

Sistema de medición del flujo de aire aparente sobre un vehículo mediante anemómetro ultrasónico portátil

Paula Reguera Carrera, Emilio Larrodé Pellicer, Victoria Muerza Marín

Grupo de Investigación Smart and Sustainable Logistics & Supply Chains (SSLSC)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-976762707, e-mail: preguera@unizar.es

Resumen

Se presenta un sistema de medición del flujo de aire aparente sobre un vehículo en movimiento, basado en un anemómetro ultrasónico portátil embarcado. El instrumento permite registrar la velocidad del flujo de aire aparente en ruta, útil para estimar la resistencia aerodinámica experimentada por el vehículo.

Contexto

La resistencia aerodinámica representa una fracción significativa del consumo energético en vehículos, especialmente a velocidades medias-altas [1]. Su caracterización en condiciones reales de circulación requiere conocer la velocidad del flujo de aire aparente que el vehículo experimenta, que depende tanto de su velocidad como del viento ambiente, cuyo efecto puede modificar de forma apreciable la demanda energética [2]. El objetivo de este trabajo es describir el equipo de medición embarcado utilizado para cuantificar dicho flujo en ensayos en ruta.

El instrumento: principio de funcionamiento

El sensor elegido es el anemómetro ultrasónico *Calypso Ultrasonic Portable Mini* [3, 4]. Con tan solo 43 mm de diámetro y 78 g de masa, integra cuatro transductores ultrasónicos en ausencia total de partes mecánicas móviles. El principio de medición es el *tiempo de vuelo (time of flight)*: cada par de transductores emite y recibe ondas ultrasónicas en ambos sentidos; la diferencia de tiempo de propagación entre los dos sentidos es proporcional a la componente del viento a lo largo de esa dirección [5]. Con dos pares ortogonales se reconstruyen las dos componentes del viento en el plano horizontal, obteniendo velocidad (rango 0.5–25 m/s, exactitud ± 0.3 m/s a 10 m/s) y dirección (0–359°, $\pm 1^\circ$) con una tasa de muestreo de 1 Hz.

Integración en el vehículo y adquisición de datos

El anemómetro se monta en el techo del vehículo, orientando la marca de referencia Norte hacia la parte delantera del vehículo (dirección de avance). La transmisión de datos es inalámbrica mediante Bluetooth Low Energy (BLE 5.1, alcance ~30 m). La aplicación *Anemotracker* [6] recibe los datos del anemómetro y los fusiona con el GPS del smartphone, registrando: velocidad y dirección del flujo de aire, velocidad real del viento y velocidad GPS del vehículo, exportables en formato CSV para análisis posterior.

Marco vectorial y fuerza aerodinámica

El flujo de aire que siente el vehículo (y que mide el anemómetro) es el flujo de aire aparente, definido por:

$$\vec{v}_{\text{flujo de aire}} = \vec{v}_{\text{viento}} - \vec{v}_{\text{vehículo}} \quad (1)$$

Según el signo y la magnitud de cada término se distinguen varios casos (Figura 1), cubriendo situaciones de viento de frente o de cola con vehículo en movimiento o detenido. Cuando el vehículo está detenido, aunque F_{aero} puede ser no nula, el trabajo aerodinámico es cero al ser nula la distancia recorrida. Para los casos con vehículo en movimiento [7]:

$$F_{\text{aero}}(N) = \frac{\rho_a}{2} \cdot C_x \cdot S_{ef} \cdot v_m \cdot |v_m| \quad (2)$$

donde v_m , en m/s, es la velocidad del flujo de aire aparente, ρ_a , en kg/m^3 , la densidad del aire, C_x el coeficiente aerodinámico y S_{ef} , en m^2 , la sección frontal efectiva. El signo de v_m determina si el flujo resiste el avance (trabajo positivo, energía consumida) o contribuye a él (trabajo negativo, reduciendo la demanda energética al motor).

Resultados

La Figura 2 muestra la evolución temporal registrada durante una ruta de ensayo. La velocidad del flujo de aire aparente es sistemáticamente inferior a la velocidad GPS del vehículo, lo que indica la presencia de una componente de viento de cola a lo largo de la ruta analizada. En consecuencia, la fuerza aerodinámica real F_{aero} resulta inferior a la correspondiente a condiciones de viento nulo. Con la serie temporal de v_m registrada y los parámetros aerodinámicos del vehículo (ρ_a , C_x , S_{ef}), la ecuación (2) permite estimar F_{aero} y, integrando sobre la distancia recorrida, cuantificar el trabajo aerodinámico y su contribución al consumo energético en ruta.

Conclusiones

Se ha presentado un sistema de medición embarcado basado en anemometría ultrasónica portátil capaz de registrar el flujo de aire aparente sobre un vehículo en ruta. Los resultados muestran que el viento ambiente modifica de forma apreciable la resistencia aerodinámica real respecto a la estimada sin viento, pudiendo reducirla o incrementarla según la dirección e intensidad del viento. Esto pone de manifiesto la importancia de medir el flujo real para cuantificar con precisión su contribución al consumo energético del vehículo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación "Nuevos algoritmos para el desarrollo de un instrumento de medición de elevada precisión para el sector eólico"

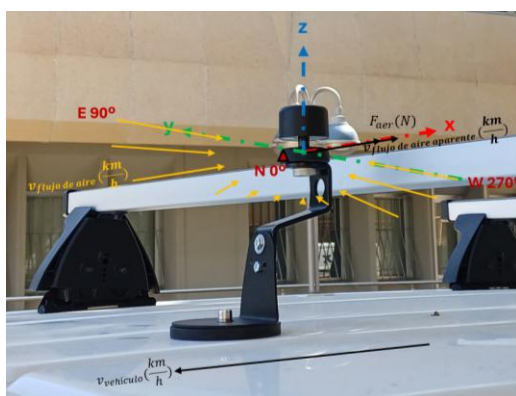


Figura 1. Interacción viento-vehículo: caso viento de cola con $|v_{viento}| < |v_{vehículo}|$

(WMETERPLUS). Los autores agradecen a Calypso Instruments su apoyo técnico.

REFERENCIAS

- [1]. HUCHO, W.H. and SOVRAN, G. Aerodynamics of road vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1993, 25(1), 485-537. Available from: doi:10.1146/annurev.fl.25.010193.002413
- [2]. ZACHOTIS, A.T. and GIAKOURIS, E.G. Monte Carlo simulation methodology to assess the impact of ambient wind on emissions from a light-commercial vehicle running on the Worldwide-Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle (WLTC). *Energies*. 2021, 14(3), 661. Available from: doi:10.3390/en14030661
- [3]. CALYPSO INSTRUMENTS. *ULTRASONIC Portable Mini Wind Instrument and Data Logger: User Manual*, English v1.1. 18.05.2023. Available from: <https://www.calypsoinstruments.com>
- [4]. CALYPSO INSTRUMENTS. *Ultrasonic Portable Mini Specs Sheet CM11022*, English v1.0. 01.03.2025. Available from: <https://www.calypsoinstruments.com>
- [5]. CHANDRAN, P., BHAKTHAVATCHALU, R., and KUMAR, P.P. Time of flight measurement system for an ultrasonic anemometer. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICT)*. IEEE, 2016. Available from: doi:10.1109/ICCICT.2016.7988049
- [6]. CALYPSO INSTRUMENTS. *Anemotracker: Detailed Documentation*. 2nd July 2024. Available from: <https://www.calypsoinstruments.com>
- [7]. SOVRAN, G. The effect of ambient wind on a road vehicle's aerodynamic work requirement and fuel consumption. *SAE Transactions*. 1984, 93, 449-472. SAE Paper 840298. Available from: doi:10.4271/840298

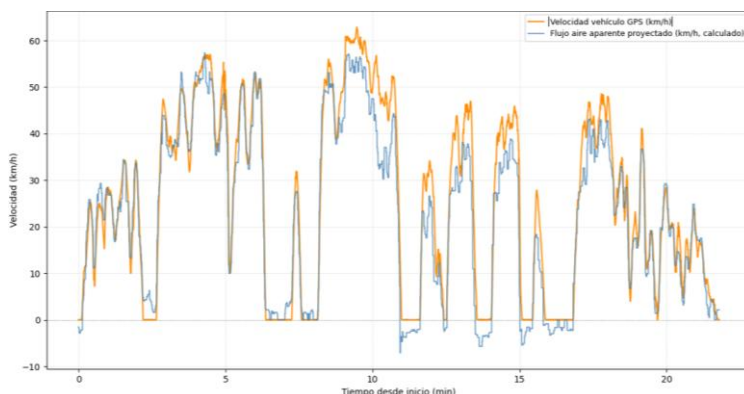


Figura 2. Ruta de ensayo, evolución temporal de la velocidad del vehículo y del flujo de aire aparente proyectado sobre el eje de avance del vehículo.