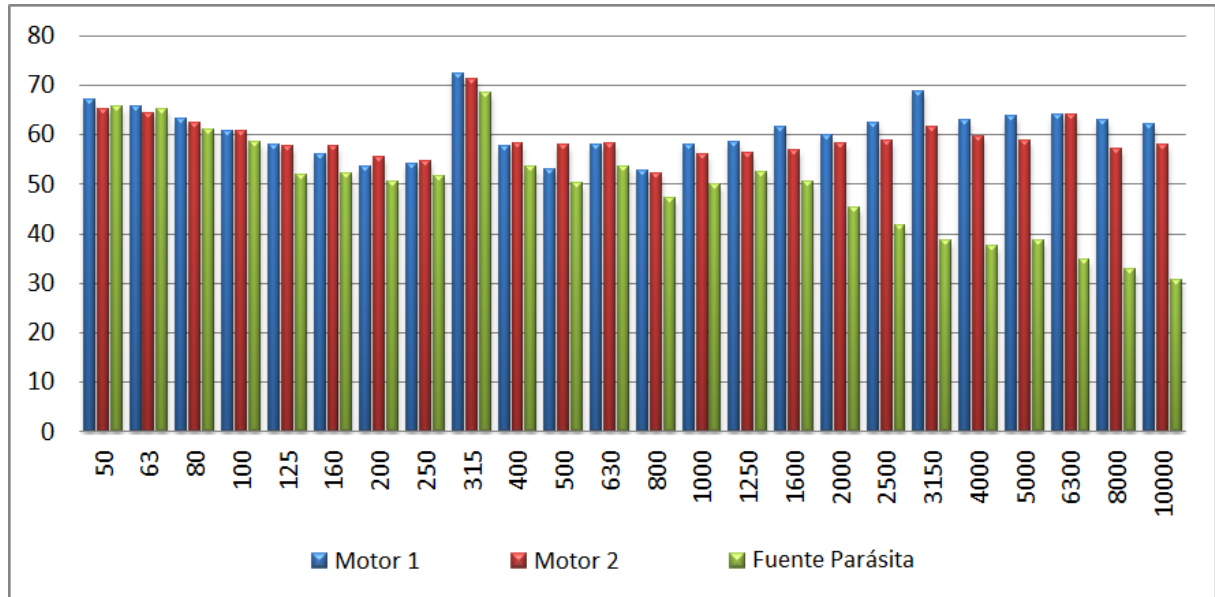


Figura 9: Niveles de presión sonora en un punto de la superficie de medición.

Como se puede observar en esta gráfica, los niveles de presión sonora de los motores y la fuente parásita medidos en un punto de la superficie de medición, difieren en varios decibeles a partir de los 800 Hz en adelante. Sin embargo, por debajo de esta frecuencia, la fuente parásita genera niveles de presión sonora muy cercanos a los que generan los motores bajo ensayo. Aquí es donde reside la explicación a lo que observamos en los gráficos de potencia acústica. El tener una fuente parásita que genera un nivel de ruido similar al de la fuente bajo estudio, la técnica pierde precisión y tiende a sobreestimar los niveles de potencia acústica generados por los motores. La norma ISO 9614:1, indica que si los niveles de presión sonora de las fuentes externas a la superficie de medición son menores en al menos 10 dB a los niveles de presión sonora generados por la fuente bajo ensayo, estas fuentes parásitas no tendrán gran influencia en la medición (Jacobsen, 1992; Herráez, 1996; Montoya et al., 2006).

La siguiente tabla, muestra los niveles globales de potencia acústica calculados en dBA entre los 250 Hz y los 10 kHz.

Potencia Global (250 Hz-10 kHz) [dBA]	Motor 1	Motor 2
En Cámara	74,06	68,90
En Taller	75,32	70,40

Tabla 3: Niveles globales de potencia acústica.

La ISO 9614:1, establece una desviación estándar de 4 dBA para mediciones de un grado de precisión de control, que es el grado de precisión utilizado por este trabajo. Los valores globales de potencia, para los dos motores, arrojan una dispersión muy baja. Puede notarse

que comparando los niveles de potencia de cada motor la medición en uno u otro recinto difieren en alrededor de 1,5 dBA o menos. En ambos casos, los niveles son algo mayores en el taller, esto se debe a la influencia de la fuente parásita que tiende a generar una sobreestimación de la potencia sonora.

Esta incertidumbre menor a 4 dBA, se asegura según la ISO 9614:1 si se cumplen cuatro indicadores que esta define.

El indicador F1, establece parámetros a cerca de la estacionalidad del campo. En nuestro caso obtuvimos resultados positivos para casi todo el espectro, ya que el ruido generado por los motores y por la fuente parásita eran realmente estacionarios. Por supuesto, por debajo de los 160 Hz, el mismo no arrojó resultados positivos ya que al utilizar un separador tan pequeño se comete un gran error en la medición en bajas frecuencias.

El indicador F2 analiza fundamentalmente, que tan adecuado es el equipo que se está utilizando en la medición; busca determinar que el desfase entre los canales de medición sea pequeño y no genere errores importantes. En nuestras mediciones, pudimos comprobar que se satisfacía para todo el espectro en el que medimos, a excepción de la frecuencia de 50 Hz en donde un pequeño desfase es causal de grandes errores. Esto nos lleva a la conclusión de que nuestra limitante para medir en frecuencias menores a los 250 Hz se encuentra en el separador empleado y no en el equipo de medición; por tanto, si utilizáramos un espaciador de mayor tamaño podríamos medir con precisión por debajo de los 250 Hz.

El indicador F3 nos arroja información acerca de cuan reactivo es el campo que estamos midiendo y cuanto afecta esto a la precisión de nuestra medición. En ambos casos, no se satisfacía hasta niveles altos de frecuencia (800 Hz a 1 kHz), sin embargo la medición era correcta en algunas frecuencias en las que este indicador no se satisfacía. Este uno de los indicadores más discutidos de esta norma y ello reside en la naturaleza del mismo, ya que se quiere cuantificar de alguna manera la reactividad de un campo sonoro (Herráez, 1996). Sin embargo existen infinitos campos sonoros, por lo que es imposible establecer una forma de evaluación para todos. Por lo tanto es de esperar que este indicador falle al establecer límites claros de incertidumbre en una medición.

El último de los indicadores es el F4. El mismo evalúa la directividad de la fuente sonora y si los puntos escogidos a lo largo de la superficie de medición son suficientes o si están correctamente distribuidos. En nuestro caso por la alta densidad de puntos de medición no hemos tenido problemas con este indicador, salvo en las frecuencias bajas (menores de 300 Hz). Esto se debe a los errores en la medición provocados por los factores anteriormente mencionados. Es de notar, que al haber cumplido ampliamente con este indicador, podríamos haber tomado menos puntos de medición y haber llegado a resultados igualmente válidos.

4 MAPAS DE DIRECTIVIDAD

En cuanto a los mapas de directividad de intensidad sonora se realizaron a fin de detectar las zonas de mayor nivel de emisión sonora de cada motor, permitiendo compararlos como así también visualizar variaciones que puedan presentarse en las mediciones de intensidad a causa del entorno en el que se encuentran y el accionar de las fuentes parásitas presentes en el lugar.

Para elaborar dichos mapas se partió de los niveles de intensidad relevados para el cálculo de la potencia acústica, describiendo la misma superficie esférica alrededor del motor. Los niveles se interpolaron con el objetivo de tener una mayor densidad de puntos alrededor de la superficie y lograr un mapa de sencilla interpretación. Los mapas se confeccionaron con los niveles de intensidad sonora obtenidos para la banda de tercio de octava de 3150 Hz. Se seleccionó esta banda por ser la de mayor nivel de emisión de intensidad, resultando también representativa del nivel total.

En lo que concierne a los cálculos de interpolación se llevaron a cabo mediante Matlab, utilizándose también para efectuar la representación visual de los mapas.

A continuación se presentan los mapas resultantes del MOTOR 1 en cámara semianecoica (ver Figura 10) y el mismo en el taller de mecánica con la fuente parásita en funcionamiento, ver Figura 11.

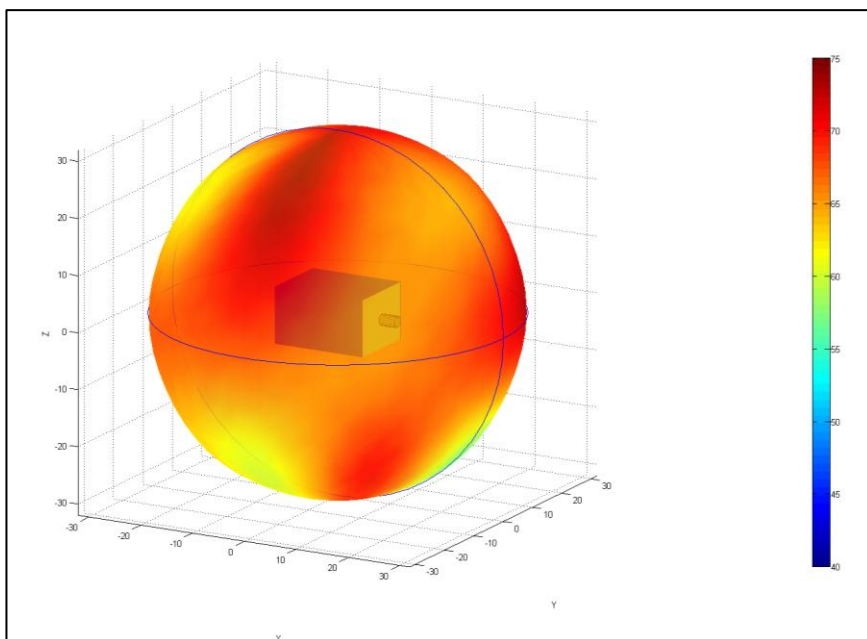


Figura 10: Mapa de directividad del Motor 1 en cámara semianecoica. Escala en dB.

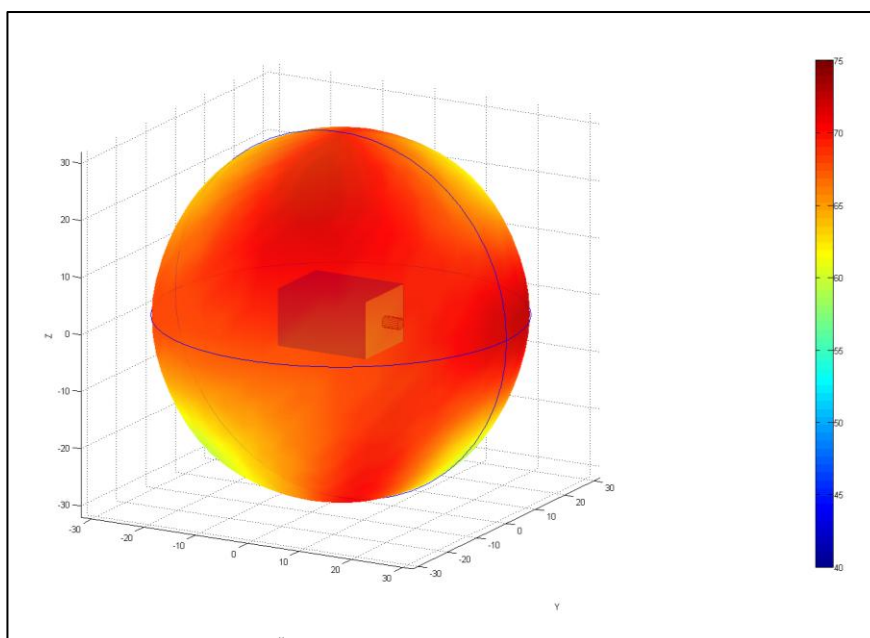


Figura 11: Mapa de directividad del Motor 1 en taller con fuente parásita. Escala en dB.

Con respecto a los mapas resultantes para el MOTOR 2 también se presentan en cámara semianecoica (ver Figura 12) y en el taller de mecánica con fuente parásita (ver Figura 13).

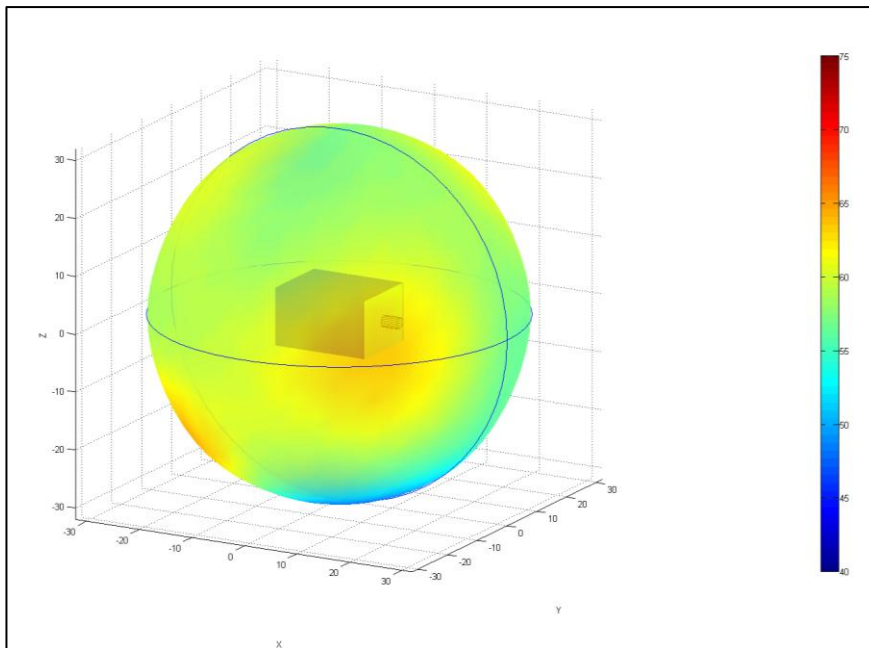


Figura 12: Mapa de directividad del Motor 2 en cámara semianecoica. Escala en dB.

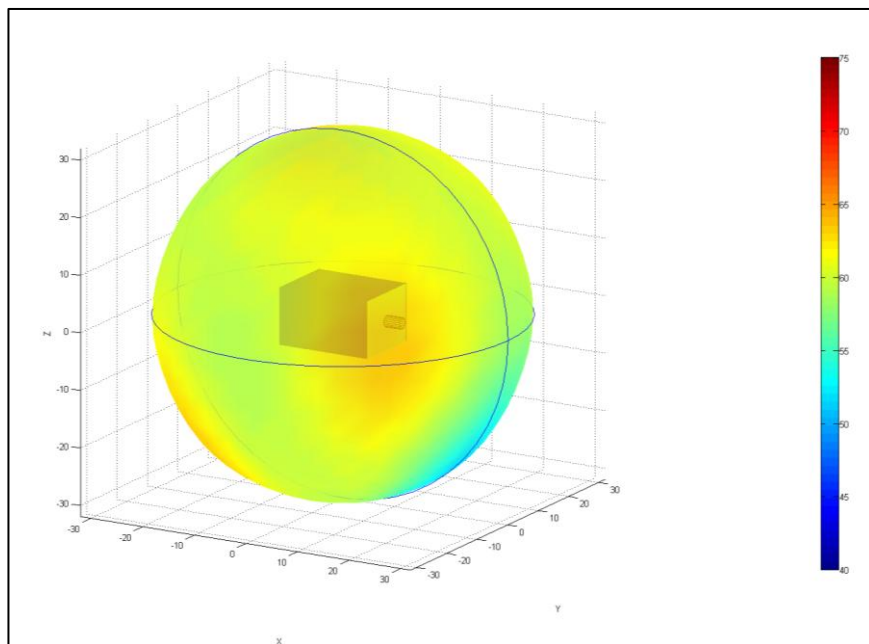


Figura 13: Mapa de directividad del Motor 2 en taller con fuente parásita. Escala en dB.

5 CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados y discusiones planteadas, podemos concluir que:

- Se observa que la potencia acústica del Motor 2 (Welling HXGNL.62) es menor a la del Motor 1 (Nidec U112G40).
- Del análisis de los espectros de potencia sonora, se infiere que por debajo de los 250 Hz, como era de esperar, la medición arroja valores incoherentes. Esto se debe al tamaño del espaciador y la reactividad del recinto que limitan el ancho de banda en el que se puede

realizar una medición con baja incertidumbre. Entre los 250 Hz y los 800 Hz, los niveles de potencia calculados son sobreestimados debido a la influencia de la fuente parásita, que en esas frecuencias genera niveles de presión similares a los niveles producidos por la fuente bajo estudio. Finalmente, por encima de los 800 Hz y hasta los 10 kHz, la técnica arroja valores con escasa dispersión.

- En cuanto a los niveles globales de potencia sonora, calculados entre 250 Hz y 10 kHz, se puede apreciar que los valores son similares; siendo mayores cuando está presente la fuente parásita, debido a la sobreestimación de potencia (entre 250 Hz y 800 Hz) planteada en el punto anterior.
- Es importante destacar, la facilidad con que se obtiene la potencia acústica *in situ* a través del uso de la técnica de intensimetría sonora, sin la necesidad de contar con cámaras especialmente tratadas. Así mismo, se verifica la posibilidad de medir potencia acústica en presencia de otras fuentes de ruido espurias funcionando en el lugar, siempre que el nivel de presión sonora de éstas, sea varios decibeles menor que los generados por la fuente bajo estudio.
- El haber desarrollado un Sistema de Mediciones Esféricas (SME) otorgó mucha simplicidad en la etapa de medición, agregando también mayor precisión y repetibilidad en la determinación de los puntos a relevar en la superficie de medición.
- A partir de los mapas de directividad se obtiene una importante información de la distribución de emisión del ruido para desarrollar un óptimo control del mismo.
- Al contrastar los mapas de directividad de un mismo motor, obtenidos en la cámara semianecoica y en taller con fuente parásita, no se observan diferencias importantes entre ambos, por lo que la técnica de intensimetría sonora permite obtener la directividad en ambientes razonablemente ruidosos.
- En cuanto a la comparación entre los dos motores se puede apreciar que el Motor 1 posee niveles de intensidad sonora más altos, como así también presenta zonas de emisiones más definidas, mientras que el Motor 2 posee una distribución más uniforme de niveles.

REFERENCIAS

- Fahy, F.J. *Sound Intensity*. Second edition. E & FN Spon, 1995.
- Fahy, F.J. *Foundations of Engineering Acoustics*. First edition. Elsevier Applied Science, pp. 96-139, 2001.
- Gade, S. *Sound Intensity: Theory. Instrumentation and applications, Parts 1 and 2. Technical review. Bruel&Kjaer*. 1982.
- Harris, C. *Handbook of acoustical measurements and noise control*. Acoustical Society of America. United States of America. 1999.
- Herráez, M. Estudio experimental de los parámetros que afectan a la estimación de potencia sonora por el método de intensidad. Tesis Doctoral. *Universidad de Valladolid, España*. 1996.
- ISO 9614-1, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points*, 1993.
- Jacobsen, F. Sound power determination using the intensity technique in the presence of diffuse background noise. *Journal of Sound and Vibration*. 159, pp. 353-371, 1992.
- Jacobsen, F. A note on finite difference estimation of acoustic particle velocity. *Journal of Sound and Vibration*, 256, pp. 849-859, 2002.

- Jacobsen, F. Sound intensity and its measurement and applications. *Technical University of Denmark*. 2011.
- Munuera, G. Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Cartagena, España*. 2008.
- Pérez, J.; Serra, M. Medición de inmisión sonora con cabeza artificial utilizando la técnica de intensimetría. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, pp 38-45, 2007.
- Montoya, A., Rolón S. Determinación de niveles de potencia sonora con altos niveles de interferencia utilizando intensimetría acústica. Tesis de Posgrado. *Universidad Tecnológica de Chile*. 2006.