

CARACTERIZACIÓN DE ANEMÓMETRO ULTRASÓNICO PARA APLICACIONES MARINAS

J.M. Remotti¹, P. Bos^{1,2}, I.S. Prario^{1,2}, P. Sayago³, C. Aranda³, S. Sánchez Mérola³

¹ Departamento de Propagación Acústica, Jefatura de Investigación de la Armada

² UNIDDEF (MinDef – CONICET), Departamento de Propagación Acústica

³ Coordinación Laboratorio e Instrumental del Servicio Meteorológico Nacional
jmarcosremotti@gmail.com

Palabras clave: monitoreo acústico, adquisición ambiental, sensor ultrasónico

1. INTRODUCCIÓN

El Ruido Ambiente Subacuático es un parámetro acústico característico de una ubicación geográfica y profundidad determinada del océano, mar o ambiente subacuático en general. Conceptualmente, corresponde al ruido de “fondo” remanente, en ausencia de fuentes específicas identificables. Actualmente, como consecuencia de la gran cantidad de actividades antrópicas que introducen ruido submarino, hay gran interés en medir este parámetro en distintas regiones marinas y distintos Organismos Internacionales e Instituciones han elaborado iniciativas, lineamientos y recomendaciones tendientes a estandarizar el monitoreo hidroacústico y las métricas para caracterizar acústicamente los distintos ambientes submarinos (Merchant et. al., 2022).

En particular, la División Acústica Submarina (DAS) de la Armada Argentina diseñó y construyó una boya de superficie en el marco del programa PIDDEF para integrar una Estación Autónoma Marítima para el Monitoreo de Ruido Ambiente (EAMMRA), ver figura 1. Su objetivo es medir el nivel de ruido ambiente submarino (NLa), parámetro crítico en aplicaciones de predicción SONAR y monitoreo ambiental. El viento, junto con el oleaje y las precipitaciones, son forzantes naturales desde la superficie libre del mar que contribuyen a la generación de ruido subacuático, razón por la cual la caracterización precisa de las condiciones de viento en el entorno inmediato de la boya es esencial para interpretar las mediciones acústicas (Wenz, 1962).

El sistema EAMMRA está equipado con sensores meteorológicos, oceanográficos y acústicos, y posee capacidad de transmisión remota de datos. Se encuentra en etapa de integración y validación, y su diseño modular permite adaptar componentes específicos a distintas misiones. La caracterización del viento en superficie permitirá correlacionar datos de ruido ambiente con modelos físicos de generación acústica, y contribuirá a una comprensión más profunda del entorno subacuático.



Figura 1. - Estación de monitoreo EAMMRA

2. ANEMÓMETRO GILL WINDSONIC

El instrumento seleccionado para la medición de viento es el anemómetro ultrasónico de dos ejes WindSonic de Gill Instruments. Este sensor, sin partes móviles, es adecuado para entornos adversos como los que se esperan en operaciones marinas prolongadas. Su principio de funcionamiento se basa en la medición del tiempo de vuelo de pulsos ultrasónicos entre pares de transductores ortogonales, lo cual permite calcular con precisión tanto la dirección como la velocidad del viento. El instrumento dispone de una interfaz RS-232 y opera en modo *polled* mediante comandos definidos por el fabricante. (Gill Instruments Ltd., 2021).



Figura 2 -
Anemómetro y
soporte

Las pruebas iniciales confirmaron la robustez mecánica y electrónica del dispositivo, así como la estabilidad de sus lecturas en condiciones de laboratorio y en exterior.

Para las pruebas de caracterización se fabricó un soporte especial regulable, que se muestra en la figura 2. Este soporte permite ajustar el anemómetro en dos movimientos: un giro de 0 a 360 grados y una inclinación regulable de -45 a +45 grados, con incrementos de 5 grados. Este diseño, detallado por Cisnero et al. (2025), permite posicionar el anemómetro de manera precisa para evaluar su rendimiento en diferentes configuraciones angulares.

Para la integración en la EAMMRA, se desarrollaron rutinas específicas de configuración y adquisición, con capacidad de funcionamiento autónomo y registros en formato CSV (*Comma Separated Values*).

3. ARQUITECTURA DE SOFTWARE Y HARDWARE DE EJECUCIÓN

El software desarrollado se estructura en tres niveles de abstracción:

- *windsonic_LL*: gestiona la comunicación de bajo nivel con el anemómetro (puerto serie, comandos y validación de mensajes).
- *windsonic_fsm*: implementa una máquina de estados finitos que organiza las fases de inicialización, adquisición, espera y cierre controlado.
- *main*: constituye el punto de entrada del programa, definiendo el modo de operación automático o manual según los argumentos del usuario.

Este software corre sobre una computadora industrial *fanless* Kaise KBOX-JB6412 con sistema operativo Ubuntu Server 24.04.2 LTS, elegida por su robustez, eficiencia energética y ausencia de partes móviles. A diferencia de versiones previas, se incorporaron mejoras en modularidad, trazabilidad de errores y configuración mediante archivos externos, (Remotti y Bos, 2024).

4. ENSAYOS DE VALIDACIÓN

Se llevaron a cabo distintas pruebas para validar el funcionamiento integral del sistema, que incluyen ensayos en laboratorio, puesta en marcha en campo y una campaña planificada en un túnel de viento cerrado.

Durante el desarrollo del software se realizaron pruebas de laboratorio que permitieron verificar la estabilidad de la comunicación serie, la adquisición y almacenamiento de datos, y el comportamiento del sistema ante sesiones prolongadas. Estas pruebas de durabilidad se ejecutaron en diferentes plataformas anfitrionas, simulando condiciones operativas reales.

Como parte de la puesta en marcha, se realizaron pruebas en exteriores orientadas a verificar que el anemómetro respondiera a condiciones reales de viento, ver figura 3. Además de validar el correcto funcionamiento del instrumento, se pudo validar el correcto registro de datos reales de velocidad y dirección de viento por parte del sistema de adquisición.



Figura 3 - Ensayos en exteriores y puesta en marcha del anemómetro.

Actualmente se está planificando la realización de mediciones en el túnel de viento del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que contempla la evaluación del efecto angular por el cabeceo de la boya y la comparación de datos medidos con un anemómetro patrón.

Se utilizará el soporte especialmente diseñado para controlar la inclinación del instrumento respecto al plano horizontal. El objetivo es evaluar cuantitativamente la influencia de la inclinación en las mediciones y contrastar las salidas del WindSonic con instrumentos patrón del SMN, y poder así generar factores de corrección aplicables al entorno operativo marino, donde las oscilaciones de la boya pueden afectar el ángulo de incidencia del viento sobre el sensor.

5. CONCLUSIONES

Se documenta el proceso de integración de un anemómetro ultrasónico WindSonic que brindará mediciones complementarias en un sistema autónomo de monitoreo del ruido ambiente submarino. La medición del viento superficial resulta clave para comprender la dinámica del ruido generado por fenómenos atmosféricos, y mejora la interpretación de las señales acústicas submarinas.

La arquitectura modular del software desarrollado en Python facilita su mantenimiento y permite su adaptación a diferentes entornos de ejecución. Su implementación en una PC industrial Kaise KBOX-JB6412 garantiza robustez y eficiencia energética para aplicaciones prolongadas en el mar.

Las pruebas realizadas en laboratorio y durante la puesta en marcha en campo confirmaron la funcionalidad del sistema y su estabilidad operativa. La campaña prevista en túnel de viento permitirá completar la caracterización instrumental en condiciones controladas y brindar herramientas para mejorar la precisión de las mediciones en escenarios marinos dinámicos.

Este desarrollo representa un avance significativo en la capacidad de adquisición autónoma de datos ambientales, y constituye un paso fundamental hacia la operación integral de la Estación Autónoma Marítima EAMMRA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Claudio Arencibia y Elian Wolfram, pertenecientes a la Coordinación Laboratorio e Instrumental del Servicio Meteorológico Nacional, sin quienes no hubiera sido posible programar una campaña en túnel de viento.

REFERENCIAS

Cisnero, R., Bravo, C., Irusta, A. y Rivolta, S., 2025: Desarrollo de un dispositivo soporte regulable para anemómetro con movimientos predeterminados. Informe interno, División Mecánica, Armada Argentina.

Gill Instruments Ltd., 2021: *WindSonic Ultrasonic Wind Sensor User Manual*, Revision 5. Gill Instruments Ltd., UK.

Merchant, N. D., Putland, R. L., André, M., Baudin, E., Felli, M., Slabbekoorn, H., & Dekeling, R., 2022. A decade of underwater noise research in support of the European Marine Strategy Framework Directive. *Ocean & Coastal Management*, 228, 106299.

Remotti, J.M. y Bos, P., 2024: Rutinas de configuración y adquisición para anemómetro Gill WindSonic. Informe Técnico AS 1/24, División Acústica Submarina, Armada Argentina.

Wenz, G. M., 1962: Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 (12), 1936–1956.