
XIII Congreso Argentino de Acústica
VII Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas
Buenos Aires, 29 y 30 de octubre de 2015

AdAA2015-A009

**Diseño e implementación de una barrera acústica
para motores fuera de borda en embarcaciones náuticas
de recreo**

Leandro Rodiño^(a),
Florent Masson^(a).

(a) Departamento de Acústica, Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero, Valentín Gómez 4752, Caseros, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Abstract

This paper proposes a possible solution to the problem of noise caused by outboard motors of recreational crafts on the crew. An acoustic barrier is designed and built with tilt and edges for placement in the near field preventing direct airborne sound transmission between the motor and the crew. A measurement protocol is then proposed and the impact of the barrier both on the crew and on the environment is assessed. Finally, a subjective test is conducted to examine if the noise barrier reduces the engine noise annoyance. An effective reduction of sound pressure level (insertion loss) of up to 5.7 dB is measured at the crew position and the noise impact on the environment is not significant. The results and systematic errors are analyzed. From a subjective test, 78 % of the population surveyed perceived the engine noise without the barrier as more annoying.

Resumen

Este trabajo propone una posible solución al problema del ruido ocasionado por los motores fuera de borda de pequeñas embarcaciones náuticas sobre los tripulantes. En primer instancia se diseña y construye una barrera acústica con inclinación y bordes para su colocación en el campo cercano evitando la transmisión directa del ruido aéreo entre la fuente sonora y el receptor. Luego se propone un protocolo de medición y se evalúa el impacto que genera la barrera tanto sobre el tripulante como la contribución que puede afectar al medioambiente. Por último se expone a un grupo de personas a un test subjetivo para determinar si el ruido percibido con la implementación de la barrera resulta efectivamente menos molesto. Se registra una reducción del nivel de presión sonora en la posición del tripulante de hasta 5.7 dB y no se presentan aportes de ruido al medioambiente. Se inspeccionan los resultados y se analizan los errores sistemáticos. El 78 % de la población encuestada percibe el ruido del motor sin el uso de la barrera como más molesto.

1 Introducción

Las actividades desarrolladas en las zonas portuarias y ríos interiores del país están comúnmente asociadas al comercio internacional en buques de carga y pesqueros y a la recreación náutica deportiva en lanchas, semi-rígidos y veleros. Este último grupo de embarcaciones se caracteriza por utilizar motores de gran potencia por fuera del agua en la popa del barco, normalmente a una distancia lo suficientemente próxima del conductor y los tripulantes, generando desde una disminución del confort hasta una molestia severa e imposibilidad de llevar a cabo una conversación, dependiendo de las características propias del motor. En muchos casos, se registraron severas pérdidas de audición debido al ruido en tripulaciones expuestas diariamente a niveles de presión sonora entre 84,7 y 94,3 dBA (Zytoon, 2009).

Muchos estudios se centran en el ruido emitido por grandes buques (mayores o iguales a 1.600 GT) y sobre el impacto sobre la tripulación y los habitantes de las zonas portuarias (Badino, 2012; Badino, 2010; Beltrán, 2013). La norma actual propuesta por la Organización Marítima Internacional (IMO, 1981), adoptada a nivel nacional por la Prefectura Naval Argentina, establece los protocolos de medición para este tipo de barcos y los niveles de presión sonora máximos admitidos a bordo. No se han realizado estudios sobre el impacto del ruido del motor sobre de la tripulación en el caso de las embarcaciones de recreo.

A través de mediciones, en este trabajo de investigación se evalúa una situación acústica real de una embarcación de recreo impulsada por un motor fuera de borda con el fin de optimizar el diseño de una barrera acústica como medida de control de ruido. Se tiene la intención de reducir el nivel de presión sonora en la posición de la tripulación sin afectar el rendimiento ni el diseño de la embarcación.

2 Análisis del problema

Se utiliza un semi-rígido de 4,9 m de eslora propulsado por un motor nuevo de 60 HP de cuatro tiempos con hélice de tres palas. Las mediciones se realizan en un canal de navegación alejado de superficies verticales reflejantes. Se puede considerar como un campo libre sobre un plano reflejante. Se utilizan para las mediciones un medidor de nivel de presión sonora clase 1 y un sistema de grabación mono. Dos posiciones, P1 y P2, se utilizan en este trabajo como se muestra en la figura 1. Se encuentran ubicados respectivamente a 1,1 y 0,5 m de la fuente respectivamente. P1 corresponde a la posición del conductor (capitán) y es el punto de interés principal. P2 sólo se utiliza como una posición comparativa para la prueba de la preferencia subjetiva.

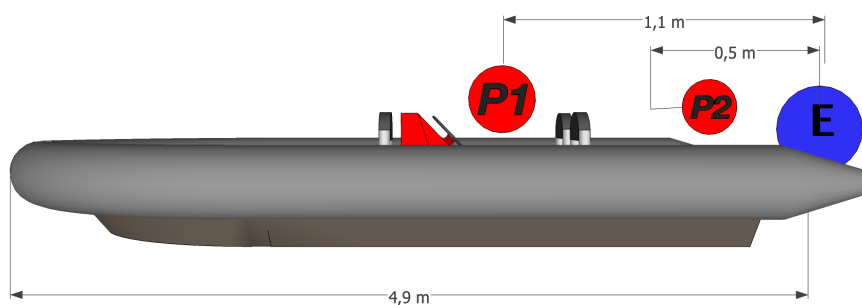


Figura 1. Vista lateral del semi-rígido y las distancias entre el motor (fuente emisora E) y los puntos de medición en el receptor P1 y P2.

El barco debe alcanzar la velocidad nominal sugerida por el fabricante. En este caso, la velocidad es de aproximadamente 40 km/h que se corresponde con el 75 % de la potencia máxima y el máximo rendimiento de la embarcación, definido por el fabricante como la velocidad de diseño. En el caso del 100 % de la potencia máxima, la velocidad alcanzada por el barco es de aproximadamente 60 km/h. El sonómetro se coloca a 1,1 m de altura de acuerdo con la altura del oído de una persona sentada en el barco. El operador de la medición, en contra de las recomendaciones de los estándares de uso de trípode, debe sostener el sonómetro con las manos debido al riesgo asociado a los movimientos del barco y la proximidad al agua. Se encuentra de pie entre la proa y el equipo con el fin de no obstaculizar el sonido directo.

En la posición P1 se mide un nivel de presión sonora equivalente de 79,9 dBA, en modo lento, procedente de la fuente. La figura 2 muestra los niveles por bandas de tercio de octava. El nivel de ruido de fondo está más de 30 dB por debajo del nivel de la señal en todas las bandas de interés, desde 31,5 a 20 000 Hz. Incluso si el nivel está por debajo del máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1998), el espectro de ruido de banda ancha del motor puede causar fatiga auditiva, especialmente con actividades de ocio.

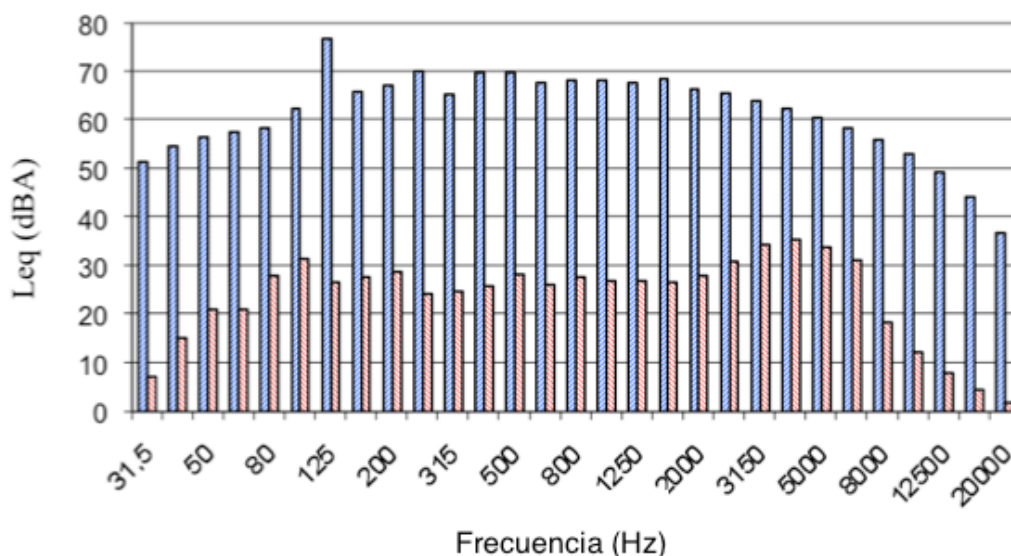


Figura 2. Nivel de presión sonora por bandas de tercio de octava generado por el motor con la embarcación navegando a 40 km/h (azul) y ruido de fondo (rojo) medidos en P1 (posición del oyente).

Teniendo en cuenta la contribución espectral de la voz humana al hablar (Carrión, 1998) y el ruido generado por el motor en la posición del oyente se puede afirmar que el orador tendrá que gritar para evitar el enmascaramiento de su voz.

3 Diseño de la barrera

3.1 Optimización de los ángulos en los bordes de la barrera

En la primera etapa se busca la mejor inclinación de los bordes de la barrera que proporcionan un mejor rendimiento en términos de pérdida de inserción. Varios estudios (Liu, 2009; Fard, 2013; Foss, 1976; Fernández, 2009) proponen un análisis empírico de cómo encontrar el ángulo óptimo para los bordes de la barrera o extremidades multifurcadas. Estos

muestran que generalmente depende de las condiciones iniciales del experimento. Por esta razón, se busca un método para encontrar los ángulos que maximizan la pérdida por inserción de la barrera de acuerdo con las variables iniciales tales como la altura, la distancia entre el emisor, el receptor y la barrera, junto con la geometría de la misma.

Usando la teoría de barreras (MacDonald, 1915; Carslaw, 1920; Maekawa, 1968; Kurze, 1971; Kurze, 1974; Menounou, 2001) y herramientas computacionales, se puede lograr un desarrollo analítico para todos los posibles ángulos de borde de una barrera. La figura 3 muestra las referencias de variables que definen las distancias entre la fuente, el receptor, la barrera y el suelo.

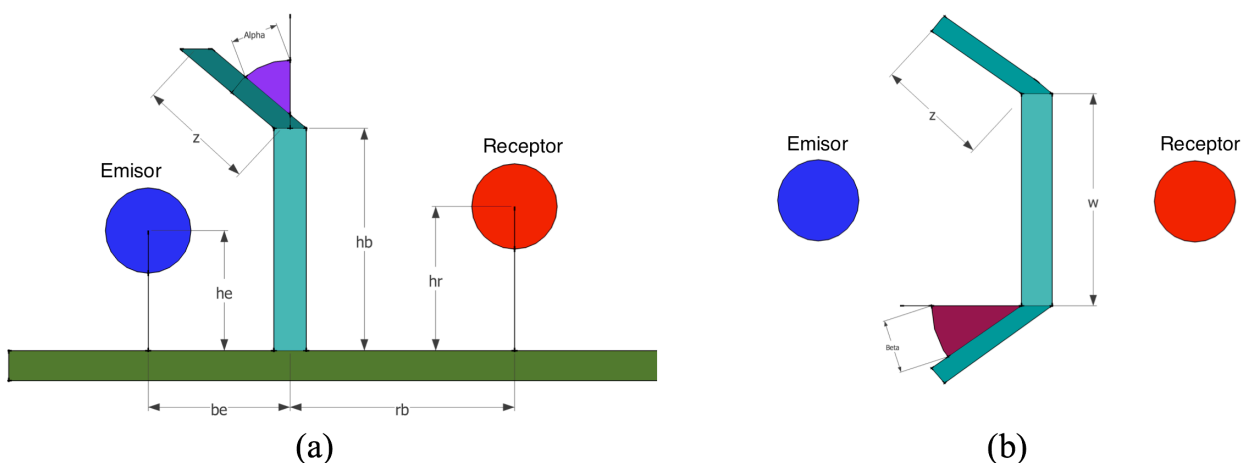


Figura 3. (a) Vista lateral, variables expresadas en metros, ángulo α . (b) Vista superior, variables expresadas en metros, ángulo β .

De acuerdo con la teoría de Maekawa y el teorema de Pitágoras, A, B, y d se pueden calcular, siendo A la distancia entre la fuente y el punto de difracción límite de la barrera, B la distancia entre el receptor y este mismo punto, y d la distancia entre el punto A y B. El mismo procedimiento se puede realizar en el plano horizontal para calcular las distancias laterales Al, Bl y dl.

Una vez que se obtienen estos valores, los números de Fresnel se analizan para cada banda de tercio de octava y se estima un valor promedio de pérdida por inserción. Este procedimiento se repite para cada ángulo superior y lateral hasta alcanzar el ángulo de noventa grados, inclinación máxima de borde que corresponde a un borde en forma de T.

Se obtienen en la figura 4 las curvas promedio de pérdida de inserción para cada ángulo utilizando los datos de entrada para esta situación particular (tabla 1).

Tabla 1. Data de entrada de acuerdo a la situación inicial para calcular la optimización de los ángulos

Variable	rb	be	hr	hb	he	w	z	m
Magnitud (metros)	1,1	0,9	1,1	1,1	1	0,5	0,3	0,3

De esta manera, se pueden encontrar los mejores ángulos optimizados en términos de pérdida por inserción: un ángulo entre 0 y 60° para α y un ángulo entre 0 y 25° para β . Para facilitar la construcción se eligen $\alpha = 45^\circ$ y $\beta = 20^\circ$.

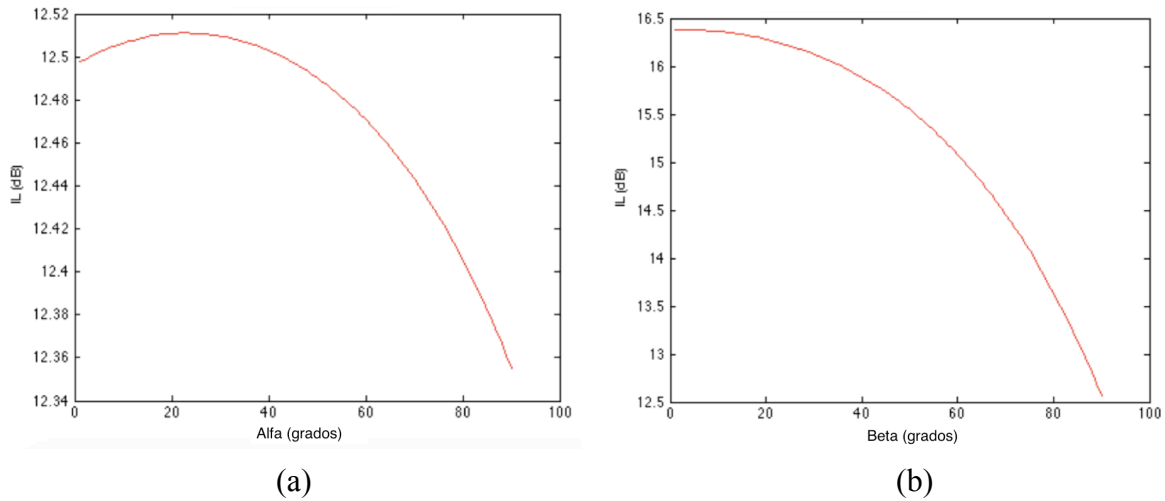


Figura 4. (a) Pérdida por inserción promedio en función del ángulo del borde superior de la barrera. (b) Pérdida por inserción promedio en función del ángulo del borde lateral de la barra.

3.2 Diseño estructural y construcción

Debido a que el barco se utilizará con velocidades de aproximadamente 40 km/h es de principal importancia el diseño aerodinámico de la barrera. Suponiendo una superficie efectiva de 0,5 m² para el motor, la barrera tendrá una superficie vertical sustancial interactuando con el flujo de aire opuesto al movimiento de la embarcación. Teniendo en cuenta esto, una superficie curva se construirá en la dirección opuesta de la navegación. La figura 5 muestra un posible diseño.

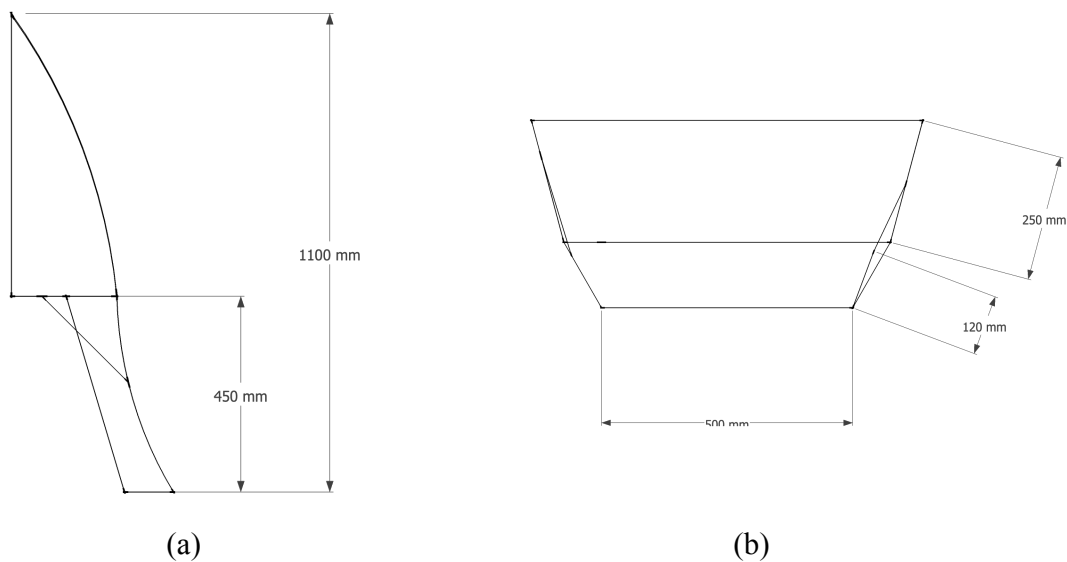


Figura 5. (a) Vista lateral de la barrera. (b) Vista superior de la barrera.

Con el fin de reducir la energía que puede pasar a través de la barrera (Hopkins, 2007), y para respetar el valor de la densidad superficial de 10 kg/m^2 recomendado en la norma (ISO 9613, 1996), se construye una estructura de sándwich de MDF, barrera acústica y fibra de vidrio. Esta configuración alcanza un valor de pérdida por transmisión de aproximadamente 25 dB. La figura 6 muestra el resultado de un prototipo de esta barrera de acuerdo con el diseño propuesto instalado en la embarcación de prueba.



Figura 6. Prototipo de la barrera instalado en el semi-rígido de prueba.

4 Impacto acústico

La figura 7 muestra la pérdida por inserción de la barrera para los distintos modos de funcionamiento del motor: potencia máxima del motor al 100 % (60 km/h, 6000 rpm), potencia nominal del motor sugerida por el fabricante al 75 % (40 km/h, 3750 rpm) y el motor en punto muerto. La pérdida de inserción se obtiene restando los niveles de presión sonora obtenidos en la posición del receptor (P1) con la barrera de los niveles obtenidos sin la barrera.

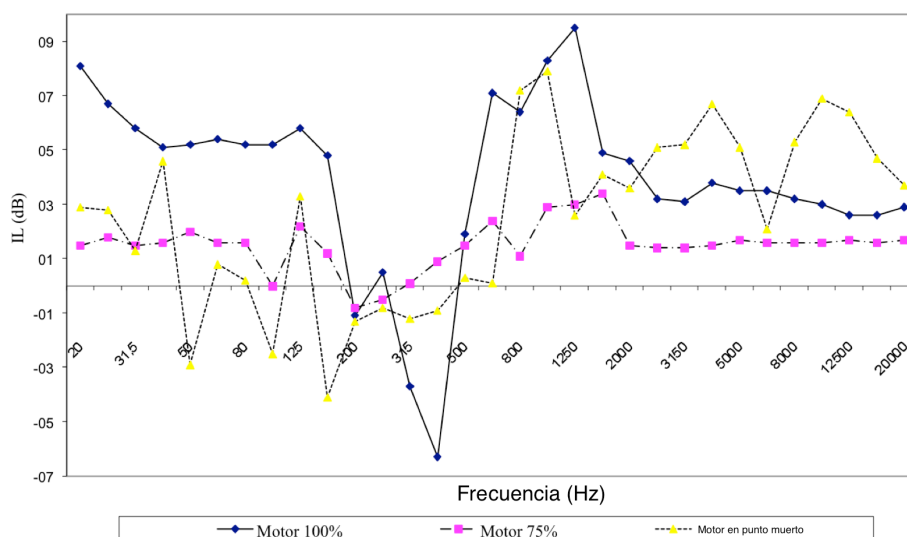


Figura 7. Pérdida por inserción de la barrera según distintos modos de operación del motor.

Si bien para todos los modos de funcionamiento se presentan valores de pérdida por inserción en su mayoría positivos, los resultados entre estos difieren significativamente. Por definición, la pérdida de inserción es una propiedad inherente de la barrera y no debe cambiar en función del tipo de ruido generado. En este caso, la figura 7 muestra diferencias significativas entre cada uno de los modos de funcionamiento que pueden explicarse por el hecho de que la barrera se coloca en el campo cercano de la fuente y que la directividad de la fuente puede cambiar de acuerdo a cada modo de funcionamiento, según las frecuencias que excite respectivamente.

Las diferencias registradas se deben a errores sistemáticos en la metodología de medición. Por un lado, el operador está de pie en el barco sosteniendo el sonómetro haciendo un vínculo mecánico entre el barco y el equipo de medición. Esto añade una incertidumbre importante de la medición especialmente en las frecuencias bajas. Por otro lado, mientras el barco navega ocurren efectos de cavitación, ruidos de la hélice del barco y choques entre el agua y la embarcación, generando un piso de ruidos fluctuantes añadiendo incertidumbre en la medición en su mayoría en medias y altas frecuencias. Además, cuando el barco alcanza los 40 km/h el sonómetro se expone a una corriente de aire importante que afectará la medición, incluso colocando el protector anti-viento. Todos estos factores conforman un importante nivel de ruido de fondo de la medición in-situ.

Los niveles de pérdida de inserción se presentan en la tabla 2 según los distintos modos de funcionamiento del motor medidos en el punto P1, para valores globales con y sin ponderación A.

Tabla 2. Niveles de presión sonora globales con y sin ponderación A, para los distintos modos de funcionamiento del motor con y sin la implementación de la barrera.

	Global Z (dB)		IL (dB)	Global A (dBA)		IL (dB)
	Sin barrera	Con barrera		Sin barrera	Con barrera	
Motor 100%	117,6	111,9	5,7	89	87,9	1,1
Motor 75%	106,5	104	2,5	81,5	80	1,5
Motor punto muerto	73,8	73,3	0,5	55,4	53,7	1,7

La tabla 3 muestra el nivel de presión sonora máximo (ponderado A/Lento) obtenido en la bahía mientras el barco pasa por el canal, con y sin la barrera. Las mediciones se realizan según la norma (ISO 14509, 2008).

Tabla 3. Nivel de presión sonora máximo ponderado A/ Lento emitido por la embarcación sobre la bahía.

	Sin barrera	Con barrera
LpAS Max (dBA)	60,1	59,6

Los resultados muestran que la contribución del motor con la barrera en el punto registrado sobre la bahía no es significativa, pasando de 60,1 a 59,6 dBA. El sonido del motor se refleja en la parte trasera de la embarcación debido a la inclinación de la barrera. Esto no tiene ningún efecto significativo en la distribución de energía sobre la bahía y sus posibles habitantes y no cambia el impacto acústico en el medio ambiente.

Se realiza una prueba subjetiva mediante una prueba de comparación de pares. Se evalúan 51 sujetos de entre 20 y 27 años de edad con audición normal. Se utiliza un sistema de sonido en un laboratorio con niveles extremadamente bajos de ruido de fondo. Un video muestra a los oyentes con el fin de recrear la situación a bordo. El sistema de sonido se encuentra a 1,1 m de los oyentes según la posición P1. Se presentan cuatro estímulos sonoros registrados de la siguiente manera: A) 1,1 m con la barrera, B) 1,1 m sin la barrera, C) 0,5 m con la barrera y D) 0,5 m sin la barrera. Se presentan los estímulos apareados y se pide a los sujetos que elijan el sonido más molesto o si se consideran ambos sonidos igual de molestos.

Cada uno de los 51 sujetos presenta un coeficiente de consistencia mayor a 0.625, por lo que todos ellos son considerados para el análisis estadístico. Se verifica la ley Thurstone de juicio comparativo (caso V) para una distribución normal del proceso discriminativo de las sentencias de dos estímulos y por la distancia psicológica entre ellos (Thurstone, 1927). La tabla 4 presenta las probabilidades para cada pares de estímulos. Se representa la suma de las preferencias de estímulo en la columna lateral de acuerdo con los valores superiores dividido por la cantidad de sujetos evaluados.

Tabla 4. Probabilidades obtenidas de acuerdo a la molestia percibida por el ruido generado por el motor con y sin la barrera.

	Stimuli A	Stimuli B	Stimuli C	Stimuli D
Stimuli A	0.5	0.22	0.02	0.01
Stimuli B	0.78	0.5	0.04	0.01
Stimuli C	0.98	0.96	0.5	0.6
Stimuli D	0.99	0.99	0.4	0.5

El estímulo A corresponde al ruido del motor con la barrera en la posición del receptor P1 y el estímulo B corresponde al ruido del motor sin la barrera en la misma posición. Se puede observar que 78 % de los sujetos perciben el ruido del motor menos molesto cuando la barrera está presente.

5 Discusión y conclusiones

El uso de una barrera en la proximidad del campo cerca de una fuente de sonido puede ser una posible solución para reducir la molestia y nivel de presión sonora del ruido generado por el motor fuera de borda de un barco de recreo incluso si las mediciones in-situ muestran algunos resultados cuestionables.

Algunos factores afectan considerablemente la incertidumbre de la medición. Sujetar manualmente el sonómetro, el flujo de aire en el equipo de medición debido al movimiento del barco y de las fuentes de ruido externas del choque entre el barco y el agua son todos los parámetros que afectan a la medición in-situ.

Por otro lado, el impacto del ruido de la barrera no es significativo al medio ambiente pasando de 59,6 a 60,1 dBA con y sin la implementación de la barrera. Las reflexiones sobre la barrera están orientadas a la parte trasera del barco debido a su ángulo de inclinación.

Una prueba subjetiva muestra que el 78 % de los oyentes perciben como menos molesto el ruido del motor cuando la barrera está presente.

6 Trabajo futuro

Este trabajo de investigación utiliza diferentes normas internacionales para medir el ruido de los motores de barcos y buques. Sin embargo, no existe una metodología específica para este tipo de embarcaciones náuticas. Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo, sería de interés crear una metodología específica para evaluar el nivel de presión sonora en una embarcación de recreo. También es necesario implementar un método de cálculo BEM con el fin de predecir el comportamiento de la barrera dado que la teoría matemática de análisis no es exacto en situaciones en que el tamaño de la barrera es comparable con el tamaño de la fuente, y especialmente cuando hay tantos factores de incertidumbre involucrados.

Referencias

- Badino, A. et al. (2010). "Managing the environmental sustainability of ports: noise pollution". ICEMT.
- Badino, A. et al (2012). "Noise emitted from ships: Impact inside and outside the vessels". Transport Research Arena, Athens, Greece.
- Badino, A. et al. (2012). "Control of airborne noise emissions from ships". MARNAV, Glasgow, Scotland.
- Badino, A. et al. (2012). "Normative framework for ship noise: Present situation and future trends". Noise Control Engineering Journal, 60.
- Beltrán, P. (2013). "Ruido generado por los buques: su impacto en los hombres de la mar y en el medioambiente, Las exenciones regulatorias y sus irreversibles consecuencias". COPINAVAL XXIII, Margarita, Venezuela.
- Carrión, A. (1998). "Diseño acústicos de espacios arquitectónicos". Ediciones UPC. Barcelona, España.
- Carslaw, H. S. (1920). "Diffraction of waves by a wedge of any angle". Proceedings London Mathematical Society, 18, 1291–306.
- Fard, S. et al. (2013). "Numerical study of noise barrier designs". Victor Harbor, Australia.
- Fernández, P.; Vazquez M. (2009). "Methodology to evaluate the efficiency of additional devices on noise barriers". 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland.
- Foss, R.N. (1976). "Attenuation of sound as a function of barrier angle". Washington State Highway Department, Research Program Report 24.2.
- Hopkins, C. (2007). "Sound Insulation". Elsevier, Oxford, United Kingdom.
- International Maritime Organization (1981). "Resolution A.468 (XII)".
- International Standard Organization (2008). "ISO 14509 Small craft - Airborne sound emitted by powered recreational craft".
- International Standard Organization (1996). "ISO 9613 Attenuation of sound during sound propagation outdoors".
- Kurze, U. J. and Anderson, G. S. (1971). "Sound attenuation by barriers". Applied Acoustics, 4, 35–53.
- Kurze, U. J. (1974). "Noise reduction by barriers". The Journal of the Acoustical Society of America, 55, 504 – 518.
- Liu, Y. et al. (2009). "Noise reduction effects of inverted L sound barriers in different inclinations of the top to the horizon". International Congress of Transportation Engineering, China.
- MacDonald, H. M. (1915). "A class of diffraction problems". Proceedings London Mathematical Society, 14, 410–27.

- Maekawa, Z. (1968). "Noise reduction by screens". *Applied Acoustics*, 1, 157-173.
- Menounou, P. (2001) "A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110, 1828-1838.
- Thurstone, L.L. (1927). "A law of comparative judgment". *Psychological Review*, 101, 266- 270.
- World Health Organization (1999). "World Health Organization: Guidelines for Community Noise". London, United Kingdom.
- Zytoon, M. A. (2009). "Occupational noise exposure of fishermen aboard small and medium- scale fishing vessels". *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43, 487-494.