

POTENCIA ACÚSTICA DE MOTOCICLETAS A PARTIR DE MEDICIONES DE INTENSIDAD SONORA

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

^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 motocicletas, ISO 9614-1.

Resumen. Actualmente en el ámbito nacional, los ruidos generados por motocicletas con escapes modificados contribuyen de manera importante en la contaminación sonora de sectores urbanos. En este estudio se utiliza la técnica de intensimetría sonora a través de la norma ISO 9614-1, para el cálculo de la potencia acústica de una motocicleta con sistema de escape original y con sistema modificado. Los ensayos se llevaron a cabo a distintas revoluciones del motor y en condiciones estáticas.

1 INTRODUCCIÓN

Conocer los niveles de intensidad sonora que emite una fuente sonora, es una excelente manera de caracterizarla, ya que ésta magnitud depende exclusivamente de la potencia acústica emitida por dicha fuente (Harris, 1999; Jacobsen, 2011); y no de las condiciones del medio como es el caso de los niveles de presión sonora. Cuando se quiere conocer los niveles de potencia acústica emitidos por una fuente, usar intensimetría (técnica de análisis y medición de la intensidad sonora) para dicho fin tiene grandes ventajas.

En los últimos años, se ha popularizado el uso de motocicletas como medio de transporte, sobre todo en las grandes ciudades. Bajos costos de adquisición y mantenimiento, gran poder de maniobrabilidad en la ciudad, la posibilidad de estacionar prácticamente en cualquier lado, e incluso la confusa idea de que son más fáciles de conducir que otros vehículos, son algunas de las ventajas que han impulsado un fuerte crecimiento en la cantidad que vemos a diario en las calles. De manera frecuente se puede observar también que el propietario de la motocicleta, ha reemplazado el sistema de escape original por uno de competición. Esto hace que pequeñas motocicletas (de baja potencia y cilindrada) sean grandes emisoras de ruido, convirtiéndolas en una de las principales responsables de la contaminación sonora en las ciudades.

En el presente estudio se plantea el proceso de cálculo de la potencia acústica mediante la técnica de puntos discretos, como lo establece la ISO 9614-1, y se busca aclarar el uso y significado de los indicadores de campo mencionados en esta norma. Se utiliza como fuente de estudio, una motocicleta de 110 cc. y se determinan los niveles de potencia acústica que emite con el sistema de escape original y los niveles de emisión con sistema de escape modificado.

2 FUNDAMENTOS DEL USO DE INTENSIMETRÍA SONORA PARA ESTIMAR NIVELES DE POTENCIA ACÚSTICA

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 de estudio en dicho punto. 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 . Como puede deducirse fácilmente, si no existe flujo neto de energía en un punto entonces la intensidad sonora será nula.

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:

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

Es decir, si se conoce la intensidad sonora a lo largo de una superficie que encierre la fuente bajo estudio, es posible calcular la potencia acústica que emite dicha fuente.

La International Organization for Standardization (ISO) establece dos métodos para calcular la potencia acústica emitida por una fuente sonora mediante la medición de la intensidad sonora, presentes en la norma ISO 9614, en sus partes 1 y 2. El primero consiste en

la medición de la intensidad sonora promedio en un número discreto de puntos, y luego, un promediado espacial entre las distintas posiciones. El segundo, denominado método del barrido, consiste en realizar un promedio temporal y espacial simultáneamente mientras se barre toda la superficie envolvente con la sonda de medición.

En el presente estudio se ha empleado el método de medición mediante puntos discretos. Para dicho método, la ISO 9614-1, define la potencia acústica parcial como:

$$W_i = I_{ni} \cdot S_i \quad (3)$$

En donde, I_{ni} es la componente normal, con su signo, de la intensidad sonora en la posición i sobre la superficie de medida, y, S_i es el área del elemento de superficie asociado con el punto i .

Luego la potencia acústica total emitida por la fuente será la sumatoria de todas las potencias acústicas parciales (ISO 9614-1; Norton et al., 2003):

$$W = \sum_{i=0}^N W_i = \sum_{i=0}^N I_{ni} \cdot S_i \quad (4)$$

Que no es más que la Ec. (2) en su forma discreta.

Luego el nivel de potencia acústica será:

$$L_W[dB] = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) = 10 \cdot \log\sum_{i=0}^N \left(\frac{W_i}{W_0}\right) \quad (5)$$

Recordando que W_0 es la potencia acústica de referencia ($10^{-12}W/m^2$).

2.2 Fuentes de Error

Como se observó en el apartado anterior, para calcular la potencia acústica emitida por una fuente, es necesario conocer los niveles de intensidad sonora sobre una superficie que encierre dicha fuente.

Ahora bien, como definen diferentes autores (Fahy, 1995; Jacobsen, 1992 y 2011, Pérez et al., 2012), la intensidad sonora en un punto, puede calcularse como el producto de la presión sonora y la velocidad de las partículas en dicho punto. Por lo que, la intensidad sonora promedio en una dirección r dada, será:

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

Por lo tanto, 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. El segundo, se basa en que, conociendo la diferencia de presiones sonoras entre dos micrófonos y la distancia que los separa, se puede determinar una aproximación de la velocidad de las partículas y de la presión sonora media en el centro de los transductores (Morse et al. 1992; Norton et al., 2003), en este caso hablamos de una sonda p-p.

En el presente estudio se ha empleado una sonda p-p. Este tipo de sondas son las más utilizadas, por su simplicidad y robustez. Sin embargo, existen varias fuentes de error en la medición de la intensidad sonora asociadas al uso de la misma. 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. Por un lado, existen errores debido a la aproximación por diferencias finitas, 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. Según Fahy (1995) y 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. Por otro lado, si los micrófonos no son lo suficientemente pequeños con respecto a la distancia que los separa, aparecerán errores por difracción debidos a la perturbación que genera la sonda en el campo sonoro. Sin embargo, como se comenta en diferentes trabajos (Jacobsen, 1992 y 2011; Pérez et al., 2007 y 2012; Munuera, 2008) en ciertas condiciones esto puede ser favorable, ya que 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. Finalmente, la mayor fuente de error, depende de la diferencia de fase entre canales, aún con los mejores equipamientos disponibles en la actualidad (Pérez et al., 2012). 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. Además, estos límites no dependen exclusivamente del equipo de medición sino que además son función del campo acústico bajo estudio.

Como puede deducirse, para alta frecuencia predominan las dos primeras fuentes de error mencionadas, reducir estos errores supondría la reducción del tamaño del espaciador y de los micrófonos empleados. Sin embargo, en baja frecuencia es notorio el error que introduce el desfase entre los canales del equipo de medición, para minimizar estos efectos habría que emplear un espaciador de mayor tamaño. Entonces, se debe optar por una solución de compromiso a la hora de elegir el tamaño del espaciador según qué ancho de banda sea de interés. En la Figura 1 se muestra el ancho de banda válido para la medición de intensidad sonora teniendo en cuenta el tamaño del espaciador y de los micrófonos empleados. Se tuvieron en cuenta tamaños comerciales únicamente.

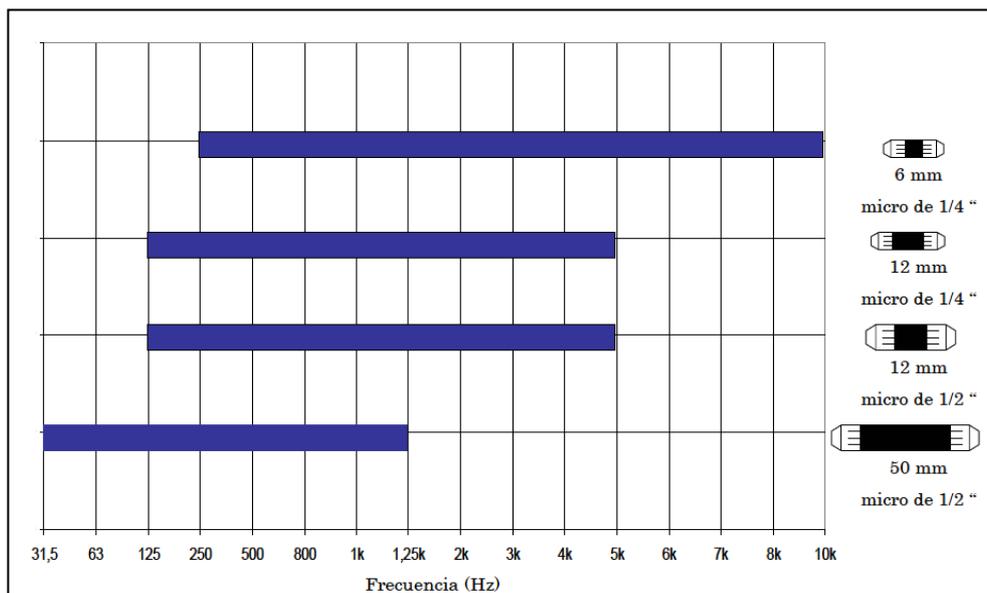


Figura 1: Ancho de banda teórico según el tamaño del espaciador usado.

3 MEDICIONES DE INTENSIDAD SONORA EMITIDA POR LA MOTOCICLETA

Las mediciones se llevaron a cabo en ambiente exterior; sobre piso de concreto, considerado como superficie altamente reflectiva. Las paredes o superficies reflectivas laterales más próximas se encontraban a más de 15 metros, por lo que se supone un campo sonoro con muy baja reverberación.

Se ha empleado el siguiente instrumental: analizador de doble canal B&K 2145, sonda p-p en configuración frontal B&K 3584 con micrófonos B&K 4197, y calibrador B&K 3541. El espaciador empleado entre los dos micrófonos es de 50 mm, lo que nos permite trabajar en un ancho de banda teórico de 31,5 Hz a 1250 Hz.

La motocicleta bajo ensayo (APPIA 110 cc. CitiPlus) posee motor mono-cilíndrico de 107cc., trabaja en ciclo Otto y logra una potencia máxima de 4,8 kW a 8000 revoluciones por minuto (rpm).

Se realizó una serie de tres mediciones (en condiciones estáticas) a 1400 rpm, 4300 rpm y 5200 rpm, respectivamente, con el sistema de escape original de la motocicleta. Luego, se procedió a realizar otra serie de mediciones como la anterior, pero esta vez con un sistema de escape modificado; del tipo de los que se utilizan en circuitos de competición pero que son de venta libre al público.

Para llevar a cabo el proceso de medición, se desarrolló *ad hoc* una estructura paralelepípeda (Sistema de Medición Rectangular, SMR), la cual permite ajustar el tamaño de la superficie virtual a las necesidades de la medición.

Para un primer ensayo de prueba las medidas del SMR eran 2,4 m de largo, 1,5 m de ancho y 1,5 m de alto. Considerando que las medidas de la motocicleta son 1,88 m x 0,69 m x 1,11 m, se puede observar con claridad que la superficie escogida es sustancialmente mayor (sobre todo en ancho y alto).

Usar un volumen mucho más grande que el objeto de ensayo tiene sus ventajas, pero también sus contras. Cuanto mayor sea el volumen, la superficie será más grande también y los puntos de medición estarán más alejados unos de otros y guardarán mayor distancia con la superficie del objeto bajo ensayo. Situar los puntos de medición a una distancia muy próxima a la superficie del objeto aumenta la relación señal-ruido, ya que prevalece el ruido emitido por la fuente ensayada y no los de fuentes externas al estudio. Sin embargo, se corre el riesgo de entrar en el campo cercano a la fuente, el cual es muy difuso debido a la interacción entre el sólido y el fluido. Dado que la intensidad disminuye con la distancia, alejar demasiado los puntos de medición disminuye la relación señal-ruido y las fuentes parásitas comienzan a prevalecer por sobre la fuente bajo ensayo. Por consiguiente, y como destaca [Montoya et al, \(2006\)](#), existe una superficie de medición de potencia sonora óptima (lo que se traduce en distancias de medición óptimas) que permite una medición de intensidad representativa y los más precisa posible dada la interacción de fuentes coherentes, incoherentes, y los efectos combinados de campos sonoros cercanos y lejanos.

Los primeros resultados demostraron que la superficie virtual escogida no era la mejor. Debido a su amplio tamaño, los puntos de medición mantenían una gran distancia con la superficie del objeto y la influencia de las fuentes parásitas era muy evidente, sobre todo en la zona frontal de la motocicleta en donde los niveles de emisión son muy bajos y se vuelven comparables con los niveles de fuentes externas. Por tal motivo se decidió reducir el tamaño de la superficie virtual, de modo que los puntos de medición estén más cercanos a la superficie de la motocicleta. Se ajustó el SMR, a 2,2 m x 0,92 m x 1,08 m de modo de acercar lo suficiente los puntos de medición, pero evitar estar muy cerca de los campos altamente difusos generados por el sistema de escape, motor y las vibraciones de los mismos.

Las caras laterales del SMR se dividieron cada una en 8 segmentos de 0,297 m² de sección.

La cara frontal conformó dos segmentos de $0,497 \text{ m}^2$, mientras que la posterior, cuatro segmentos de $0,248 \text{ m}^2$. Por último, la cara superior se fraccionó en cuatro segmentos de $0,506 \text{ m}^2$. De esta manera se distribuyeron 26 puntos de medición sobre toda la superficie virtual de forma que en la zona posterior y lateral de la motocicleta (donde se encuentran la salida del sistema de escape y el motor) haya una mayor densidad de puntos que en la zona frontal de la misma, donde la emisión es sustancialmente menor. Cabe recordar, que debido a que la medición se realizó sobre una superficie altamente reflectiva, no es necesario llevar a cabo mediciones en la cara inferior del SMR (Sandberg et al, 2009; Fahy et al, 2004).

Se debería obtener un espectro en donde predominen las frecuencias bajas, por ello se escogió el espaciador de 50 mm, de modo que mantenga alguna relación con la velocidad a la que gira el motor.

4 RESULTADOS DE POTENCIA ACUSTICA A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

4.1 Análisis espectral a diferentes revoluciones del motor con sistema de escape original

A partir de las mediciones realizadas a 1400 rpm, 4300 rpm y 5200 rpm, con el sistema de escape original se obtuvieron los siguientes niveles de potencia acústica.

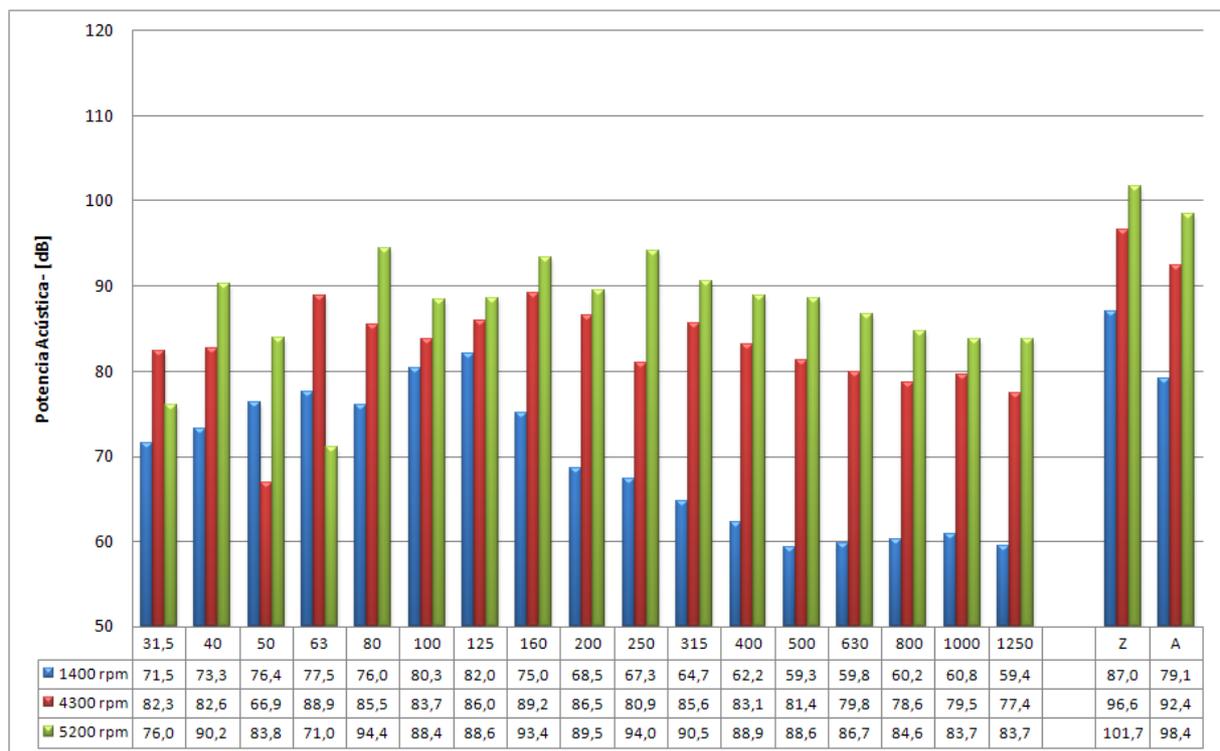


Figura 2: Niveles de potencia acústica para diferentes rpm del motor con sistema de escape original, en dB.

Como puede observarse, a 1400 rpm, prevalece la emisión en baja frecuencia, con un pico máximo en 125 Hz. Cuando el motor gira a dicha velocidad, se podría estimar que la frecuencia fundamental de la emisión sería de 23,3 Hz, luego los armónicos serían 47 Hz, 70 Hz, 93 Hz, 117 Hz, 140 Hz, etc. El análisis por tercio de octava no permite ver estos armónicos con una gran claridad ya que la distancia espectral entre ellos es muy pequeña. Sin embargo, es bueno conocer que cuando una motocicleta mantiene su motor a ralentí, la mayor emisión de potencia acústica se da por debajo de 200 Hz.

Cuando el motor mantiene una velocidad de 4300 rpm, la frecuencia fundamental de

emisión sonora sería 71,6 Hz, luego sus armónicos son 143 Hz, 215 Hz, 287 Hz, 358 Hz, 430 Hz, etc. En la **Figura 2** puede observarse picos de emisión acústica en la banda de 63 Hz, 160 Hz, 200 Hz y 315 Hz, exactamente en las bandas en la que se encontrarían la frecuencia fundamental correspondiente a 4300 rpm y sus armónicos.

En la tercera medición, con el motor girando a una velocidad promedio de 5200 rpm, la frecuencia fundamental se sitúa en 86,6 Hz, y sus armónicas en 173 Hz, 260 Hz, 346 Hz, 433 Hz, 520 Hz, etc. En el espectro se pueden observar picos en 80 Hz, 160 Hz y 250 Hz justo donde se sitúan la frecuencia fundamental de emisión y los primeros dos armónicos. Además se nota una fuerte emisión en las bandas siguientes debido al aporte de los armónicos restantes.

Obsérvese, que en los espectros correspondientes a 4300 rpm y 5200 rpm la presencia de componentes por encima de los 400 Hz es mucho más fuerte que cuando el motor gira a 1400 rpm. Esto se debe a que, cuando el motor rota rápidamente, además de que los armónicos son más altos en frecuencia, aumenta considerablemente las vibraciones de la motocicleta en su conjunto. Esto hace que entren en resonancia los materiales, en su mayoría plásticos, que conforman la carrocería y funcionen como emisores secundarios de ruido. Esto se comprobó mediante el análisis de directividad de la emisión de ruido. A frecuencias bajas, los niveles máximos de intensidad sonora se registraron en la zona del sistema de escape y motor. Mientras que para frecuencias más elevadas, se puede observar que, si bien sigue habiendo una fuerte contribución de ruido proveniente del sistema de escape y motor, aumentan considerablemente los niveles de emisión en la zona frontal y superior de la motocicleta, donde se encuentra el manubrio.

4.2 Análisis espectral a diferentes rpm con sistema de escape modificado

A partir de las mediciones realizadas a 1400 rpm, 4300 rpm y 5200 rpm, con el sistema de escape modificado se obtuvieron los siguientes niveles de potencia acústica.

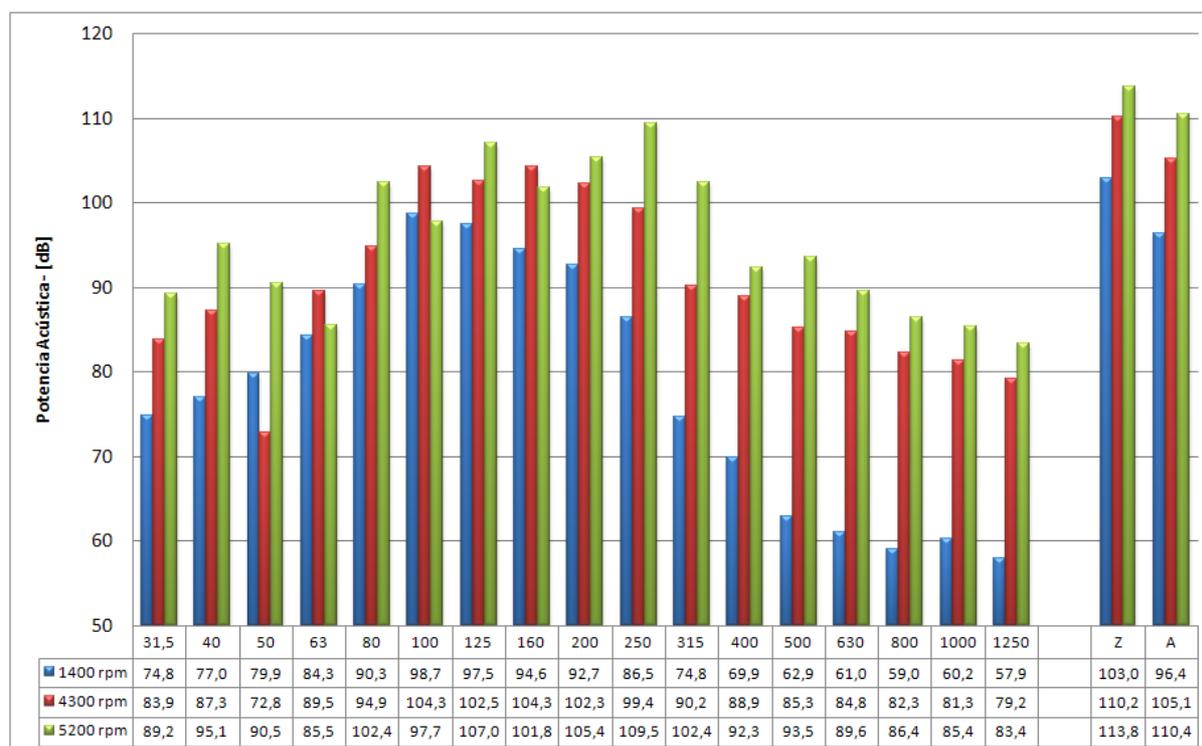


Figura 3: Niveles de potencia acústica para diferentes rpm del motor con sistema de escape modificado, en dB.

En estos espectros, puede notarse que, si bien siguen una distribución espectral semejante a cuando la motocicleta funcionaba con el sistema de escape original, con el sistema modificado de escape se resaltan aún más las bandas comprendidas entre 63 Hz y 250 Hz. Esta coloración es propia del sistema de escape utilizado y depende de las características constructivas del mismo.

En las frecuencias más altas, al igual que con el sistema de escape original, a bajas rpm la emisión es muy baja. Sin embargo, al aumentar la velocidad del motor y con ello las vibraciones de la motocicleta, vuelven a aparecer las componentes emitidas por la vibración de la carrocería.

4.3 Comparativo entre los sistemas de escape original y modificado a mismas rpm

A fines de comparar la emisión generada por uno u otro sistema de escape se presenta en la Figura 4 una gráfica que muestra los espectros propios de la potencia acústica emitida con sistema de escape original y modificado cuando el motor funciona a ralentí, o sea, a 1400 rpm.

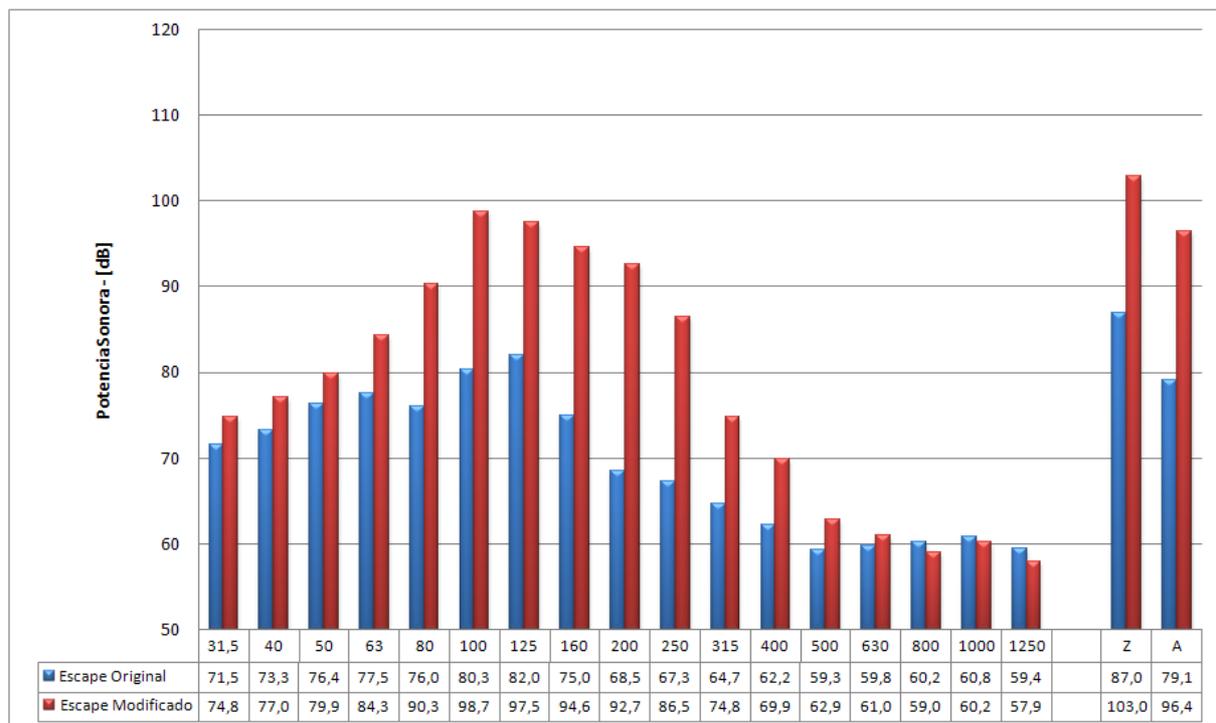


Figura 4: Niveles de potencia acústica con sistema de escape original y modificado para 1400 rpm, en dB.

En esta gráfica comparativa, se puede observar que, como mencionamos anteriormente, aparecen las componentes que se corresponden con la frecuencia de giro del motor y sus armónicos. Sin embargo, cuando se utiliza un sistema de escape modificado, el espectro de emisión se ve modificado por la función de transferencia acústica propia de ese sistema. Esta variación del espectro se hace notoria no sólo en la aparición de nuevas componentes espectrales, sino además en los niveles de las mismas. Obsérvese que, en las bandas de 100 Hz o 125 Hz en las que se encuentra el máximo de ambos espectros, la diferencia del nivel de las bandas puede llegar a ser de más de 15 dB.

Por otro lado, en frecuencias superiores, los espectros son muy parecidos y no varían en nivel, esto ratifica lo mencionado anteriormente cuando se dijo que las componentes que aparecen en alta frecuencia se deben en gran medida a la vibración de la carrocería y no a la

emisión propia del sistema de escape y motor.

4.4 Comparativo de valores globales

Es de mucha utilidad conocer, además, los niveles globales de potencia sonora que resultaron de las mediciones realizadas. En la [Tabla 1](#) se muestran los niveles globales lineales, mientras que en la [Tabla 2](#) se presentan dichos niveles bajo ponderación A.

Velocidad del Motor	Sist. de Esc. Original	Sist. de Esc. Modificado
1400 rpm	87,0	103,0
4300 rpm	96,6	110,2
5200 rpm	101,7	113,8

Tabla 1: Niveles globales de potencia acústica, ponderación lineal [dB]

Velocidad del Motor	Sist. de Esc. Original	Sist. de Esc. Modificado
1400 rpm	79,1	96,4
4300 rpm	92,4	105,1
5200 rpm	98,4	110,4

Tabla 2: Niveles globales de potencia acústica, ponderación A [dBA]

Como era de esperarse, tanto con el sistema de escape original como con el modificado, los niveles de potencia acústica aumentan con el crecimiento de la velocidad de giro del motor.

Para alta velocidad de giro de motor, en donde la emisión de ruido depende del sistema de escape y motor y también de la vibración de la motocicleta, la diferencia entre un sistema y otro es de al menos 12 dB, tanto para niveles lineales como para niveles ponderados A. Mientras que a bajas rpm del motor, en donde la vibración de la motocicleta es mínima y la emisión de ruido depende principalmente del sistema de escape y motor, la diferencia entre un sistema y otro se eleva a 16 dB en ponderación lineal y a 17 dB en ponderación A.

La [Tabla 3](#), muestra la velocidad a la que se desplazaría la motocicleta para las velocidades de giro del motor que se han usado en este estudio, de acuerdo a la marcha a la que se esté circulando. Cabe destacar que a 1400 rpm el motor funciona a ralentí, por lo que no es posible calcular velocidad alguna.

Velocidad del Motor	3° Marcha	4° Marcha
4300 rpm	31 km/h	40 km/h
5200 rpm	37 km/h	50 km/h

Tabla 3: Velocidades correspondientes con rpm del motor para 3° y 4° marcha.

Como puede observarse, las velocidades de giro del motor escogidas, no son caprichosas, sino que tienen relación con las velocidades a las que circulan los motociclistas en la ciudad.

5 ESTUDIO DE LOS INDICADORES DE CAMPO

En la norma [ISO 9614-1](#) se establecen cuatro indicadores de campo que determinarán si la medición cumple con ciertos grados de precisión.

En este estudio se escogió el grado tres de precisión, denominado grado de control. Si los cuatro indicadores se cumplen, la norma asegura que la medición tendrá una desviación

estándar de 4 dB para niveles globales ponderados A.

Cada uno de los cuatro indicadores, si es bien interpretado, arrojará información a cerca de la fuente de error que influye para que esa medición tenga una incertidumbre mayor a la esperada.

5.1 Indicador F_1 , comprobación de la estacionalidad del campo

Uno de los requisitos fundamentales para poder hacer el cálculo de potencia acústica según la ISO 9614-1, es que la fuente sonora a medir genere un campo sonoro estacionario que varíe lo menos posible en el tiempo. Obviamente, ante la presencia de ruido de fondo o fuentes externas a la medición, estos campos sonoros también deben ser estacionarios.

Mediante el indicador F_1 , se evalúa cuán estacionario es el campo sonoro en el que se va a medir. Es preciso tener presente que este campo sonoro, está compuesto por el campo sonoro generado por la fuente bajo ensayo, así como también por el ruido de fondo y fuentes externas al ensayo.

Para la evaluación del indicador F_1 , la norma propone hacer una serie de diez mediciones cortas (de entre 8 s a 12 s) en un punto de medición. Luego, se define a este indicador como el cociente entre la desviación estándar y el valor de intensidad sonora promedio de los espectros obtenidos. Es decir:

$$F_1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (7)$$

El criterio de evaluación es $F_1 < 0,67$. Esto aseguraría una variación máxima posible de la intensidad de 2 dB. Este límite es igual para todas las bandas de frecuencia cualquiera sea el grado de precisión con el que se trabaje.

La norma es bastante ambigua con este indicador, ya que, si bien recomienda una cantidad de mediciones y un tiempo aproximado de promediación, no es clara y deja esto a libre albedrío. Lo mismo sucede cuando menciona de hacer la serie de mediciones en algún punto de la superficie virtual. Según Herráez (1996), habría que elegir la posición más desfavorable (o sea, la más afectada por la presencia de fuentes externas) y cuanto menor sea el tiempo de promediado se hace un mejor seguimiento de la historia temporal del campo sonoro. Propone incluso, tomar unas 100 muestras de 2 s.

En este estudio, se siguieron las recomendaciones de la ISO 9614-1 y se tomaron diez muestras de 12 s en uno de los puntos de medición. En la Figura 5, se puede observar el resultado del indicador F_1 para cada una de las mediciones realizadas.

Como se puede apreciar, las mediciones que se realizaron con el sistema de escape original, no cumplen en todas las bandas de frecuencia por debajo de los 80 Hz con este criterio. Hecho que puede deberse a que el campo sonoro generado por la motocicleta no sea estacionario, o que, el ruido de fondo no sea estacionario y tenga un nivel elevado en comparación con el primero. La ISO 9614-1 define que para que una fuente externa no tenga influencia sobre un punto de medición, los niveles de presión sonora, en ese punto, medidos con la fuente bajo ensayo encendida deben ser al menos 10 dB mayores que el ruido generado por la fuente parásita.

A 5200 rpm, cuando los niveles de emisión de la motocicleta son muy elevados, se cumple el criterio para casi todas las bandas con excepción de la de 63 Hz, lo que indicaría que la motocicleta generaría un campo sonoro estacionario. Entonces, se puede deducir que la fuente de error que está limitando la precisión de la medición es el ruido de fondo, que no es estacionario. Cuando los niveles de emisión de la motocicleta son muy altos, y logran enmascarar el ruido de fondo, se cumple sin mayores inconvenientes el criterio de evaluación

de campo estacionario, como es el caso cuando se mide con el sistema de escape modificado.

La gran desventaja que presenta este criterio de evaluación reside en que se requiere hacer una serie de mediciones extras, que no tiene nada que ver con las mediciones para el cálculo de potencia. Además, esa serie de mediciones, se realizan antes o después de las mediciones para calcular potencia acústica, por lo tanto no es posible conocer si hubo alguna variación transitoria del campo sonoro mientras se realizaba la medición.

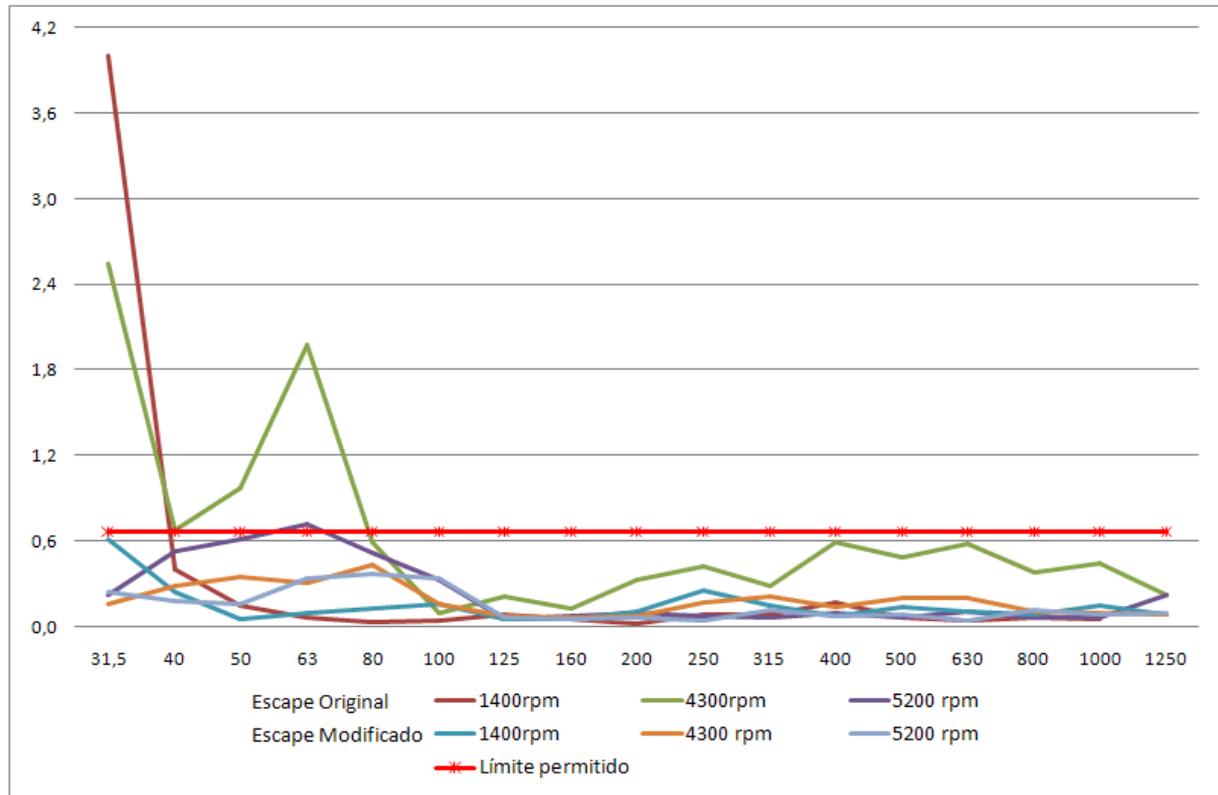


Figura 5: Variación del indicador F_1 de las mediciones realizadas para cada banda de frecuencia.

5.2 Indicador F_2 , comprobación de la adecuación del equipo de medida

Una de las fuentes de error con mayor importancia, sobre todo en frecuencias bajas, como se mencionó anteriormente, es el desfase de la señal eléctrica entre los canales de la cadena de medición. Es de suma importancia que dicho desfase, sea mucho menor que el desfase existente entre la presión sonora y la velocidad de la partículas en el punto de medición. Ambos desfases son función de la frecuencia, y deben ser evaluados para cada banda espectral individualmente.

En el proceso de calibración, se puede obtener un índice, conocido como índice de presión-intensidad residual, δ_{pI_0} , haciendo la diferencia entre el nivel de presión sonora y la intensidad residual. Dicho índice brinda información acerca del desfase propio del equipo de medida. La norma IEC 1043, contiene las especificaciones de cómo debe realizarse el proceso de calibración y de acuerdo a los requisitos exigidos clasifica los equipos como clase 1 o 2. Para el grado de control, es suficiente con un equipo clase 2.

Cuando ya se tiene en claro el nivel de precisión con el que se desea trabajar, es posible definir la capacidad dinámica, L_d , como:

$$L_d = \delta_{pI_0} - K \quad (8)$$

El coeficiente K , variará de acuerdo al grado de precisión que se desee obtener, para el grado de control $K = 7$.

Para el método de puntos discretos, se define como magnitud asociada al desfase del campo en una posición el índice presión-intensidad, δ_{pI} , que como en el caso anterior, es la diferencia entre el nivel de presión y intensidad sonora, considerando sólo el valor absoluto de la misma. O sea:

$$\delta_{pI} = L_p - L_{|I|} \quad (9)$$

La ISO 9614-1 define el indicador F_2 como la diferencia del promedio espacial de los niveles de presión sonora obtenidos en cada punto de medición y el promedio espacial de los niveles de intensidad sonora, sin tener en cuenta el signo de la misma.

$$F_2 = \overline{L_p} - \overline{L_{|I|}} \quad (10)$$

Para considerar que el equipo de medición es apto es necesario que $F_2 < L_d$.

En las mediciones realizadas en este estudio, este criterio se cumplió para todas las mediciones en todas las bandas de frecuencia.

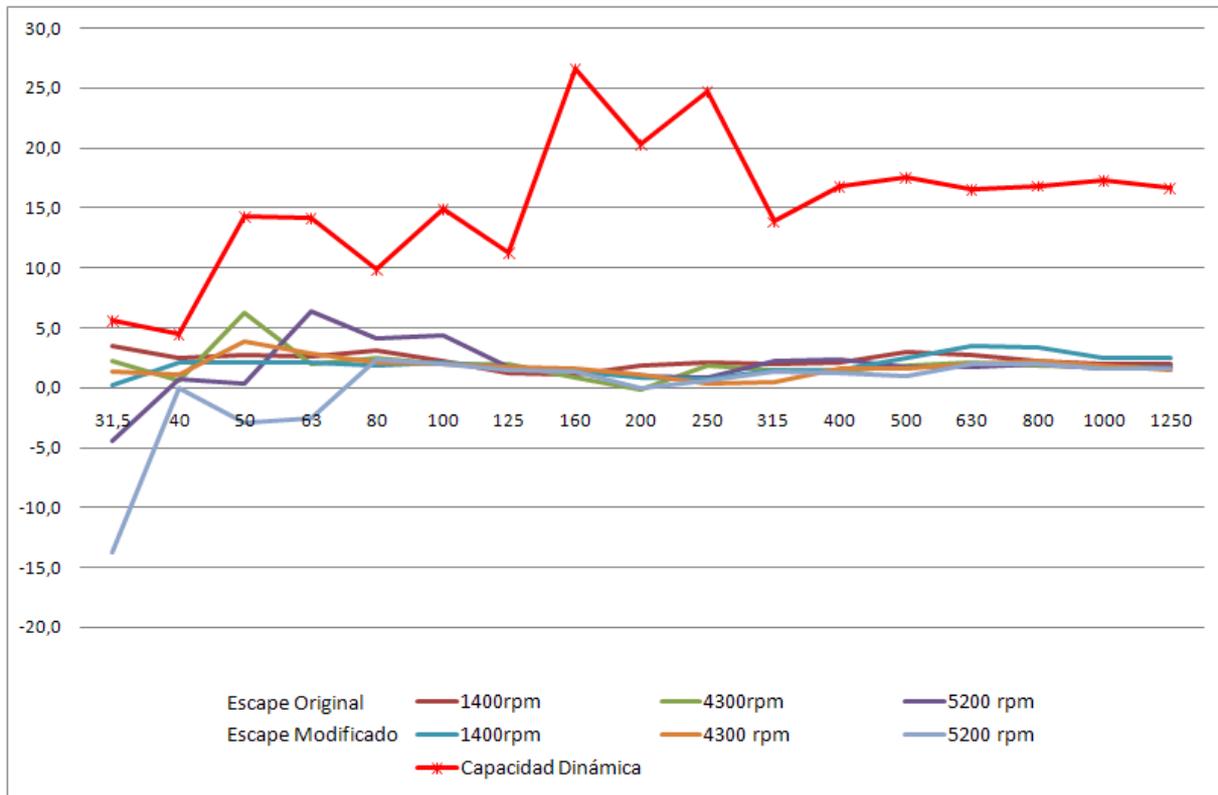


Figura 6: Variación del indicador F_2 , en dB, de las mediciones realizadas para cada banda de frecuencia.

En caso de no cumplirse este criterio, son diversas las medidas que deben tomarse. Simplificando, se puede decir que, si el ruido de fondo es elevado, una posible solución es reducir la distancia de los puntos de medición con respecto a la fuente bajo ensayo, o sea, se debe escoger una superficie de menor tamaño. Por el contrario, si no existe una fuerte presencia de ruido de fondo, se debe considerar una superficie virtual mayor.

Como se puede apreciar, la comprobación de este criterio es realmente simple y no necesita mayores detalles. Sólo resta por decir, que muchos resultados experimentales posteriores a la aprobación de la ISO 9614-1, sugieren que es preferible utilizar la definición

del indicador con signo F_3 (Fahy, 1997; Herráez, 1999).

5.3 Indicador F_3 , comprobación de la influencia de ruido de fondo

Para detectar la presencia de ruido de fondo considerable, se define el indicador de potencia parcial negativa, F_3 . Éste, tiene la misma definición que el indicador F_2 , sólo que en este caso se considerará el signo de la intensidad sonora.

$$F_3 = \overline{L_p} - \overline{L_l} \quad (11)$$

Luego se evaluará la diferencia entre F_3 y F_2 :

$$F_3 - F_2 = \overline{L_{|l|}} - \overline{L_l} \quad (12)$$

Es decir, se evalúa la diferencia entre la intensidad sonora con signo y sin signo. Obsérvese, que si en todos los puntos se mide intensidad sonora positiva (o sea, flujo neto de energía desde la fuente), F_3 y F_2 son iguales y la diferencia entre ellos es cero. En cambio, si en algún punto se registra intensidad sonora negativa, o sea flujo neto de energía hacia la fuente, el indicador F_3 será mayor que el indicador F_2 . Esa energía hacia la fuente da cuenta de la existencia de ruido de fondo. Cuanto mayor sea la diferencia entre F_3 y F_2 , mayor será la presencia del ruido de fondo.

La ISO 9614-1, define como límite para esta diferencia 3 dB, para todas las bandas de frecuencia sin importar el grado de precisión con el que se trabaje. Esto aseguraría, que el ruido de fondo existente no tiene gran influencia en la medición de la intensidad.

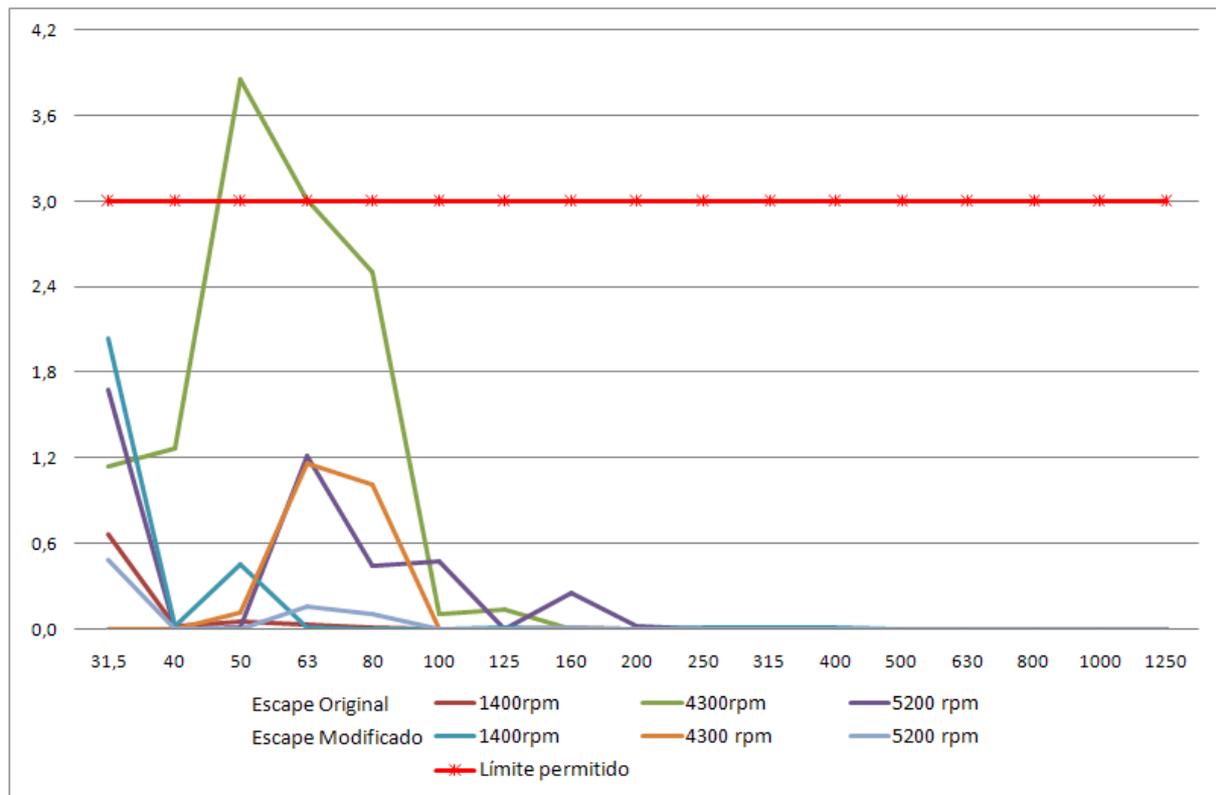


Figura 7: Variación de la diferencia $F_3 - F_2$, en dB, de las mediciones realizadas para cada banda de frecuencia.

En la Figura 7, se muestran los resultados de la diferencia $F_3 - F_2$, para cada banda de frecuencia correspondiente a las mediciones realizadas. Por encima de los 200 Hz, la diferencia tiende a cero, por lo que podemos decir que no hay una presencia de ruido de fondo

apreciable que interfiera con las mediciones realizadas. Por debajo de este valor, el ruido de fondo comienza a ser apreciable pero no es lo suficientemente influyente como para conducir a errores considerables.

Para el caso puntual de la medición realizada con sistema de escape original a 4300 rpm, puede verse que no se satisface este criterio en las bandas de 50 Hz y 63 Hz. Esto indica una gran presencia de ruido de fondo que sí influye en la precisión de la medición. Recordemos que ya veníamos anticipando esta presencia con la evaluación del indicador F_1 , cuando lo comparamos con los resultados obtenidos para las otras mediciones.

5.4 Indicador F_4 , adecuación de la discretización usada

La ISO 9614-1 recomienda utilizar una densidad mínima de 1 punto/m², con un mínimo de 10 puntos de medición para superficies más pequeñas. En el caso de superficies grandes (>50m²) es suficiente con tomar 50 puntos.

Sin embargo, para conocer si la cantidad y la distribución de los puntos de medición son correctas, se emplea el indicador de no-uniformidad F_4 , que es el cociente entre la desviación estándar y el valor medio de las medidas de intensidad sonora sobre la superficie de medida. O sea:

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (13)$$

Luego, el criterio de evaluación indica la cantidad mínima de puntos de medición a usar de acuerdo a este indicador F_4 y al coeficiente C , dependiente del grado de presión deseado. Debido a que, F_4 varía con la frecuencia, se obtendrá una cantidad mínima de puntos de medición diferente para cada banda de frecuencia. El criterio de evaluación propuesto por la norma es:

$$N > C \cdot F_4^2 \quad (14)$$

Cuando dicha desigualdad no se cumple significa que F_4 tiene un valor elevado. Esto se puede deber a dos factores muy diferentes. O bien, la fuente bajo ensayo es altamente direccional, o, es muy notoria la presencia del ruido de fondo. Si las mediciones están influenciadas por un alto ruido de fondo, en algunos puntos de medición la intensidad medida será positiva y en otros será negativa, esto hace que F_4 tenga un valor relativamente alto, lo que conducirá a que la cantidad de puntos necesarios se dispare a un valor irrealizable. Para conocer la verdadera naturaleza del incumplimiento de este criterio es necesario volver a analizar la diferencia $F_3 - F_2$.

En la Figura 8, se muestran la cantidad de puntos de medición, N , que se necesitarían para cada banda de frecuencia de acuerdo al indicador F_4 calculado para dicha banda y el coeficiente $C = 8$, según lo establecido en la norma para grado de control.

Como se puede observar, para la banda de 31,5 Hz, en algunas mediciones, hubiese sido necesaria una cantidad exagerada de puntos de medición. Analizando la Figura 7, podemos ver que la diferencia $F_3 - F_2$ para esas mediciones es realmente grande, por lo que podemos afirmar que no se trata de una cuestión de direccionalidad de la fuente, sino de la influencia del ruido de fondo.

En las bandas sucesivas, el incumplimiento de este criterio se debe, en algunos casos a la influencia del ruido de fondo, como en el de la medición con sistema de escape original a 4300 rpm. Y en otros casos, como las mediciones con sistema de escape modificado a 4300 rpm y 5200 rpm, a que la fuente se vuelve muy directiva. Es decir, que prevalecen los niveles de emisión en la zona del escape y motor, mientras que en la zona frontal los niveles de

emisión son mucho menores.

En frecuencias más altas, este criterio se cumple para todas las mediciones.

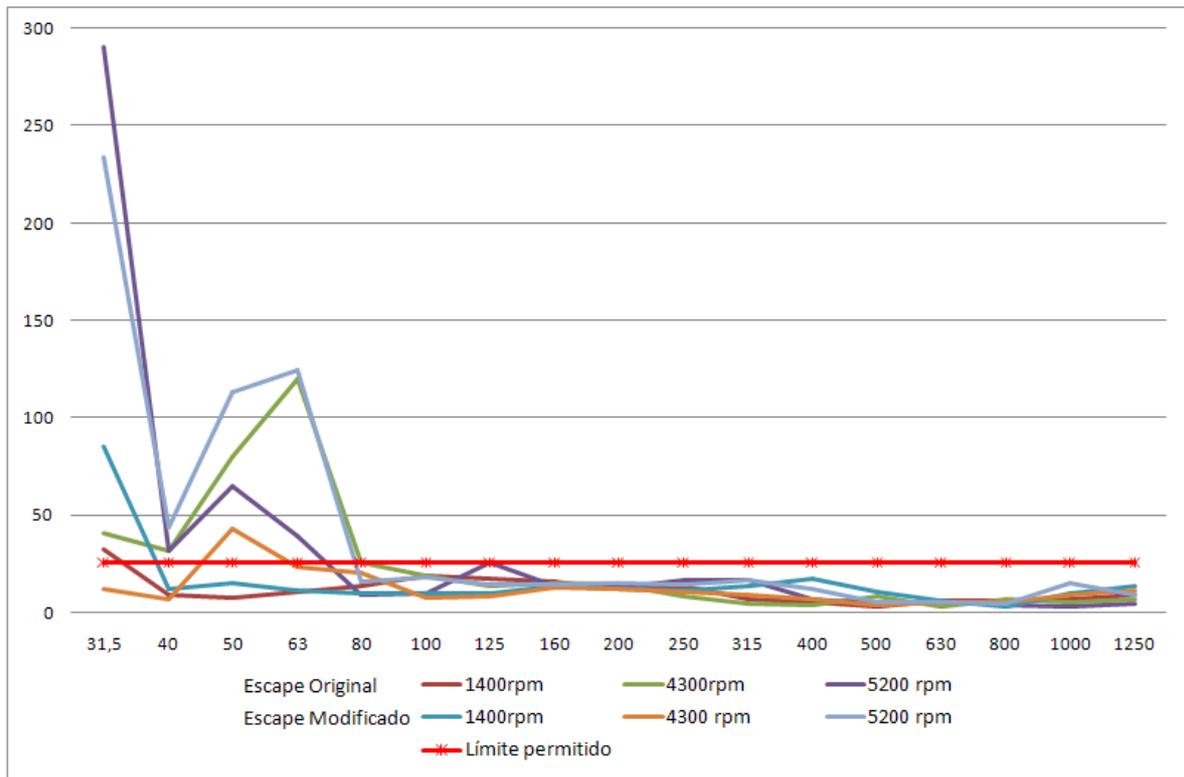


Figura 8: Evaluación de N de acuerdo a $F4$ de las mediciones realizadas para cada banda de frecuencia.

Luego del análisis de los cuatro indicadores que presenta la normativa, se observa que el ancho de banda teórico con el que se contaba al inicio de la medición (31,5 Hz a 1250 Hz) se ha reducido, ya que hay bandas de frecuencia en las que no se satisfacen todos estos indicadores.

Si bien estos indicadores, arrojan una buena información acerca de cuál es la fuente de error que reduce la precisión, presentan dos grandes desventajas: por un lado, se requiere una gran cantidad de cálculos y procesamientos de datos, además de que hay resultados que no dependen de lo estrictamente numérico sino también de ciertas consideraciones que tiene que tener quien realice las mediciones; por otro lado, todas estas evaluaciones se hacen posterior al proceso de medición y no durante el mismo, lo que quita la posibilidad de ir realizando las correcciones pertinentes *in-situ*.

Como mencionamos en los capítulos introductorios, según el espaciador usado se tendrá cierto ancho de banda determinado. Lamentablemente, ninguno de los indicadores limita en alta frecuencia la medición. De hecho, en el presente trabajo, por encima de los 1250 Hz los indicadores satisfacían y señalaban que mantiene los niveles de incertidumbre especificada por la normativa. Sin embargo, bien se sabe mediante la teoría, que con el espaciador empleado es inviable hacer mediciones por encima de dicho valor.

6 CONCLUSIONES

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

- Se observa que la potencia acústica emitida por las motocicletas es mayor cuando se usa un sistema de escape del tipo de competición que con los sistemas originales.

- Los niveles de potencia acústica dependerán también de la velocidad de giro del motor, cuanto más rápido trabaje el motor, mayor será la emisión de ruido.
- Las componentes espectrales del ruido emitido por la motocicleta también será función de la velocidad de giro del motor y de las características constructivas del sistema de escape usado.
- A altas velocidades de giro del motor se incrementan en gran medida las vibraciones de la motocicleta, hecho no menor, ya que genera importantes aportes a la emisión del ruido de la misma.
- Los niveles globales de potencia acústica llegan a ser relativamente altos (110-113 dB) usando sistemas de escape modificados a velocidades de tránsito normal (entre 31 km/h y 50 km/h).
- Es importante destacar, que realizar este tipo de mediciones por el método de presión sonora sería altamente complejo, casi inviable. Sin embargo, el método de intensidad lo hace mucho más fácil, sin necesidad de contar con cámaras especialmente tratadas e, incluso, ante la presencia de fuentes parásitas externas.
- A través de los indicadores de campo propuestos por la [ISO 9614-1](#), se puede asegurar ciertos grados de precisión en el cálculo de los niveles de potencia acústica.
- Además, dichos indicadores brindan información acerca de las fuentes de errores asociadas al campo sonoro y cuál es la influencia de estas en la incertidumbre de la medición.
- La evaluación de estos indicadores requiere grandes post-procesados y lamentablemente no permiten la corrección durante la medición, sólo confirman o desechan los resultados.
- No existen indicadores que señalen el límite superior de frecuencia hasta la que se puede realizar la medición.

7 REFERENCIAS

- Fahy, F.J. *Sound intensity*. Second edition. E & FN Spon, 1995.
- Fahy, F.J. International standards for the determination of sound power levels of sources using sound intensity measurement: an exposition. *Applied Acoustics*, Vol. 50, N° 2, pp. 97-109, 1997.
- Fahy, F.J. *Foundations of engineering acoustics*. First edition. Elsevier Applied Science, pp. 96-139, 2001.
- Fahy F.J., Walker, J. *Advanced applications in acoustics, noise and vibrations*. Fahy & Walker, 2004.
- 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.
- Herráez, M. Comentarios sobre la normativa de estimación de potencia sonora mediante el método de intensidad. *Revista de Acústica*, Vol. XXX, N° 3 y 4, pp. 27-32, 1999.
- IEC 1043, Electroacoustics—Instruments for the measurement of sound intensity—Measurement with pairs of pressure sensing microphones, 1993.

- 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.
- Morse P., Ingard, K. *Theoretical acoustics*. Princeton University Press, 1992.
- 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.
- Munuera, G. Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Cartagena, España*. 2008.
- Norton, M., Karczub, D. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Second edition. Cambridge University Press, 2003.
- Pérez, J., Serra, M. Medición de inmisión sonora con cabeza artificial utilizando la técnica de intensimetría. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, pp. 38-45, 2007.
- Pérez, J., Ramos, O., Urquiza, A., Contrera, H., Novillo, D. Análisis de ruidos de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora. *Mecánica Computacional*, Vol. XXXI, pp. 4029-4045, 2012.
- Sandberg G., Ohayon, R. *Computational aspects of structural acoustics and vibration*. Springer, 2009.