

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE INTENSIDAD SONORA

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

Resumen. La medición de la intensidad sonora se lleva a cabo a través de sistemas que poseen sondas de intensidad del tipo presión-presión (p-p), donde los micrófonos son apareados durante su fabricación. En este trabajo se presenta un sistema de medición de intensidad sonora desarrollado a partir de un módulo de adquisición de señales y una sonda de intensidad sonora con micrófonos no apareados. El sistema se contrasta con uno comercial por medio de mediciones de distintas fuentes sonoras.

1 INTRODUCCION

Para medir la intensidad sonora en un punto es necesario conocer la presión sonora instantánea y la velocidad de las partículas en dicho punto. Esto se puede realizar por dos metodologías diferentes. La primera consiste en utilizar 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 de la velocidad de las partículas a través del gradiente de presión sonora y de la presión sonora media en el centro de los transductores (Fahy, 1995), ver Ec. (1). En este caso hablamos de una sonda p-p.

$$I_r = \frac{1}{2\rho\Delta r} (p_A + p_B) \int (p_A - p_B) dt \quad (1)$$

Donde Δr es la distancia entre los centros de los transductores, ρ densidad del aire, y p_A y p_B los niveles de presión sonora de cada micrófono.

La escogida para llevar a cabo en este trabajo es la sonda p-p, por su menor complejidad de uso en cuanto a los transductores. De igual manera, la etapa de cálculo de la intensidad sonora se puede implementar por dos metodologías, según lo planteado por Gade (1982), el método directo en el cual las señales son procesadas en el dominio del tiempo, obteniendo el valor de intensidad aplicando la Ec. (1). Y el método indirecto, en el cual se realiza la transformada de Fourier a la señal de ambos canales y luego se calcula el espectro cruzado (G_{AB}), usando la parte imaginaria del mismo para obtener la componente activa de la intensidad sonora, ver Ec. (2).

$$I_r = - \int_0^\infty \frac{Im(G_{AB})}{\omega\rho\Delta r} df \quad (2)$$

2 SISTEMA DESARROLLADO

Se muestra en la Figura 1 un diagrama en bloques en el cual se observa la composición general del sistema de dos canales implementado.

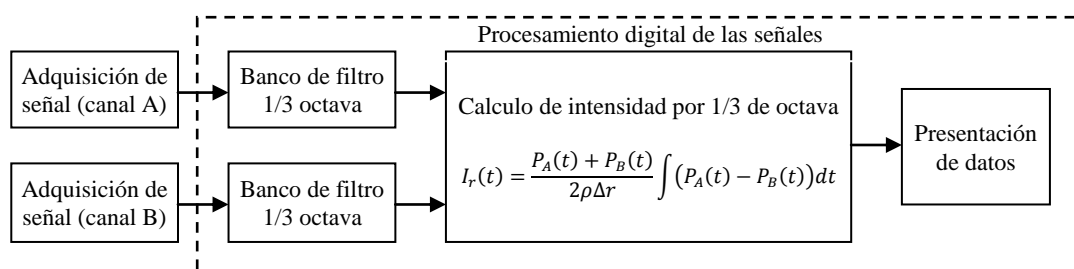


Figura 1: Diagrama en bloques del sistema.

2.1 Adquisición de las señales

Para la adquisición de señales se usa una cadena como el mostrado en la Figura 2, destacando que se realizan dos cadenas iguales, uno por cada canal.

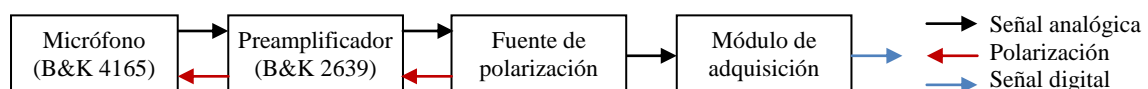


Figura 2: Cadena para la adquisición de una señal.

El micrófono es uno de los elementos más importantes de la cadena, ya que debe captar las señales deseadas con la máxima precisión y además, en una sonda, es determinante que las respuestas de amplitud vs. frecuencia, y fase vs. frecuencia de ambos micrófonos sean lo más parecidas posible, minimizando los errores introducidos por el desfase entre canales. En sondas comerciales se hace uso de micrófonos apareados en fábrica donde ambas respuestas se aproximan de forma satisfactoria. En este caso los micrófonos utilizados (Bruel & Kjaer 4165 de ½ pulgada) no son apareados. En la [Figura 2](#) se observa una fuente de polarización (Bruel & Kjaer 2804), debido a que este tipo de micrófonos deben ser polarizados con una tensión de 200V.

Los preamplificadores (Bruel & Kjaer 2639) tiene por objetivo la adaptación de las impedancias, debiendo ser colocados próximos al micrófono para mejorar la relación señal-ruido antes de transmitir la señal por un conductor hasta el módulo de adquisición. En este caso ambos preamplificadores también deben poseer respuesta en frecuencia idénticas por las mismas razones expuestas para los micrófonos.

Los micrófonos y preamplificadores se montan sobre un marco metálico formando la sonda p-p. Es de gran importancia que este marco metálico sea lo más pequeño posible para minimizar la interferencia en el campo sonoro que se desea medir, apartando el valor medido del real sin la sonda, siendo mayor la desviación a medida que aumenta la frecuencia, esto se debe a que disminuye la longitud de onda haciéndose comparable ésta con las dimensiones de la sonda. Las configuraciones más comunes de los micrófonos son, la configuración lateral en la que los diafragmas de los micrófonos están en un mismo plano; y la configuración frontal en la que los diafragmas están enfrentados.

Se ha demostrado que la configuración frontal es la que tiene mejor respuesta y la que logra errores menores ([Herráez et al., 2001](#)). Podemos utilizar esta configuración siempre que evitemos efectos de acoplamiento entre las dos membranas. Para ello, se dispone de un espaciador sólido entre los dos micrófonos, de manera de crear una pequeña cavidad entre la membrana de cada micrófono y el espaciador, que comunica con el campo sonoro a través de una abertura anular. Asimismo, la simetría que posee en la dirección radial confiere a la sonda una característica de directividad satisfactoria. Cuando dos micrófonos están situados a una distancia fija el uno del otro, la distancia entre sus centros acústicos, no es fija sino que varía con la frecuencia de la onda incidente.

Cuando se sitúa un espaciador sólido, se define más exactamente en qué punto entra el campo sonoro al micrófono, (el sonido llega a cada transductor sólo a través de la pequeña cavidad que existe entre el espaciador y el micrófono), y así, la separación entre los centros acústicos es prácticamente constante. Esta separación es ligeramente mayor que la distancia física, es decir, para que los centros acústicos estén separados 12 mm se utilizará un espaciador sólido de longitud real 11 mm ([Herráez et al., 2001](#)).

El módulo de adquisición de datos de 4 canales (National Instruments 9234) digitaliza las señales y las transfiere a un ordenador para su posterior procesamiento. Ambos canales son muestreados simultáneamente de manera de producir el menor desfase posible entre canales. Para escoger la frecuencia de muestreo se tiene en cuenta que esta configuración de sonda posee un ancho de banda teórico, como especifica [Munuera \(2008\)](#), que se extiende desde los 125 Hz hasta los 5 kHz, ver [Figura 3](#).

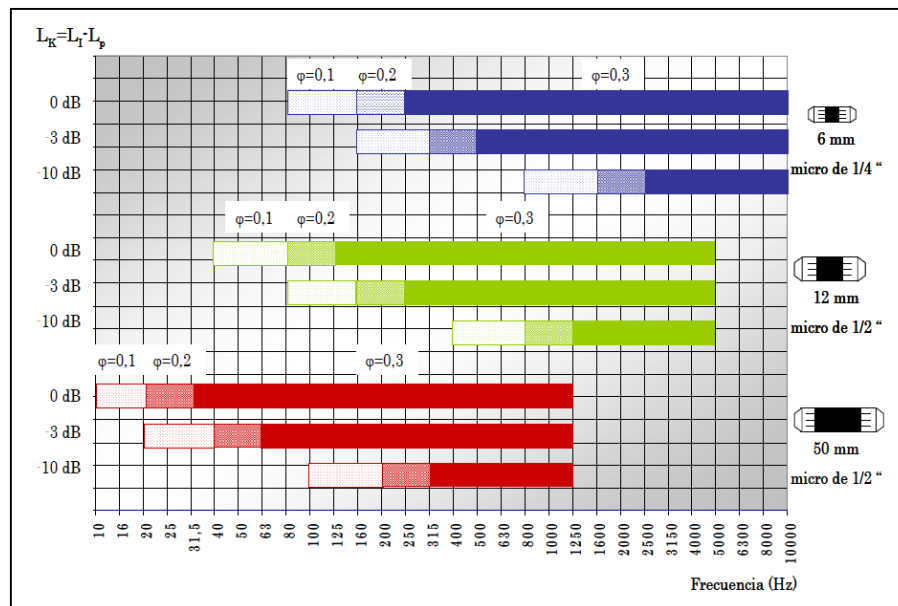


Figura 3: Distintos rangos de uso en frecuencia, según el espaciador.

Este límite de 5 kHz en la frecuencia superior puede extenderse hasta 10 kHz como lo muestra [Jacobsen \(1998\)](#) mediante una simulación numérica, y después es corroborado en la práctica por [Keith \(2003\)](#). Se toma como ancho de banda para la sonda el límite de frecuencia teórico, por lo que la frecuencia de muestreo seleccionada es de 25,6 kHz, cumpliendo con el criterio de Nyquist y no siendo demasiado alta, con el objeto de permitir mayor capacidad de almacenamiento en el buffer de datos que llegan al ordenador y teniendo en cuenta que la resolución del conversor analógico-digital es de 24 bits.

2.2 Procesamiento digital de señales

2.2.1 Banco de filtros

El análisis espectral se realiza mediante filtros digitales, los cuales son de ancho de banda proporcional, es decir, que el ancho de banda es mayor cuanto mayor sea la frecuencia central. Para el diseño de los filtros pasa-banda (que en este sistema se realizan de 1/3 de octava) se aplica la norma [IRAM 4081](#), la cual especifica la frecuencia central, y mediante un conjunto de ecuaciones establecidas por la misma, se obtienen las frecuencias de corte superior e inferior, pérdida de transmisión mínima admisible, entre otros. Se utilizan filtros del tipo Butterworth, que se desarrollan mediante filtros de respuesta infinita al impulso (IIR) ([Smith, 1997](#)). De acuerdo a la norma, los requisitos mínimos que se deben satisfacer son (ver [Tabla 1](#)).

Frec. central [Hz]	Frec. corte inferior [Hz]	Frec. corte superior [Hz]	Frec. inferior a -75 dB [Hz]	Frec. superior a -75 dB [Hz]
125	111,36	140,31	25	625
160	142,54	179,59	32	800
200	178,18	224,49	40	1000
250	222,72	280,62	50	1250
315	280,63	353,58	63	1575
400	356,36	448,98	80	2000

500	445,45	561,23	100	2500
630	561,27	707,15	126	3150
800	712,72	897,97	160	4000
1000	890,90	1122,46	200	5000
1250	1403,08	1113,62	250	6250
1600	1425,44	1795,94	320	8000
2000	1781,80	2244,92	400	10000
2500	2227,25	2806,16	500	12500
3150	2806,33	3535,76	630	15750
4000	3563,59	4489,85	800	20000
5000	4454,49	5612,31	1000	25000

Tabla 1: Requisitos mínimos para filtros.

Por lo tanto, con estos parámetros se determina el orden necesario del filtro digital pasabandas, verificándose en este caso a partir de un filtro de orden 8. Asimismo se obtienen los coeficientes para poder implementarlos como filtros digitales tipo IIR. Por último, se calcula la respuesta en amplitud (ver Figura 4) y la respuesta en fase (ver Figura 5) del banco de filtros, para determinar si son adecuadas.

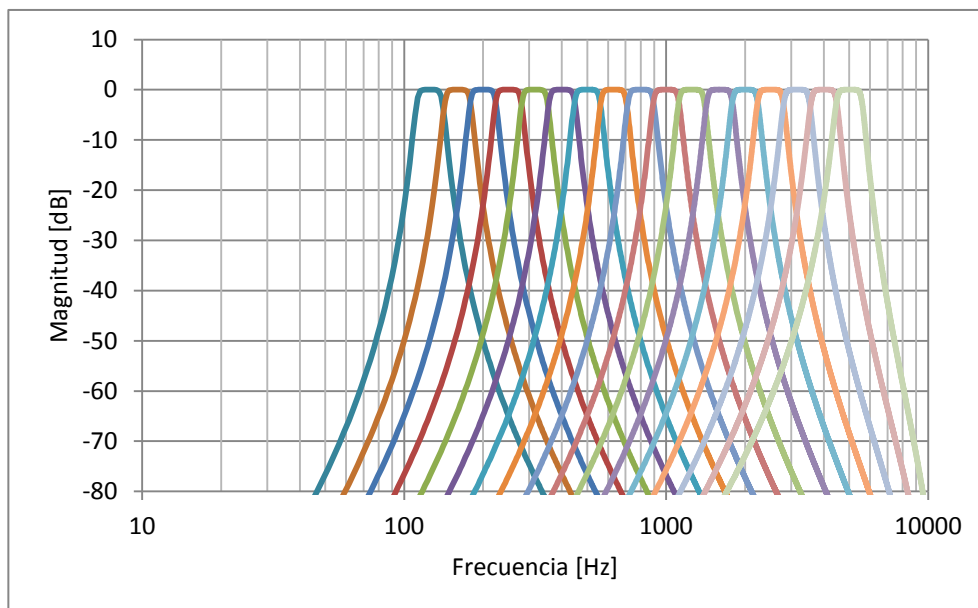


Figura 4: Respuesta en amplitud.

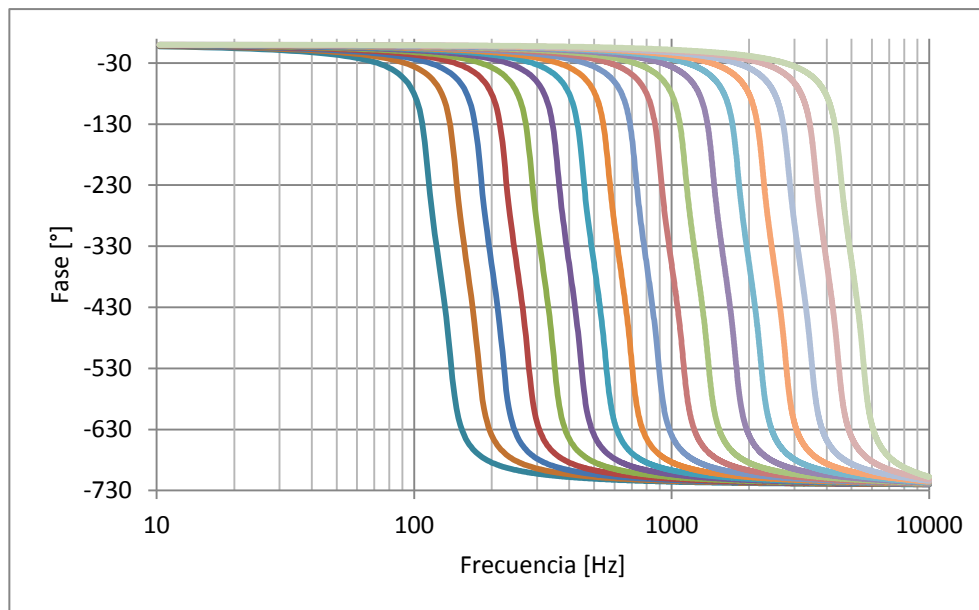


Figura 5: Respuesta en fase.

Las respuestas que se observan son idénticas para ambos canales. Si bien los filtros introducen un desfase, este es igual en ambos por lo que la diferencia de fase entre canales – que es muy importante a la hora del cálculo de la intensidad– debida a los filtros es prácticamente nula. En cuanto a las amplitudes se mantienen iguales en ambos bancos, permitiendo pasar a la siguiente etapa del desarrollo.

2.2.2 Cálculo de la intensidad sonora y presentación de los datos

A la salida de cada filtro se aplica la Ec. (1) obteniendo así el valor de intensidad por tercios de octava, luego se lo promedia de manera lineal, es decir, una vez iniciada la medición se realiza el promedio durante un período de tiempo T establecido previamente.

Una vez que se tiene el promedio se calcula el nivel de intensidad en dB referenciados a 1 pW/m^2 , haciendo uso de la Ec. (3).

$$I = 10 \log \frac{|I_r|}{1 \frac{\text{pW}}{\text{m}^2}} \quad (3)$$

En esta ecuación se utiliza el módulo de la intensidad en pW/m^2 , ya que la intensidad puede ser positiva o negativa. El signo hace alusión al sentido del vector intensidad que se mide en la dirección de la sonda. Este signo es utilizado en el momento de graficar la intensidad para diferenciar los dB obtenidos en dos grupos, los positivos y los negativos, haciendo referencia al sentido del vector intensidad. Al momento de la presentación gráfica de los niveles se usa un sistema donde en ordenadas se representan los dB de intensidad y en abscisas las frecuencias discriminadas por bandas de tercios de octavas. En la Figura 6 se muestra un gráfico de intensidad vs frecuencia.

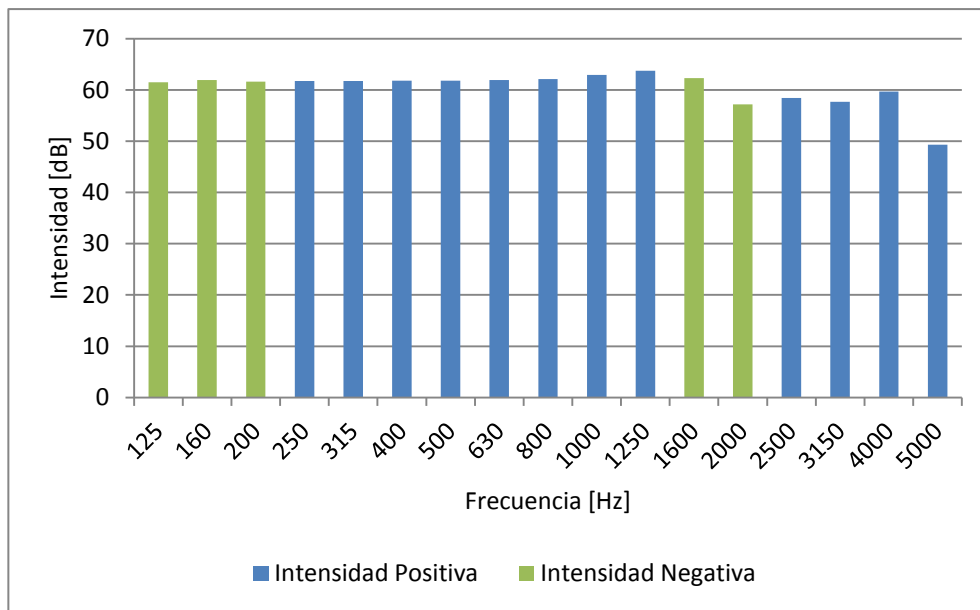


Figura 6: Visualización de los datos.

3 RESPUESTA DEL SISTEMA

Como ya se mencionó, ambos micrófonos deben tener idénticas sensibilidades en todo el rango de frecuencias a medir. Para analizar esto se obtiene la relación entre amplitudes de ambos canales, y de ser necesario luego aplicar una corrección. La relación se mide con un calibrador de intensidad (Bruel & Kjaer 3541) el cual posee dos orificios enfrentados en donde se colocan los micrófonos, aplicando a ambos igual nivel de presión sonora y fase. La señal de calibración puede ser un tono puro de 250 Hz generado por un pistofono o una señal de ruido rosa proveniente de un generador externo. Utilizando este último se determina la amplitud por banda de frecuencia en cada canal, y se obtiene la relación entre ambos canales (ver Figura 7).

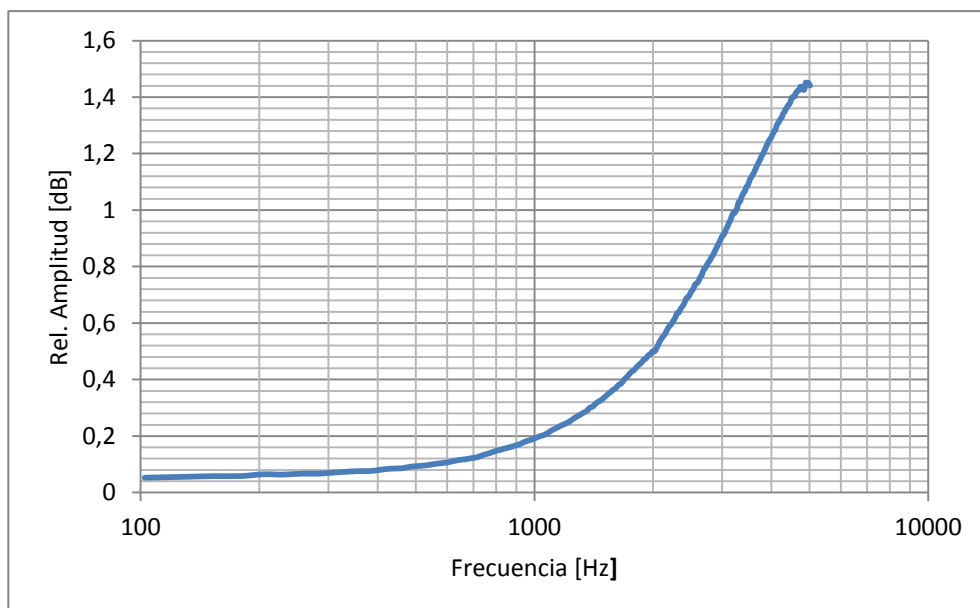


Figura 7: Relación de amplitud entre canales.

De igual manera, se obtiene la diferencia de fase entre canales, en este caso haciendo uso de la Ec. (4), dada por [Bruel & Kjaer \(1998\)](#).

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{I_{ref} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot \Delta r}{P_{ref}^2 \cdot 10^{-10}} \right) \quad (4)$$

Donde θ es la diferencia de fase en grados, I_{ref} $1\text{pW}/\text{m}^2$, f frecuencia (Hz), ρ densidad del aire ($1,119 \text{ Kg}/\text{m}^3$), Δr longitud del espaciador (m), P_{ref} $20\mu\text{Pa}$, δ_{pIo} índice presión intensidad residual.

La diferencia de fase entre canales es muy importante debido a los errores que introduce en el cálculo de la intensidad, principalmente en bajas frecuencias donde la diferencia de fase del campo sonoro, en la distancia entre ambos micrófonos, es extremadamente pequeña ([Gade, 1982](#)). En la [Figura 8](#) se visualiza la diferencia de fase entre canales del sistema implementado.

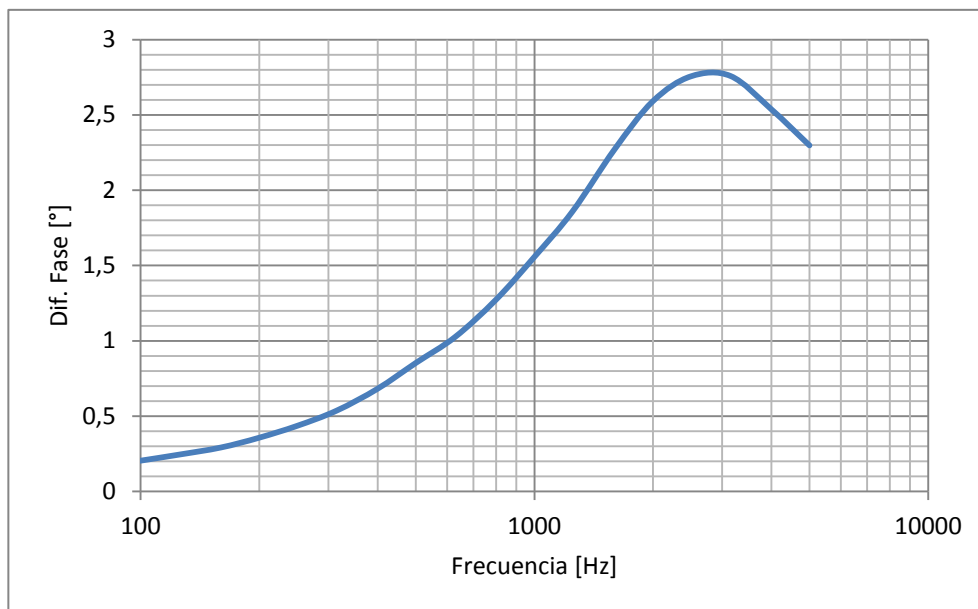


Figura 8: Diferencia de fase entre canales del sistema desarrollado.

En equipos comerciales la diferencia de fase se considera muy satisfactoria para un error entre $0,05^\circ$ en 100 Hz a 1° en 5 kHz ([Jacobsen, 1997](#)). En la [Figura 9](#) se observa la diferencia de fase entre canales del equipo comercial (Bruel & Kjaer 2145 con sonda Bruel & Kjaer 3584) que se utiliza como referencia para contrastar el desarrollo.

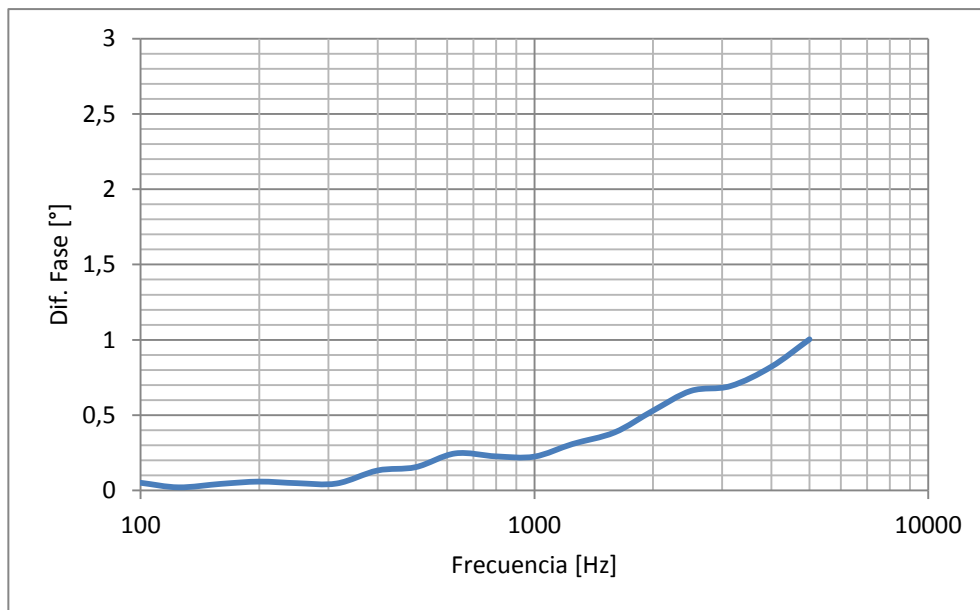


Figura 9: Diferencia de fase entre canales del sistema comercial.

Como era de esperar, la cadena implementada posee una diferencia de fase mayor que la del instrumento comercial, por lo cual se aplica una corrección del valor de intensidad en el rango de frecuencias de 125 Hz a 5000 Hz.

Por último, se utiliza nuevamente el calibrador de intensidad para obtener la intensidad residual –intensidad debida al desfasaje existente en la cadena de medición– y el índice presión-intensidad residual (δ_{pio}), que es un indicador de la calidad del instrumento de medición, el cual se obtiene haciendo la diferencia de nivel de presión sonora medido L_p y el nivel de intensidad residual L_{II} sin considerar el signo de la misma (Fahy, 1995), ver Figura 10 y Figura 11.

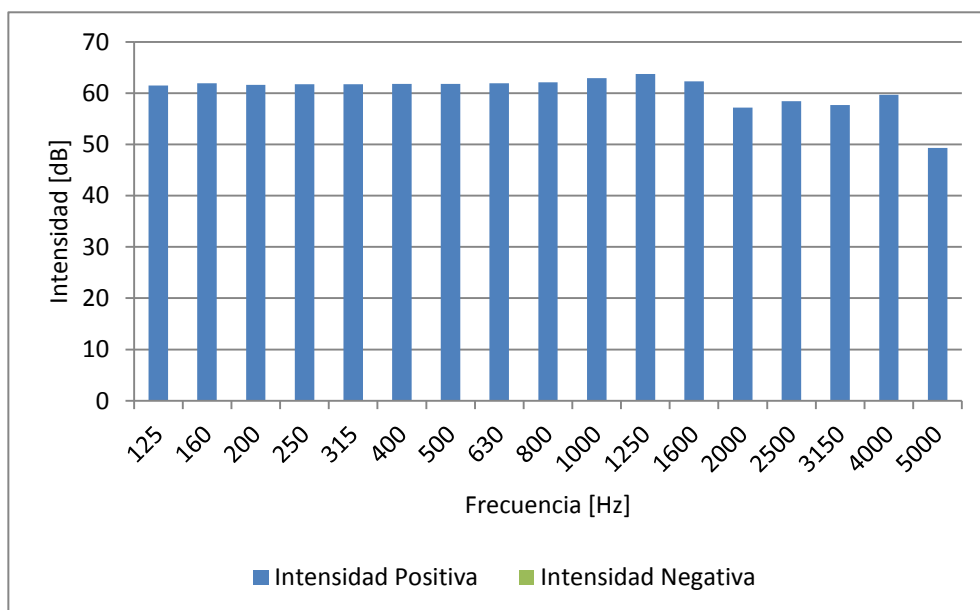


Figura 10: Intensidad residual del sistema desarrollado.

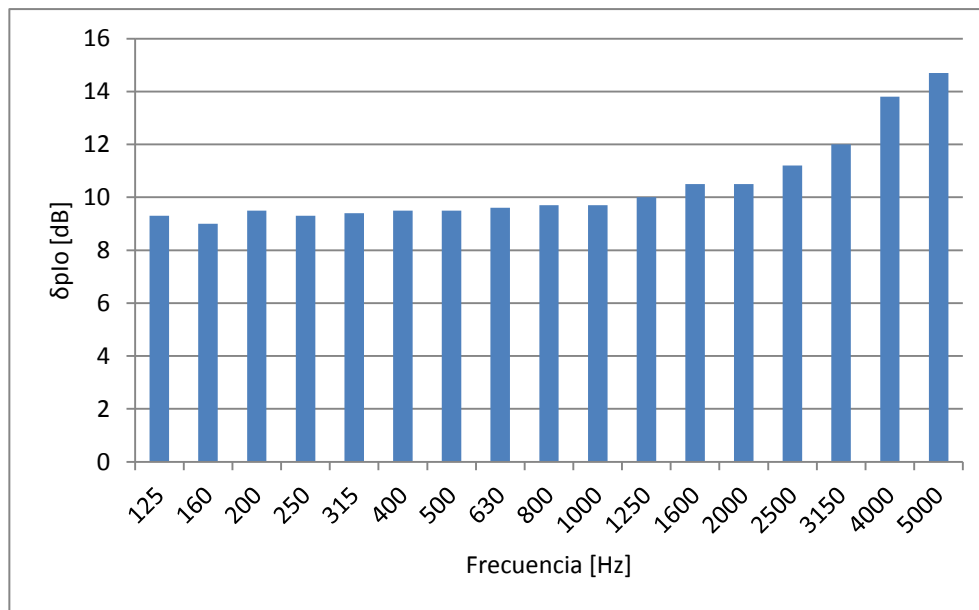


Figura 11: Índice presión-intensidad residual (δ_{pIo}) del sistema desarrollado.

Si se realiza la diferencia, Ec. (5), entre el índice presión intensidad residual (δ_{pIo}) y el índice presión-intensidad (δ_{pI}) –el cual es función de la reactividad del campo sonoro, y la posición y orientación de la sonda en el mismo– obtenemos lo que se conoce como Índice de Error de Fase (L_Φ).

$$L_\Phi = \delta_{pIo} - \delta_{pI} \quad (5)$$

Este índice es un indicador de la importancia del desfase en la cadena de medición. Se debe prestar especial atención al usarlo ya que el error en la medición aumenta a medida que este índice decrece. Si se desea obtener un error en la estimación de la intensidad de ± 1 dB, lo que se corresponden con un error normalizado de $\pm 0,25$ en veces, se debe cumplir que $\delta_{pIo} - \delta_{pI} \geq 7$ dB (Fahy, 1995; Jacobsen, 1997).

Otra manera de expresar esta limitación y la usada con mayor frecuencia es en función de la capacidad dinámica del equipo (L_d), definida por la ecuación (6).

$$L_d = \delta_{pIo} - K \quad (6)$$

Donde K es igual a 7 dB para un error en la estimación de la intensidad de ± 1 dB. A partir de esto se podrán aceptar tan sólo aquellas medidas que cumplan $L_d \geq \delta_{pI}$ (Pérez et al., 2000). Finalmente, se obtiene la capacidad dinámica del sistema y la del sistema comercial (ver Figura 12) para compararlas.

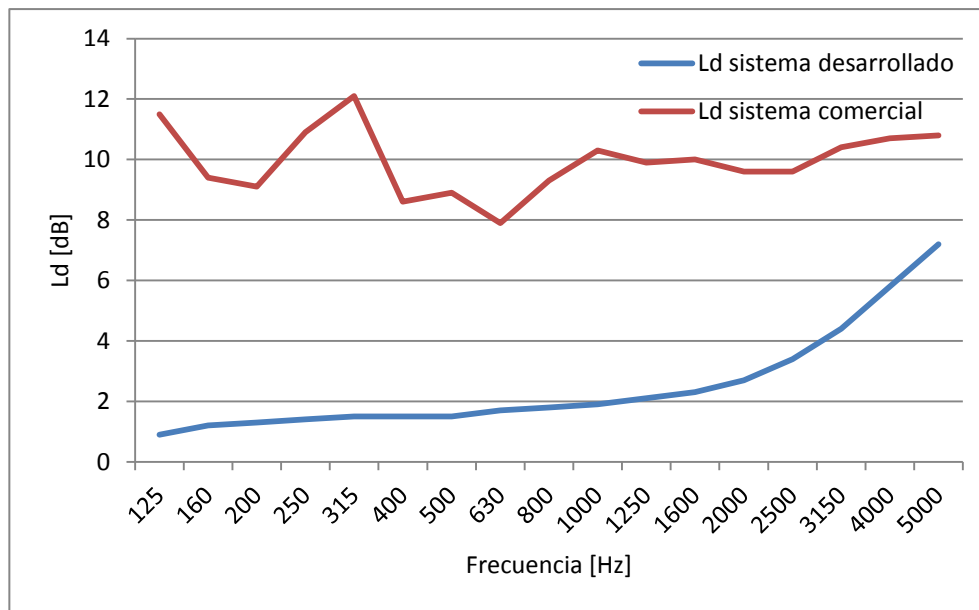


Figura 12: L_d vs frecuencia del sistema desarrollado y del sistema comercial.

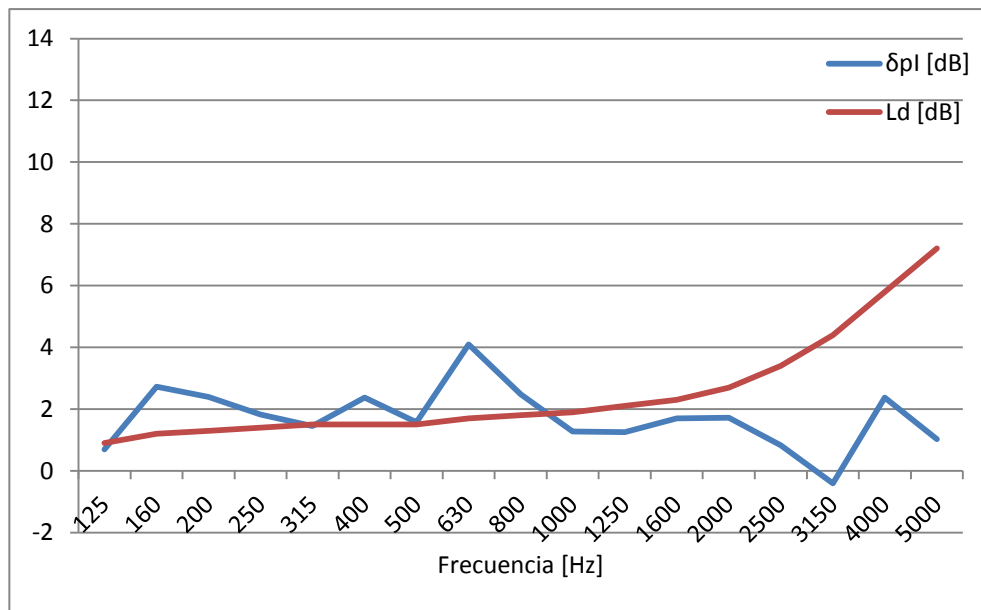
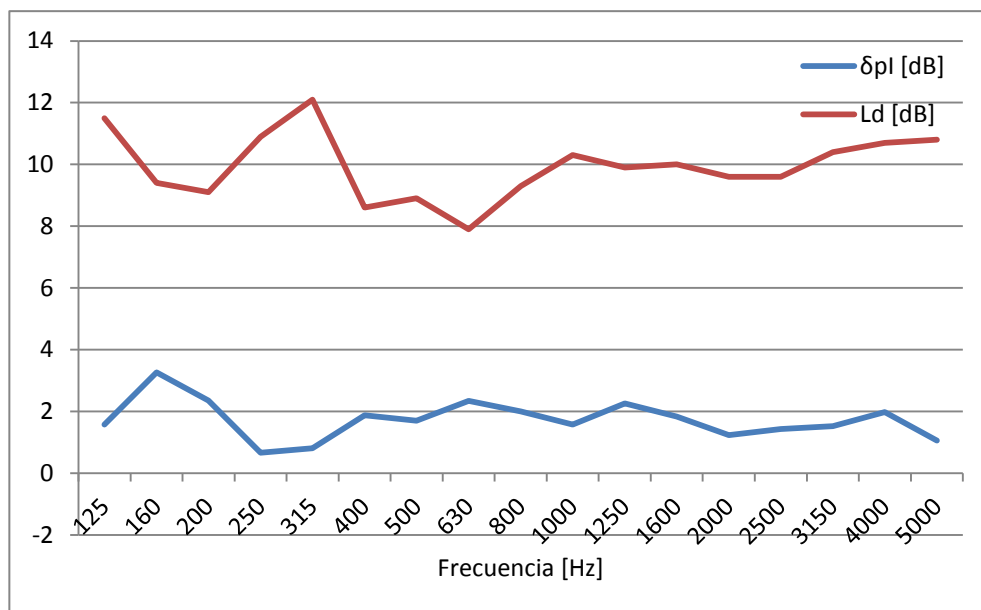
4 MEDICIONES

Con la finalidad de contrastar el desarrollo con un instrumento comercial de medición de intensidad sonora de excelente calidad, se realizaron mediciones de distintos electrodomésticos en diferentes ambientes. A partir de los niveles relevados también se efectuaron mapas de directividad de estas fuentes de manera de identificar las zonas de mayor emisión, tal como se realizan en otros trabajos con electrodomésticos (Liu et al., 2012; Sánchez et al., 1999). Las fuentes medidas son: un secarropa, con una potencia eléctrica de 400 W y velocidad de 2800 rpm, que se mide en una sala pequeña cuyas dimensiones son: 2,36 m x 2,79 m x 2,64 m. Y una aspiradora con una potencia eléctrica de 1200 W, medida en una oficina de dimensiones 9,62 m x 3,78 m x 2,42 m.

4.1 Secarropa

Se mide en 25 puntos con el sistema desarrollado para realizar un mapa de directividad, y conjuntamente se relevan 4 de estos 25 puntos con la sonda comercial, para poder contrastarlos. Los puntos se distribuyen sobre una superficie virtual (envolviendo el electrodoméstico) de forma cilíndrica con un radio de 46,5 cm y una altura de 85 cm. Se localizan 6 puntos (cada 60°) en cada plano horizontal, y se fijan 4 planos horizontales a distintas alturas, el punto restante se localiza en el centro de la tapa superior del cilindro coincidiendo en altura con los 6 puntos más altos, ver Figura 16.

Para realizar la comparación entre ambos instrumentos, se seleccionan 4 puntos y se calcula el promedio de la intensidad y de la presión entre los cuatro, para determinar el δ_{pI} promedio de cada instrumento, con el fin de verificar que el mismo sea mayor al L_d asegurando que el error al estimar la intensidad es de ± 1 dB, ver Figura 13 y Figura 14.

Figura 13: L_d y δ_{pI} del sistema desarrollado.Figura 14: L_d y δ_{pI} del sistema comercial.

De estas figuras podemos inferir que por encima de 1000 Hz se cumple lo mencionado en el párrafo anterior, lo que permite asegurar que la diferencia entre los valores de intensidad obtenidos en ambos instrumentos no será mayor a 2 dB, en el peor de los casos.

A continuación se realiza la diferencia entre valores de intensidad promedio por tercio de octava de cada instrumento.

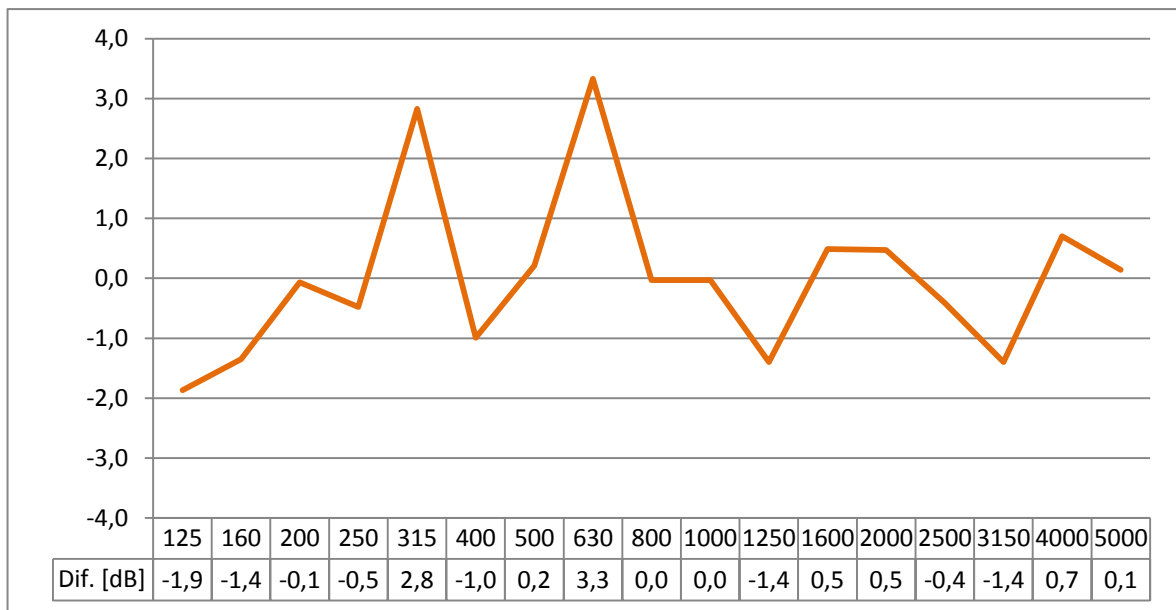


Figura 15: Diferencia entre intensidades promedio de cada sistema.

En la [Figura 15](#) se puede constatar que a partir de los 1000 Hz se cumple lo esperado, donde la diferencia no supera los 2 dB.

Para la elaboración de los mapas de directividad de intensidad se utiliza la misma metodología que se encuentra en el trabajo de [Pérez \(2012\)](#), en el cual se toman los valores globales de intensidad sonora con ponderación A, ya que las componentes espectrales del secarropa son de alta frecuencia y la sala de medición presenta bastante coloración entre los 200 y los 630 Hz. En la [Figura 17](#) se observa el mapa de directividad.

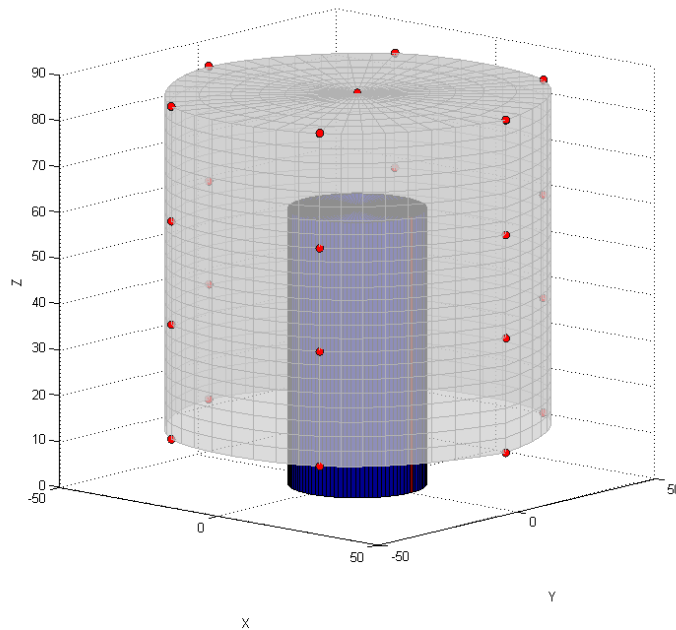


Figura 16: Distribución de puntos en la superficie virtual.

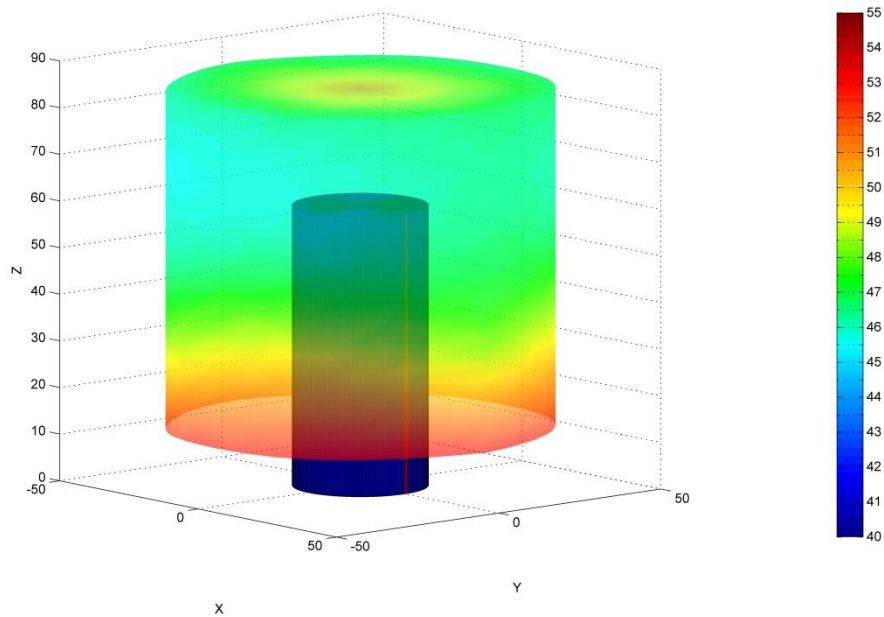


Figura 17: Mapa de directividad de niveles globales (dBA).

4.2 Aspiradora

En este caso se definen 13 puntos de medición y se relevan con ambos instrumentos de forma simultánea. Los puntos se distribuyen formando una superficie virtual de forma cilíndrica con tapa superior, con un radio de 50 cm y una altura de 55 cm. En esta superficie se fijan puntos cada 90° a 3 alturas distintas, y un punto en el centro de la tapa del cilindro, ver Figura 21.

La comparación se realiza con el mismo procedimiento descrito en el punto 4.1, ver L_d y δ_{pl} en Figura 18 y Figura 19.

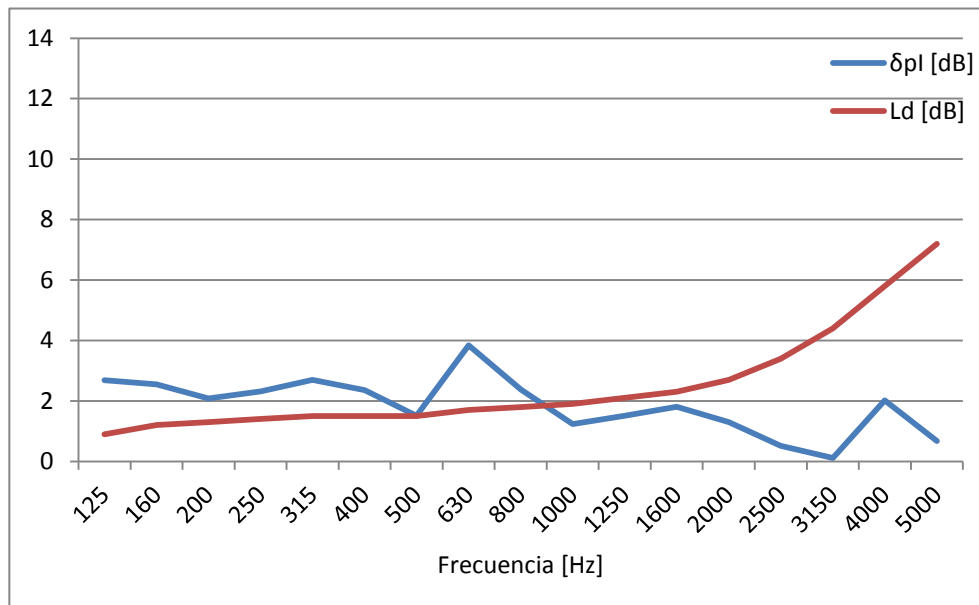


Figura 18: L_d y δ_{pl} del sistema desarrollado.

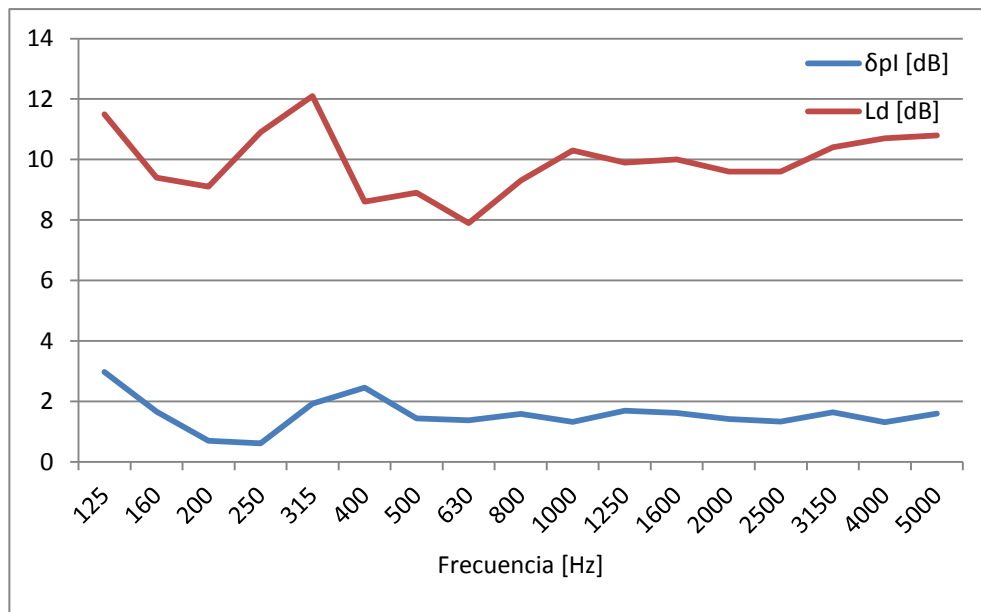


Figura 19: L_d y δ_{pi} del sistema comercial.

Los resultados que se encuentran en esta situación son similares a los obtenidos en el caso del secarropa. Es decir, que a partir de los 1000 Hz se cumple que $L_d \geq \delta_{pi}$ en el desarrollo, por lo que en esas frecuencias la diferencia entre instrumentos no supera los 2 dB, ver [Figura 20](#).

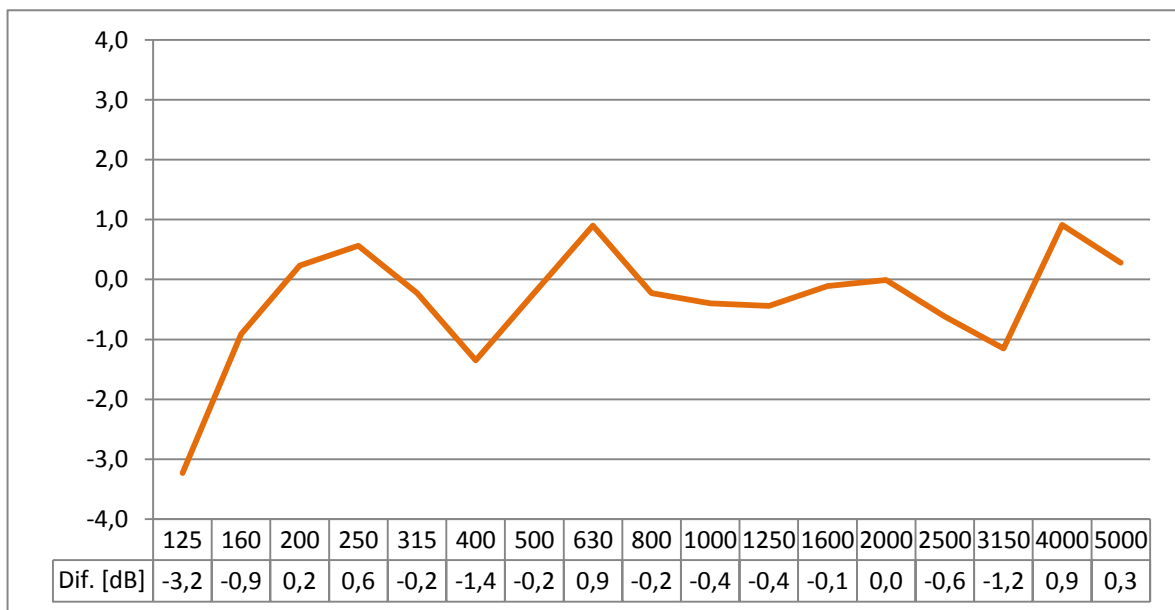


Figura 20: Diferencia entre intensidades promedio de cada sistema.

En este caso se realizan dos mapas de directividad, uno con los niveles globales ponderados A, ver [Figura 22](#), y otro para la banda de frecuencia de tercio de octava de 500 Hz, debido a que se tiene un tono de alto nivel en dicha frecuencia para la mayoría de los puntos medidos, ver [Figura 23](#).

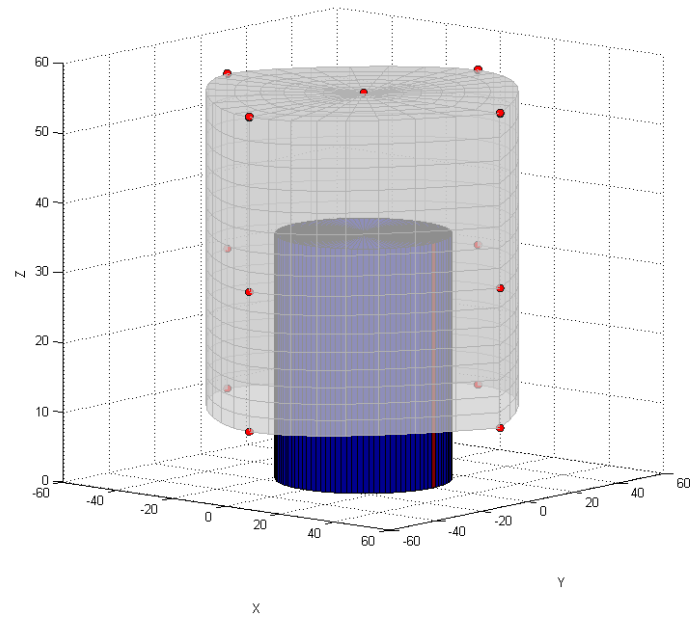


Figura 21: Distribución de puntos en la superficie virtual.

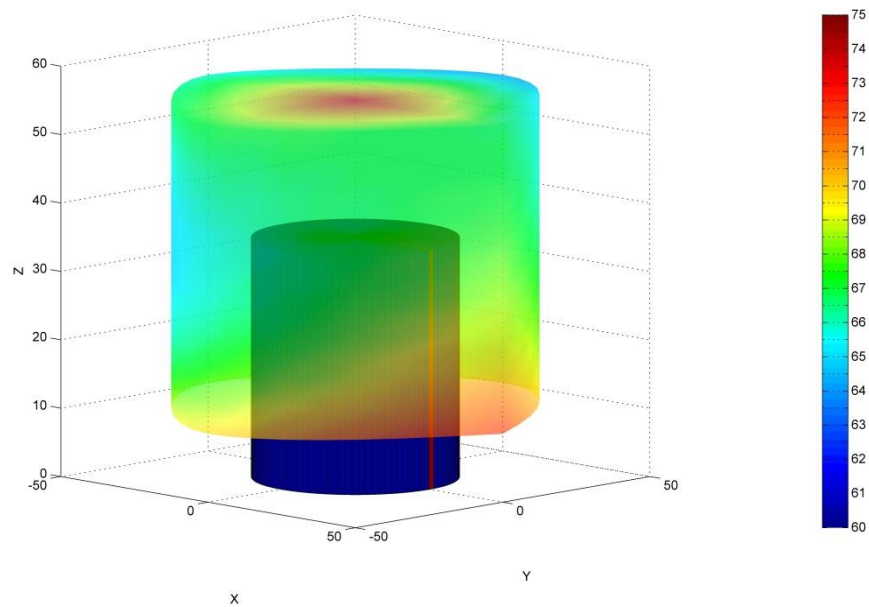


Figura 22: Mapa de directividad de niveles globales (dBA).

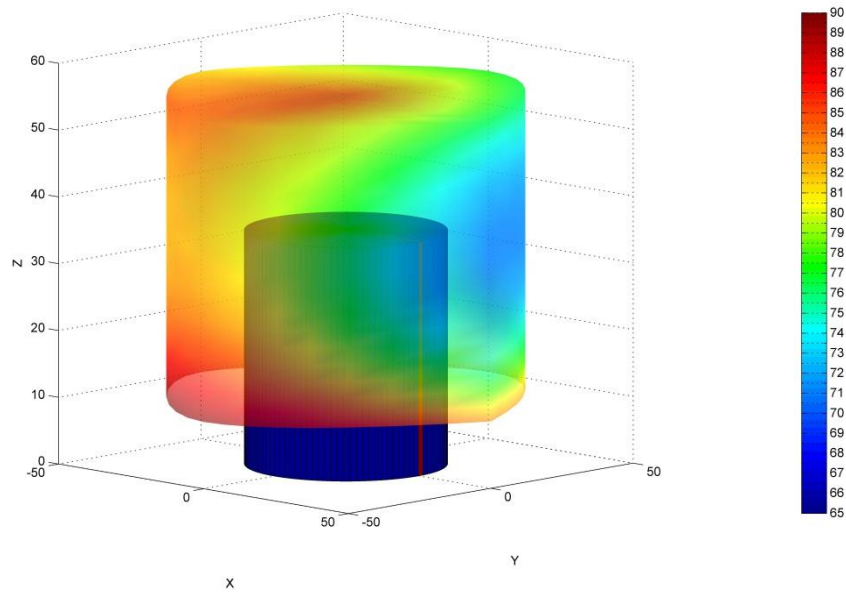


Figura 23: Mapa de directividad para la frecuencia de 500 Hz en dB.

5 CONCLUSIONES

De acuerdo a lo expuesto en el presente trabajo, en el que se ha desarrollado un sistema alternativo de medición de intensidad sonora, es posible concluir que:

- Se observa que el sistema de medición desarrollado, como se esperaba, presenta limitaciones en la capacidad dinámica principalmente en baja frecuencia debido al desfase entre canales, donde la mayor contribución al mismo proviene de los micrófonos al no ser apareados. Esto, entre otras, impondrá limitaciones del ancho de banda en el que será posible desarrollar la medición.
- Además, la reactividad del campo va ser un factor determinante al momento de realizar mediciones debido a la baja capacidad dinámica. Se observa que, tanto en la sala como en la oficina, los campos sonoros son similares y se obtiene una medición válida entre los 1000 Hz y 5000 Hz. Para campos con una mayor reactividad el ancho de banda será menor, mientras que si nos acercamos a la condición de campo libre el mismo debería llegar a bandas de frecuencia menores.
- Es importante destacar también que, se puede obtener otros rangos de frecuencia utilizando espaciadores de otras dimensiones, además de los ajustes necesarios en la estimación de la intensidad.
- Diseñando los filtros apropiados se puede realizar la estimación de la intensidad por 1, 1/6 y 1/12 de octava, sin que esto requiera reemplazar el hardware, lo que ahorra mucho tiempo y dinero.
- Si bien el sistema tiene una limitación en cuanto a la capacidad dinámica, es importante destacar que presenta como principal ventaja un muy bajo costo comparado con los equipos comerciales actuales. Además tiene la posibilidad de incorporar mejoras y modificaciones a través del software economizando y aprovechando al máximo los recursos disponibles.
- Como trabajo futuro se buscará implementar una corrección para reducir la diferencia de fase entre canales mediante software, mejorando la capacidad dinámica y ampliando el

ancho de banda.

REFERENCIAS

- Bruel & Kjaer, *Product Data Sound Intensity Probe Sets - Types 3583, 3584 Sound Intensity Microphone Pairs - Types 4178, 4197 Dual Preamplifier - Type 2682*. <http://www.bksv.com>. 1998.
- Fahy, F.J. *Sound Intensity*. Second edition. E & FN Spon, 1995.
- Gade, S. *Sound Intensity: Theory. Instrumentation and applications, Part 1 and 2. Technical review*. Bruel & Kjaer. 1982.
- Herráez, M., Machimbarrena, M. *Intensimetría*. Universidad Austral de Chile – Universidad de Valladolid. 2001.
- IRAM 4081. *Filtros banda octava, media octava y tercio de octava para análisis de sonidos y vibraciones*. 1977.
- Jacobsen, F. An overview of the sources of error in sound power determination using the intensity technique. *Applied Acoustics*. Vol. 50, N° 2. Pp.155-166.1997.
- Jacobsen, F., Cutanda, V. and Juhl P.M. A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probes at high frequencies. *Journal Acoustical Society of America*, Vol. 103, N° 2. pp 953-961. 1998.
- Keith, S.E., Krishnappa, G., Chiu, V. Dynamic capability of sound intensity measurements at high frequencies. *Proceedings of the 32nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Internoise*. Jeju, Korea. 2003.
- Liu, B., Feng, T., Wu, X., Li, N. Noise radiation characteristics of the washing machine based on sound intensity measurement. *Advanced Materials Research*. Vols. 482-484. pp 1406-1409. 2012.
- Munuera, G. Técnicas avanzadas de medida en intensimetría acústica para la caracterización de materiales aislantes. Tesis Doctoral. *Universidad Politécnica de Cartagena, España*. 2008.
- Pérez A., Tejada F., Machimbarrena M., Herráez M., González J. Medida “in-situ” de la impedancia acústica de materiales con técnicas intensimétricas. *TecniAcustica*. Madrid 2000.
- Pérez Villalobo, J.A., Ramos, O.A., Urquiza Manzanelli, A.J., Contrera, H.H., Novillo, D.A. Análisis de ruido de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora. *Mecánica Computacional*. Vol XXXI. pags 4029-4045. 2012.
- Sánchez Tabuenca, B., Lladó París, P., Ramón García, N., Claveria Ambroj, I. Reducción de ruido en un lavavajillas a partir de medidas de intensidad sonora. *TecniAcustica*. Avila 1999.
- Smith, S.W. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. <http://www.DSPguide.com>. 1997.