

Identificación de fuentes de ruido vehiculares mediante la técnica de *Beamforming*

William D'Andrea Fonseca, Samir N. Y. Gerges

Laboratório de Vibrações e Acústica, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
willdfonseca@yahoo.com.br, samir.acustica@gmail.com



RESUMO

A evolução das técnicas de avaliação de ruído tornou possível o aprimoramento dos mapas de imagem acústica. Estes mapas buscam determinar as regiões de ruído proeminente, uma das técnicas empregada para este propósito é o beamforming (conformação de feixe). Ao se estender a aplicação do beamforming para fontes em movimento é possível fazer o mesmo tipo de avaliação e localizar assim as fontes que são geradas em decorrência do movimento, tais como: rolamento e turbulência. O teste de pass-by noise certifica o veículo de acordo com a norma em vigor, no sentido de que sua contribuição no ruído de tráfego não esteja acima de um valor permitido. A aplicação da técnica de beamforming a este teste então possibilita a observação de quais fontes causam maior contribuição de ruído no plano lateral do veículo. Este trabalho demonstra de forma simples o princípio da técnica, a instrumentação e os procedimentos envolvidos, para que se possa obter uma imagem acústica de um teste de pass-by.

PALAVRAS-CHAVE:

Imagem acústica, beamforming, pass-by, acústica, array, medição.

RESUMEN

La evolución de las técnicas de evaluación de ruido hizo posible el perfeccionamiento de los mapas de imagen acústica. Estos mapas buscan determinar las regiones de ruido prominente, una de las técnicas empleadas para este propósito es el beamforming (conformación de haz). Al extender la aplicación del beamforming para fuentes en movimiento es posible hacer el mismo tipo de evaluación y localizar así las fuentes que son generadas como consecuencia del movimiento, tales como: rolamento y turbulencia. La prueba de pass-by noise certifica al vehículo de acuerdo con la norma en vigor, en el sentido de que su contribución en el ruido de tráfico no esté arriba de un valor permitido. La aplicación de la técnica de beamforming a esta prueba entonces possibilita la observación de las fuentes que causan mayor contribución de ruido en el plano lateral del vehículo. Este trabajo demuestra de forma simple el principio de la técnica, la instrumentación y los procedimientos involucrados para que se pueda obtener una imagen acústica de una prueba de pass-by.

PALABRAS CLAVE

Imagen acústica, beamforming, pass-by, acústica, array, medición.

INTRODUCCIÓN

La prueba de ruido de paso (*pass-by*) es una técnica de medición normalizada, la cual es usada para determinar el ruido externo emitido por vehículos. Esta prueba está reglamentada en la mayoría de los países por sus propios órganos legislativos,¹ los cuales establecen los procedimientos experimentales para condiciones estáticas y dinámicas,² así como los niveles de ruido máximos permitidos.

Considerando el hecho de que un vehículo puede ser desarrollado en un país y vendido en muchos otros, hay una tendencia a que esas normas sean unificadas, o que sean basadas en una norma común.³ Esta prueba ha obtenido gran relevancia debido a que los órganos reguladores y los consumidores exigen vehículos cada vez más silenciosos y menos contaminantes.

Muchas son las fuentes de ruido que determinan el ruido total de un vehículo, tales como: motor, sistema de escape, transmisión, neumáticos, entre otros. No obstante, la prueba de *pass-by* estandarizada⁴ no tiene la capacidad de diagnosticar cuáles de esas fuentes influyen más o si están emitiendo un ruido debido a una falla durante la prueba. Luego, para identificar tales fuentes, se vuelve necesaria la utilización de técnicas de visualización de campo acústico. Las técnicas más comunes son: intensidad acústica, que generalmente no se aplica a fuentes móviles por su mayor dificultad de medición; holografía acústica, que generalmente es aplicada para fuentes estáticas por tener una resolución óptima para campo próximo; y la técnica de *beamforming*, la cual funciona bien para distancias mayores en relación a la fuente, dado que su resolución está íntimamente ligada principalmente a la cantidad de transductores y al tamaño del arreglo (*array*) de los mismos,⁵ siendo por lo tanto la técnica más viable para este tipo de prueba.

BEAMFORMING

Principio de la técnica

El algoritmo en el dominio del tiempo^{6,7} es la base para la comprensión de la técnica. Inicialmente, para aclarar el procedimiento, se admite que una fuente sonora del tipo monopolo $f(r,t)$ se encuentra en la posición \vec{x}' (figura 1a). Se considera entonces un total de M micrófonos omnidireccionales en un campo

libre localizados en las posiciones $\vec{x}_m, m=1,2,\dots,M$; con el origen del centro de coordenadas definida en el centro del *array*, figura 1.a.

Los micrófonos captan las ondas de presión sonora y las muestran espacialmente, la señal obtenida del m -ésimo micrófono es una función del tipo $p_m(r'_m,t)=f(r'_m,t)$. En esa implementación de atraso y suma (figura 1.b.) cada micrófono sufre un atraso Δ_m , que adecuadamente escogido selecciona las señales provenientes de la dirección considerada, en cuanto que las de otras direcciones son atenuadas. Cada transductor es ponderado por un factor w_m , y así las señales ponderadas y atrasadas son sumadas linealmente generando la función:

$$b(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m) \tag{1}$$

Esta expresión es normalizada dividiéndose entre M , para que la señal no sea amplificada en función del número de micrófonos (figura 1.b.).

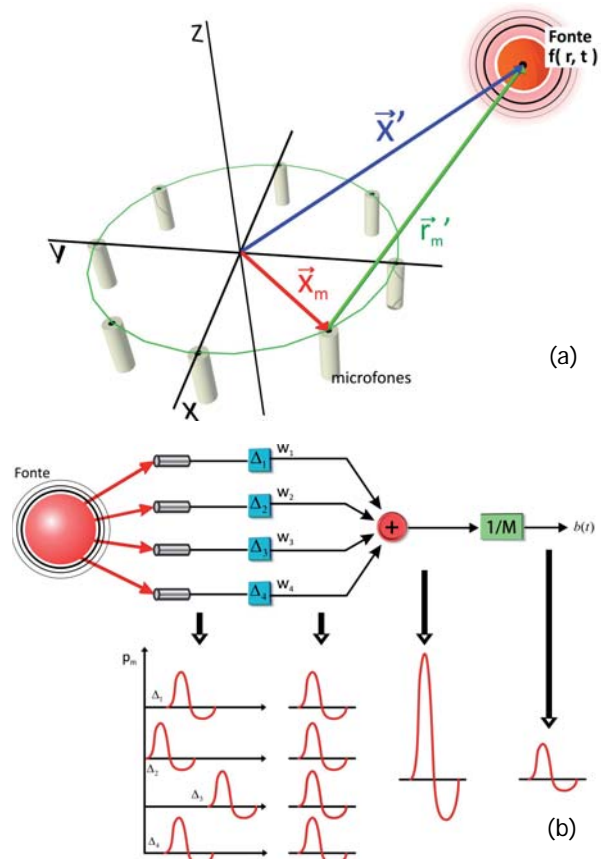


Fig. 1. a. Diagrama mostrando una fuente puntual y un *arrays* simple en el plano xy ; b. Diagrama del *beamforming* de atraso y suma, en el dominio del tiempo.⁶

La descripción completa de la técnica puede ser encontrada en Johnson y Dudgeon⁷ y en Van Veen y Buckley,⁸ así como la de los algoritmos avanzados en Dougherty⁹ y Gerges *et al.*¹⁰ Más detalles sobre la evolución de la técnica también pueden ser consultados en Michael¹¹ y en otras referencias.

Beamforming aplicado a fuentes en movimiento

En aplicaciones como las de sobrevuelo (*fly-over*) de aeronaves y las pruebas de *pass-by* vehiculares, la fuente a ser medida se desplaza considerablemente durante el tiempo de la medición. Uno de los métodos para abordar este problema en el *pass-by* es crear una malla virtual fija en el plano lateral del vehículo (figura 2), la cual se mueve junto con el objeto en movimiento.^{12,13} Como las mediciones son hechas desde un punto fijo conocido, el *array* sufre el efecto de corrimiento en frecuencia, conocido como Efecto Doppler. Los micrófonos reciben los frentes de onda con atraso variable y dependiente de la trayectoria de la fuente.

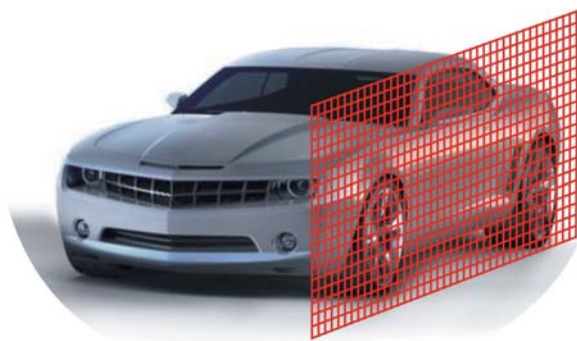


Fig. 2. Malla virtual lateral al vehículo.

Para poder realizar una suma coherente de las señales, el efecto Doppler debe ser corregido. Este proceso es llamado desdopplerización, desarrollado detalladamente por Fonseca⁶ y Kook *et al.*,¹² el cual también incluye la corrección de amplitud. De este modo es como el arreglo de micrófonos acompañaría la malla virtual a cada posición, o sea, la distancia relativa entre ellos es siempre la misma (figuras 2 y 5.a.).

Para entender mejor el efecto de la desdopplerización, se comparan dos resultados de una misma medición y una misma frecuencia. En la figura 3, se tiene el resultado sin la corrección del Efecto Doppler, el resultado es borroso y la

amplitud no expresa el valor real de presión para esta frecuencia. En la figura 4 se tiene el mismo resultado con la desdopplerización efectuada; nótese que la frecuencia y la amplitud fueron corregidas.



Fig. 3. Medición sin la desdopplerización.

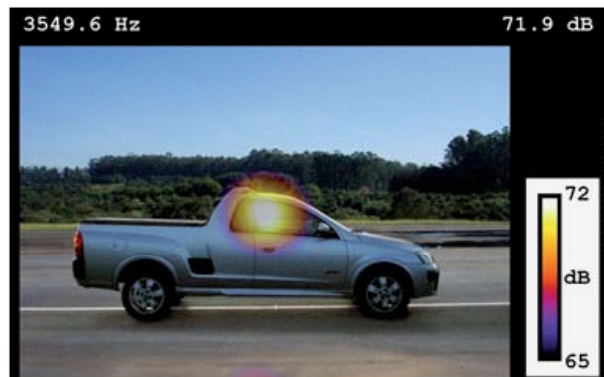


Fig. 4. Medición con la desdopplerización.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y CALIBRACIÓN

Configuración experimental

El sistema de *beamforming* utilizado fue desarrollado por el equipo de la UFSC.^{5,6} Está compuesto por un arreglo de 32 micrófonos dispuestos en espiral, cuyo diámetro máximo es de 1.0 m entre los micrófonos, montado en un armazón metálico (figura 5.a.).

Para que las mediciones fueran hechas en las mismas condiciones impuestas para la prueba normalizada de *pass-by*, se adoptó la misma configuración prevista en ISO¹ y ABNT³, colocando el *array* de micrófonos en la misma posición donde es colocado el micrófono en la prueba normalizada, o sea, a 7.5 m de la línea central de paso del vehículo, y con su centro a 1.2 m del suelo (figura 6).

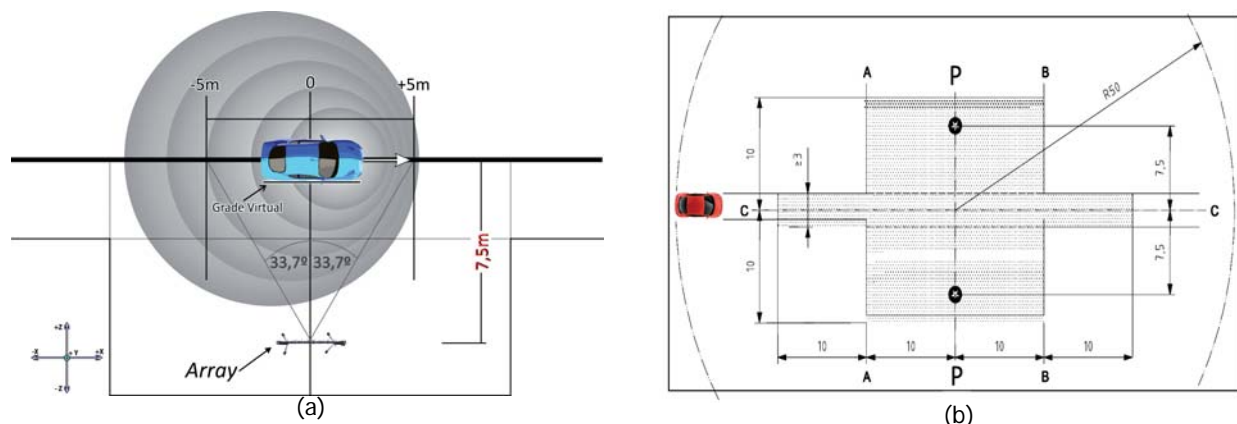
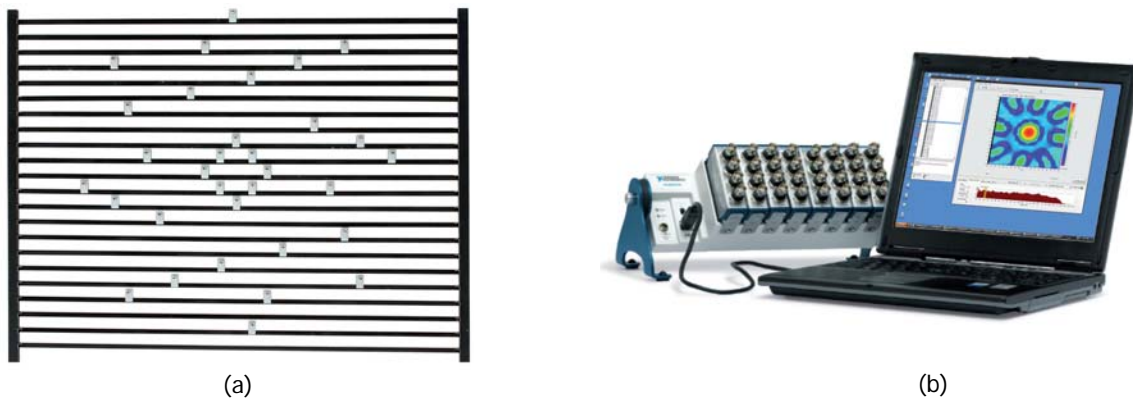


Fig. 6. a. Detalle de la configuración de medición, se muestra la posicionamiento del array y el ángulo de apertura; b. Esquema de espacio para la medición, con cotas de acuerdo a las normas ISO y ABNT.

El ángulo de apertura de este array está en torno a los 67° en las dos orientaciones, xz y yz , (figura 5.a.), esto para la distancia de 7.5 m de la línea central de medición de acuerdo a la norma, lo que determina que el área visible del array es de aproximadamente 10.0 m. Tomándose el centro del array como cero, las mediciones son calculadas de -5.0 m a +5.0 m (figura 6).

La captura de la información de los 32 micrófonos fue hecha simultáneamente por un convertor A/D de 24 bits, a una tasa de 50 mil muestras por segundo (figura 5.b.).

Calibración

Calibración de la foto

Para la calibración de los datos de la medición acústica y de las fotos del experimento,¹⁴ se utilizaron dos procedimientos: uno con cajas acústicas estáticamente posicionadas en la línea de medición;

y una situación dinámica, en la que una bocina (componente principal 2.2 kHz; 90 dB) era accionada durante el paso del vehículo a una velocidad aproximadamente constante de 50 km/h.

El procedimiento dinámico con la bocina fue escogido para las pruebas pues trae resultados satisfactorios, es más rápido y genera el mismo tipo de recopilación de datos que la medición de *pass-by*. La figura 7.a. muestra la posición de la bocina dentro del vehículo, y la figura 7.b. muestra la imagen acústica obtenida, la cual corresponde a la posición física de la fuente, demostrando así, el alineamiento correcto del sistema.

Calibración de los micrófonos

La calibración de cada uno de los 32 micrófonos fue hecha previamente a la medición, posibilitando así resultados absolutos de la presión sonora, consultar Fonseca.⁶



Fig. 7. a. Posición en que la bocina fue accionada; b. Procesamiento de la señal de referencia de 6.30 kHz, La escala dinámica coloreada (ver versión en Internet de la revista) en dB relativa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los pruebas realizados en pista, la condición de temperatura medida fue alrededor de 30 °C. Tres condiciones fueron probadas: velocidad constante a 50 km/h; velocidad constante a 70 km/h; y la condición establecida por la norma ISO 362.³

Prueba a Velocidad constante de 50km/h

En esta prueba el vehículo atravesó toda la pista a una velocidad constante de aproximadamente 50 km/h (ver figuras 8 y 9). Para esta velocidad la amplitud de presión sonora a 1 kHz, procesada en banda de 1/12 de octava, fue de 53 dB.

A frecuencias más bajas la dispersión del lóbulo principal del procesamiento del *beamforming* es mayor debido a las limitaciones del *array* (gran longitud de la onda), así, la localización exacta de las fuentes se vuelve más difícil; en las figuras 8, 10 y 12 es posible percibir ese efecto. La escala dinámica (coloreado) muestra un *beamforming*

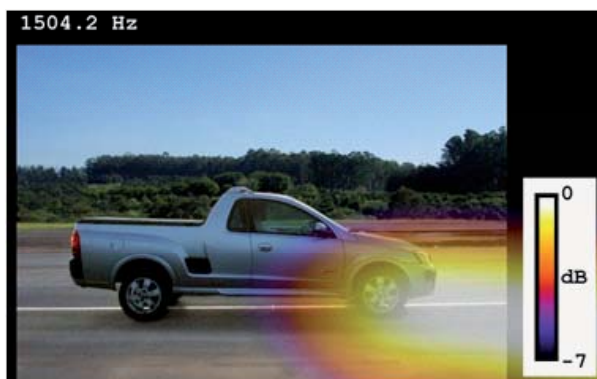


Fig. 8. Ruido de paso a 50 km/h; 1,50 kHz

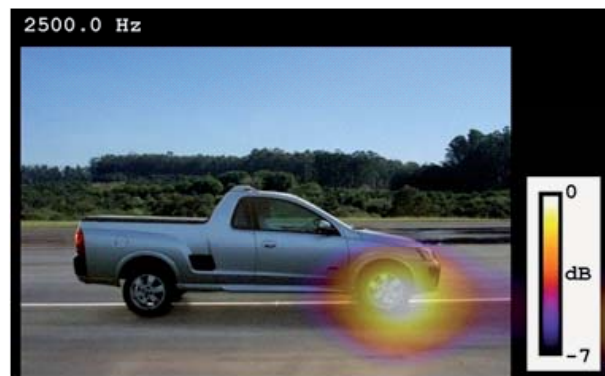


Fig. 9. Ruido de paso a 50 km/h; 2.50 kHz.

siempre pequeño (de cero a -8 o -9 dB), lo que es una desventaja de este método.

Prueba a Velocidad constante de 70km/h

En esta prueba el vehículo atravesó toda la pista con velocidad constante de aproximadamente 70 km/h (ver Figuras 10 y 11). Para esta velocidad la amplitud de presión sonora a 1 kHz, procesada en banda de 1/12 de octava, fue de 53dB.

En el caso de la figura 9 se percibe que el ruido de tracción de la rueda delantera combinado al de la masa de la rueda está por lo menos a 7 dB arriba de otras posibles fuentes, mientras que en la figura 11 se percibe que posiblemente la parte central del sistema de escape tiene la misma intensidad de energía que el ruido emitido por el motor en esa banda de frecuencia.

Prueba en la condición establecida por la norma ISO

En esta prueba se procuró atender las exigencias de la norma internacional ISO 362.³ La norma



Fig. 10. Ruido de paso a 70 km/h; 1.50 kHz.

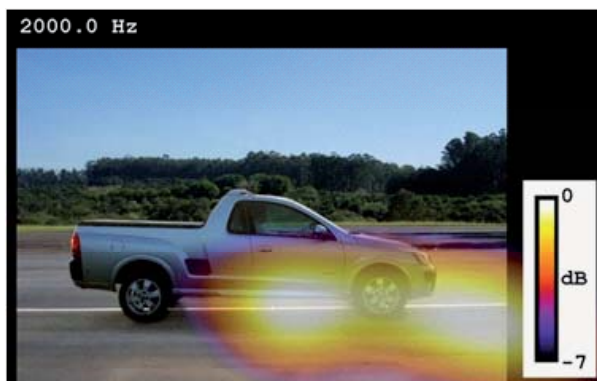


Fig. 11. Ruido de paso a 70 km/h; 2.00 kHz.

brasileña NBR 15145¹ sigue la ISO, y hace exigencias semejantes. Como es especificado en las normas, la prueba debe seguir el siguiente procedimiento: el vehículo se aproxima a la línea AA (figura 6) a 50 km/h y con trayectoria de su línea central lo más próximo de la línea CC. Cuando el frente del vehículo alcanza la línea AA, el acelerador debe ser accionado totalmente y tan rápido como sea posible, y manteniéndolo completamente accionado hasta que la parte trasera del vehículo alcance la línea BB, momento en que el acelerador debe ser liberado.

Como es explicado en el punto anterior, el área visible del *array* es de 5.0 m para cada lado a partir de la línea central PP (figura 6). En las telemetrías de este tipo de prueba se verificó que en este intervalo de 10.0 m la velocidad del carro varía de 2 km/h a 3 km/h con respecto a la velocidad de 50 km/h, luego, para el procesamiento de los resultados fue considerado un paso a velocidad constante de 51.5 km/h (figuras 12 a 15). Para esta velocidad, la amplitud de presión sonora a 1 kHz, procesada en banda de 1/12 de octava fue de 53 dB.

Como se comentó anteriormente, a frecuencias más bajas, como en la figura 12, la posición de la fuente no es clara. Para reducir este problema, una primera acción sería disminuir el rango de la escala dinámica, para así localizar mejor la fuente. Otras opciones (manteniendo la distancia de medición) serían: utilizar un algoritmo de *beamforming* diferente, eliminar fuentes, utilizar procesamiento en subespacios, entre otras.

El procedimiento ISO contempla estimar un tipo de “el peor caso” al forzar el motor en el momento en que el vehículo pasa por la región de medición. De este modo, en la mayoría de los casos los valores absolutos de presión sonora de la prueba ISO son superiores a los valores de las pruebas de velocidad constante. Aun así, puede haber casos en que los valores absolutos tienen el mismo nivel. Es importante saber que estos valores en dB son completamente dependientes del ancho de banda que se utiliza. En los resultados presentados en este trabajo el ancho utilizado fue de 1/12 de octava, no obstante, anchos diferentes llevarán a valores y mapas sonoros diferentes.¹⁵

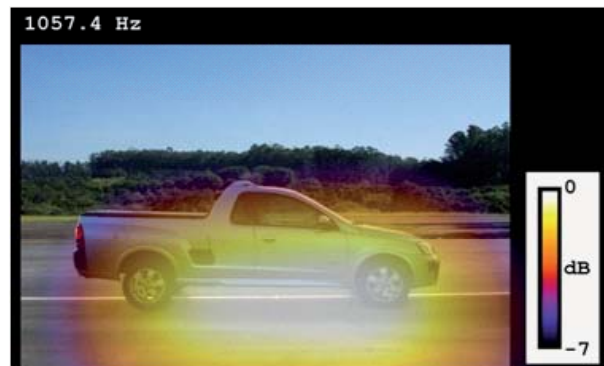


Fig. 12. Ruido de paso a 51.5 km/h; 1.05 kHz.

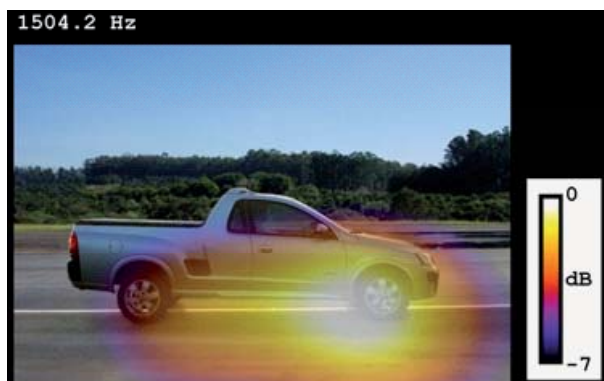


Fig. 13. Ruido de paso a 51.5 km/h; 1.50 kHz.



Fig. 14. Ruido de paso a 51.5 km/h; 1.89 kHz.

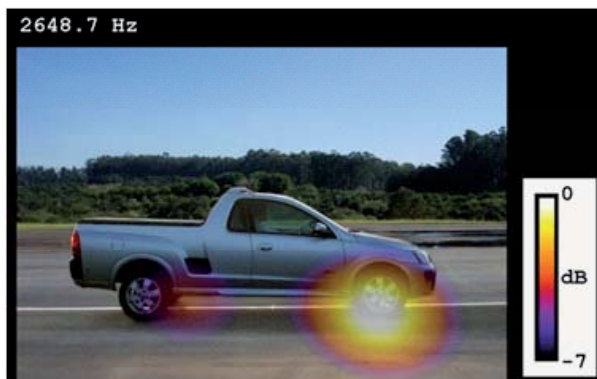


Fig. 15. Ruido de paso a 51.5 km/h; 2.64 kHz.

Con el análisis de diversas mediciones de *pass-by* y diversos modelos de carros,⁶ se puede notar que las diferencias en el patrón de radiación sonora de vehículos distintos son dependientes de su construcción o clase, teniendo en cuenta que los caminos de transmisión pueden ser completamente diferentes. Sin embargo, se notó que de forma general las fuentes prominentes en todos los vehículos estuvieron concentradas en los siguientes elementos: motor, sistema de transmisión, sistema de escape, neumáticos y masa de la rueda.

Como se dijo, el ancho de banda determinará el mapa. Al utilizar bandas más anchas, como de 1 octava o 1/3 de octava, se observó en algunos vehículos que hay una tendencia en los mapas de generar imágenes con predominancia del ruido de los rodamientos de las ruedas.

Incluso, como es mostrado en algunas figuras, no es posible la separación entre algunos elementos debido a su características de proximidad o interacción mutua de las fuentes. En la figura 13, por ejemplo, hay

“una fuente” cercana a la rueda delantera. Esta fuente es, posiblemente, una combinación entre: interacción de tracción de neumático y suelo; masa de la rueda delantera y radiación de ruido de motor hacia el suelo. En esa misma figura se observa que además de esa fuente principal existe “otra fuente” distribuida, que en esa frecuencia, podría ser el sistema de escape y/o el sistema de transmisión.

Para una mejor interpretación de los resultados de la técnica, el conocimiento del vehículo en detalle se hace necesario, en el sentido de posibilitar el conocimiento previo de las características de cada componente y en base a las imágenes proveídas por el *beamforming* poder desarrollar soluciones para mitigar el ruido.

CONCLUSIONES

La técnica de *beamforming* es adecuada para la medición de fuentes en movimiento, obteniéndose así resultados visuales que ayudan a elucidar las posibles fuentes sonoras responsables de la mayor contribución en el ruido total de paso del vehículo.

La estructura de medición debe ser cuidadosamente preparada para que problemas o fallas como condiciones naturales desfavorables, micrófonos averiados, o altos niveles de ruido de fondo, no interfieran en los resultados finales y permitan obtener una escala dinámica de medición confiable.

Un punto que no fue probado, pero que podría ser discutido, junto a las entidades reguladoras, para futura reglamentación, sería la prueba para velocidades de vehículos mayores, ya que existen comunidades instaladas en los alrededores de vías rápidas y autopistas, la cual posibilitaría estimar el ruido producido en el vehículo por la interacción aire-estructura.

El posprocesamiento se debe restringir de acuerdo a los límites de medición del *array*, para que no haya resultados erróneos o “imágenes fantasmas”.

El Efecto Doppler debe ser corregido para el intervalo correcto del evento, de modo que no inserte errores de corrimientos de frecuencia y amplitud.

AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer al CNPq por el apoyo financiero y a los bolsistas y técnicos por la valiosa ayuda con las mediciones.

REFERENCIAS

1. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 15145:2004: Acústica – Medição do ruído emitido por veículos rodoviários automotores em aceleração – Método de Engenharia, Brasil, Nov. 2004.
2. Resolução CONAMA nº 272 de 14 de setembro de 2000, Brasil, Jan. 2001.
3. International Organization for Standardization. ISO 362-1:2007: Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Engineering method, Jun. 2007.
4. Gerges, S. N. Y.; Machado W. D.; Ruídos e Vibrações Veiculares, Primeira Edição, Cap. 24, NR Editora, 728 p., Florianópolis, SC, Brasil, 2005.
5. Ribeiro, Y. A.; Fonseca, W. D.; Gerges, S. N. Y.; Desenvolvimento de um sistema de baixo custo utilizando de microfones para identificação de fontes de ruído veicular, SAE Paper 2007-01-2929, Congresso SAE Brasil 2007, São Paulo, SP, Brasil, Nov. 2007.
6. Fonseca, W. D.; Desenvolvimento e Aplicação de Sistema para Obtenção de Imagens Acústicas pelo Método do Beamforming para Fontes em Movimento. Dissertação de Mestrado em Acústica e Vibrações, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2009.
7. Johnson D. H.; Dudgeon D. E.; Array Signal Processing: Concepts and Techniques, 1st Edition, Prentice-Hall, 533 p., New Jersey, USA, 1993.
8. Van Veen, B.D.; Buckley, K. M.; Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering, IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine, pp. 2-24, Apr. 1988.
9. Dougherty, R. P.; Advanced Time-domain Beamforming Techniques, AIAA Paper 2004-2955, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, Great Britain, May 2004.
10. Gerges, S. N. Y.; Fonseca, W. D.; Dougherty, R. P.; Distinguish lecture: State of the Art Beamforming Software and Hardware for Applications, The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration - ICSV, Kraków, Poland, Jul. 2009.
11. Michael, U.; History of Acoustic Beamforming, BeBeC 2006 – 1st Berlin Beamforming Conference, Berlin, Germany, Nov. 2006.
12. Kook, H.; Moebs, G. B.; Davies P.; Bolton, J. S.; An Efficient Procedure For Visualizing The Sound Field Radiated By Vehicles During Standardized Passby Tests; Journal of Sound and Vibration, Vol. 233, Issue 1, Pp. 137-15625, May 2000.
13. Sijtsma, P.; Oerlemans, S.; Holthusen, H.; Location of Rotating Sources by Phased Array Measurements, AIAA Paper 2001-2167, 7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, Netherlands, May 2001.
14. Dougherty, R. P.; Noise Source Imaging by Beamforming, SAE Paper 2008-36-0518, SAE Brasil Noise and Vibration Conference - NVH, Florianópolis, SC, Brasil, Mar. 2008.
14. Fonseca, W. D.; Ristow, J. P.; Sanches D. G.; Gerges, S. N. Y.; Bandwidth Comparison on PSFs Simulations using Classical Beamforming, Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark, Jun. 2011.