

Automatización de un túnel de viento para la calibración de anemómetros del Servicio Meteorológico Nacional

Automation of a wind tunnel for the calibration of anemometers of the National Meteorological Service

Cristian Zozimo Aranda Cordero^{*†}, Leonardo Martín Carducci^{*}, Lucas Sambuco Salomone^{*}
Claudio Arencibia[†] Leonardo Rey Vega^{*‡}

^{*} Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Av. Paseo Colón 850, C1063ACV, Buenos Aires, Argentina

[†] Servicio Meteorológico Nacional

Av. Dorrego 4019, C1425GBE, Buenos Aires, Argentina.

[‡] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (CONICET)
Godoy Cruz 2290, C1425FQB, Buenos Aires, Argentina

carandac@fi.uba.ar

Recibido: 26/12/24; Aceptado: 21/03/25

Abstract—In this work, we present the development of an automated system for the calibration of anemometers using the wind tunnel of the National Meteorological Service. The system includes wind data acquisition from the sensors, communication, and wind speed control of the tunnel through a closed-loop PID controller, replacing the manual measurement system. This is complemented by the development of a user interface that facilitates configuration, real-time visualization, and uncertainty calculations. In this way, the wind sensor calibration process is optimized to meet the demands of the automatic stations network and the anemometer systems installed across the country.

Keywords: wind tunnel; anemometers; automatic calibration; embedded system.

Resumen— En este trabajo presentamos el desarrollo de un sistema automatizado para la calibración de anemómetros utilizando el túnel de viento del Servicio Meteorológico Nacional. El sistema incluye la adquisición de datos de viento de los sensores, la comunicación y el control de velocidad de viento del túnel mediante un controlador de lazo cerrado PID, reemplazando el sistema manual de medición. Esto se complementa con el desarrollo de software para una interfaz de usuario que facilita la configuración, visualización en tiempo real y cálculo de incertidumbres. De esta forma, se optimiza el proceso de calibración de sensores de viento para satisfacer la demanda de la red de estaciones automáticas y los sistemas de anemómetros instalados en el país.

Palabras clave: túnel de viento; anemómetros; calibración automática; sistema embebido.

I. INTRODUCCIÓN

Los anemómetros son instrumentos diseñados para medir el viento, tanto en su intensidad como dirección (tomando como referencia el norte geográfico si se mide en el hemisferio sur). Las mediciones de viento son cruciales en una gran variedad de aplicaciones, tales como estudios de contaminación atmosférica, vigilancia y predicción meteorológica, aterrizaje de aeronaves, análisis climático en función de la carga de viento, evaluación de daños causados por el viento, estimación del potencial de energía eólica y aplicaciones

agrarias [1]. Como todo instrumento de medición, deben ser calibrados para asegurar la trazabilidad metrológica de las mediciones respecto a patrones estándar nacionales o internacionales. El proceso de calibración de los anemómetros se lleva a cabo en túneles de viento, que tradicionalmente se operan de forma manual o semi-automática. La calibración de estos instrumentos debe cumplir con las normas estandarizadas [2]–[4] y ser realizada por laboratorios acreditados. En todo este proceso existen problemas de diversos tipos, como contaminación sonora para el operador o la repetibilidad de las mediciones, ya que es un proceso humano-dependiente. Este aspecto ha motivado, como parte de un proyecto del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el desarrollo de un sistema que permita automatizar los procedimientos actuales de calibración de anemómetros en un túnel de viento mediante una solución combinada de hardware y software. Este organismo representa al Centro Regional de Instrumentos de Buenos Aires (RIC III) de la Asociación Regional III [5], dependiente de la Organización Mundial de Meteorología, y se destaca por sus capacidades en la verificación de instrumentos meteorológicos de presión atmosférica y viento, así como en la calibración de sensores de temperatura y humedad. En este marco, se utilizan patrones de referencia y procedimientos que permiten establecer la trazabilidad de los instrumentos respecto al Sistema Internacional (SI).

El sistema automatizado que se presenta en este trabajo contempla un circuito electrónico para la adquisición y transmisión de datos medidos por sensores de viento, hacia un servidor central, y el control de la velocidad del motor que acciona la hélice a partir de las mediciones de viento de un sensor patrón. Por otra parte, se implementó una aplicación web en el servidor central, con el fin de proveer una interfaz gráfica para el usuario, generar las trayectorias de referencia para el controlador y calcular las incertidumbres con las que se elabora un presupuesto de calibración, cumpliendo los estándares especificados en las normas.

En la sección II se plantea una breve descripción de los

materiales requeridos para la calibración de anemómetros. En la sección III se comenta un resumen sobre las incertidumbres vinculadas al proceso de calibración. El sistema completo, incluyendo hardware y software, se desarrolla en la sección IV. En la sección V se presentan los resultados y finalmente las conclusiones en la sección VI.

II. MATERIALES PARA ENSAYOS DE CALIBRACIÓN

A. Instrumentos de medición de viento

Para la medición precisa del viento en superficie se pueden emplear diversos instrumentos diseñados para capturar diferentes características del flujo de aire. En la Figura 1 se ven algunos de los anemómetros más comunes. Entre ellos se pueden mencionar: anemómetros de *copas y veleta*, instrumento mecánico que proporciona intensidad a partir de la rotación de las copas y dirección en base a la orientación de la veleta; *ultrasónicos*, que determinan la velocidad y dirección del viento midiendo la perturbación que éste produce en ondas de ultrasonido; *tubos pitot*, que extraen la velocidad mediante la diferencia de presión en un tubo orientado contra el flujo de aire y un tubo estático; anemómetros de *hilo caliente*, que miden la velocidad del viento basándose en la tasa de enfriamiento de un hilo calentado eléctricamente. En campo, normalmente son utilizados anemómetros de copas y veleta, y de ultrasonido, presentando éste último la ventaja de una mayor precisión y la no dependencia de partes móviles (lo que implica un menor mantenimiento). Por su parte, los anemómetros de tubo pitot y de hilo caliente, se utilizan principalmente para estudios de dinámica de fluidos y aplicaciones aeronáuticas.

B. Túnel de viento

El SMN cuenta con un túnel de viento utilizado para la calibración de los distintos tipos de anemómetros. En la Figura 2 se muestra un esquema donde se observan las partes que lo componen: el motor que gira una hélice, el variador de velocidad con su tablero de control y la zona de medición donde se instalan el *instrumento bajo calibración* (IBC) y el instrumento *patrón*, en particular, de la marca Vaisala, modelo WMT700, con un rango de operación de 0.01 m s^{-1} a 65 m s^{-1} y una resolución de 0.01 m s^{-1} . El sistema de referencia para las dimensiones de la zona de medición se indica en la misma figura, donde la altura se mide en el eje vertical, la profundidad en el eje transversal y la longitud en el eje longitudinal. Como se puede apreciar en la foto de la Figura 3, imagen superior, el túnel de viento es de tipo cerrado, con un perímetro medio de 21 m. También se observa la zona de medición, imagen inferior, donde se ubican en el interior los sensores patrón e IBC.

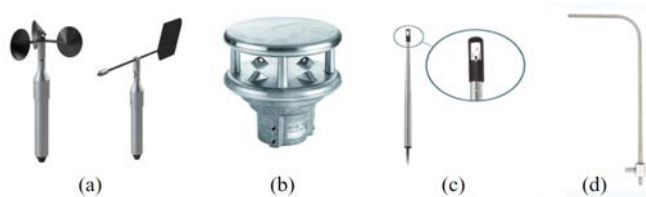


Fig. 1. Tipos de anemómetros: (a) Copas y Veleta; (b) Ultrasónicos; (c) De hilo caliente; (d) Tubo pitot.

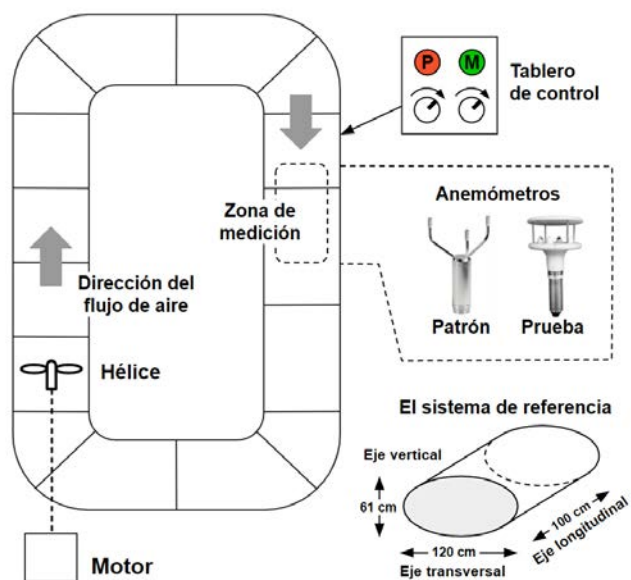


Fig. 2. Esquema del túnel de viento y tablero de control manual.



Fig. 3. Túnel de viento cerrado del SMN: vista general (arriba), zona de medición en la que se instalan los anemómetros (abajo-izquierda) y el setup que incluye PC junto al datalogger (abajo-derecha).

III. INCERTIDUMBRES DE LA CALIBRACIÓN

A. Calibración de un anemómetro

Bajo condiciones ambientales controladas, se efectúan las mediciones en el túnel de viento con ambos anemómetros, el instrumento patrón y el IBC. El modelo de medición utilizado para calcular la incertidumbre de los anemómetros bajo calibración se muestra en la Ec. 1. Esta ecuación expresa el término de corrección del IBC, donde CV_{IBC} representa la corrección del anemómetro a calibrar, V_P la medición del anemómetro patrón, CV_P la corrección del anemómetro patrón (obtenida de su certificado de calibración) y V_{IBC} el valor de viento medido con el IBC. En la ecuación también se define $V_{REF} = V_P + CV_P$, que representa la medición del anemómetro patrón corregida de acuerdo a su propio certificado de calibración. Por otra parte, las mediciones, tanto del patrón como del IBC, deben ser corregidas además por un factor de bloqueo $F = 1 + \frac{S_A}{S_T}$, donde S_A es el área efectiva de bloqueo del anemómetro con su soporte y S_T es la superficie transversal de la zona

de medición. Contemplando esta corrección para ambos anemómetros (con factores F_{IBC} y F_P), las velocidades corregidas resultan $V_{IBC} = F_{IBC}V_{IBC}^*$ y $V_P = F_PV_P^*$, donde el superíndice * denota el valor de velocidad medido antes de aplicar la corrección por factor de bloqueo.

$$CV_{IBC} = \overbrace{V_P + CV_P}^{V_{REF}} - V_{IBC} \quad (1)$$

B. Cálculo de incertidumbre

En la calibración de los anemómetros se debe calcular la incertidumbre combinada de la corrección CV_{IBC} , que depende de diferentes fuentes, como se expresa en la Ec. 2 (donde u^2 hace referencia al cuadrado de la incertidumbre). Éstas son debidas a la velocidad del sensor patrón ($u^2(V_{REF})$), del sensor bajo calibración ($u^2(V_{IBC})$), y a las incertidumbres asociadas al túnel de viento ($u^2(TV)$).

$$u^2(CV_{IBC}) = u^2(V_{REF}) + u^2(V_{IBC}) + u^2(TV) \quad (2)$$

Para los anemómetros, las fuentes de incertidumbre son debidas a la resolución, la repetibilidad, histéresis y factor de bloqueo. En el caso sensor patrón, además de estas incertidumbres se deben tener en cuenta la calibración y el ajuste de calibración. Para el túnel de viento, las fuentes de incertidumbre dependen de la homogeneidad, ajuste de la homogeneidad, estabilidad, ajuste de estabilidad y factor de calibración. Estas fuentes de incertidumbre se pueden ampliar para definir una incertidumbre expandida con un factor de cobertura obtenido de una distribución *t-Student* con ciertos grados de libertad para definir un nivel de confianza, que generalmente se encuentra entre el 68% y el 99%, [4], [6], [7].

IV. SISTEMA IMPLEMENTADO

En esta sección se presentan las distintas etapas que componen el sistema, el cuál puede dividirse en el diseño de hardware (electrónica), firmware (sistema embebido) y software (interfaz de usuario y comunicaciones). En la Figura 4 se puede apreciar la arquitectura general del sistema. Éste permite aplicar los procedimientos actuales de calibración de anemómetros en un túnel de viento, pero de forma automatizada. El sistema electrónico (datalogger) se encarga de generar la señal de control que maneja al variador de velocidad del túnel de viento. En simultáneo se obtiene la adquisición y transmisión de datos medidos por los sensores de viento, a través de un enlace Ethernet, hacia un servidor donde se gestiona todo el sistema.

A. Hardware

En el mercado actual, existen equipos similares para la adquisición de datos y control, tales como el CR6 de Campbell Scientific [8] y el DMU801 de Vaisala [9]. Sin embargo, su costo es elevado y presentan ciertas limitaciones para un uso específico, ya que son sistemas cerrados y poseen menor flexibilidad, lo que motivó el desarrollo de una solución propia para optimizar el proceso de calibración. La etapa de Hardware se puede simplificar de acuerdo al diagrama en bloques de la Figura 5. Allí se representa el módulo principal del datalogger, el cuál está compuesto por

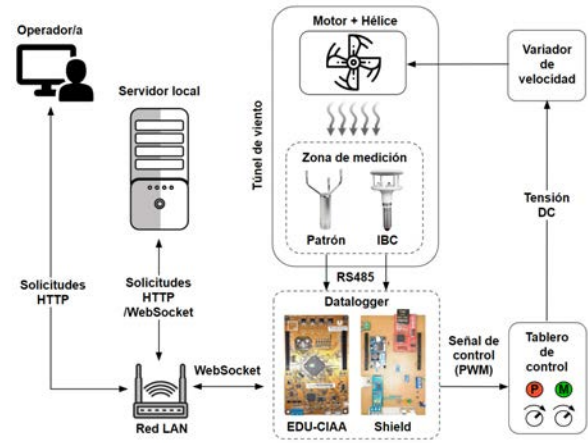


Fig. 4. Sistema de calibración automático desarrollado.

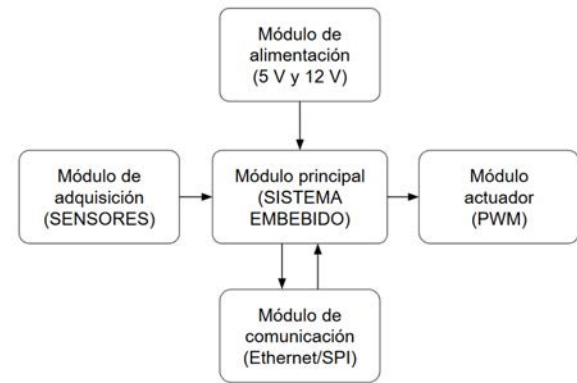


Fig. 5. Diagrama en bloques del sistema electrónico (datalogger).

un dispositivo embebido EDU-CIAA, basado en el proyecto CIAA [10] (de hardware abierto). Esta etapa es la encargada tanto del controlador PID como de la digitalización de datos de los sensores y la comunicación. Las restantes etapas, son los periféricos montados sobre una placa *shield* que contiene al módulo de alimentación (fuentes reguladas de 5 y 12 V), módulo de adquisición (para los sensores patrón e IBC con interfaz de comunicación RS485), módulo actuador (circuito de amplificación y filtrado para acondicionar la señal de control por modulación de ancho de pulso) y módulo de comunicación (adaptador Ethernet W5100 para comunicar el sistema embebido con un servidor Websocket en la misma red LAN). Finalmente la placa *shield* que contiene todas estas etapas fue acoplada a la EDU-CIAA para conformar el datalogger completo.

B. Firmware

El *framework* utilizado para programar el sistema embebido corresponde al firmware del proyecto CIAA [11], basado en el sistema operativo FreeRTOS. El entorno de desarrollo integrado utilizado fue Eclipse, OpenOCD para programación, depuración y drivers para la EDU-CIAA, entre otras herramientas. La lógica del programa se implementó mediante el uso de máquinas de estado de Harel, empleando el software Itemis Yakindu [12]. Estas máquinas de estado amplían los diagramas tradicionales incorporando conceptos de modularidad, jerarquía y estructura organizacional, similar a las máquinas de estado UML [13]. Se

crearon diez máquinas de estado. Una máquina principal, desde la cual se controlan las nueve máquinas restantes que trabajan de forma concurrente para ejecutar las siguientes tareas: Conexión con servidor NTP; Conexión con el servidor WebSocket; KeepAlive y recepción de comandos; Procesamiento de comandos; Muestreo de los sensores de viento; Monitoreo de los niveles de tensión de la fuente y tablero del variador; Procesamiento de las muestras acumuladas; Transmisión de las mediciones al servidor; Controlador PID, el cual se representa en la Figura 6. El controlador depende de parámetros como la ganancia *proporcional* (K_P) al error $e(t)$, la ganancia del término *integral* (K_I) y la del término *derivativo* (K_D), definiendo un tiempo de muestreo del sistema T_s , puesto que el controlador se implementa en tiempo discreto. Con estos parámetros se implementó en el sistema embebido el algoritmo de control PID para regular la salida del circuito PWM y, consecuentemente, la velocidad del viento en el túnel. La configuración más adecuada de los parámetros del PID fueron obtenidos empíricamente, logrando la condición óptima con $K_P = 3$; $K_D = 0.5$; $K_I = 0.1$; para un tiempo de muestreo $T_s = 1$ s.

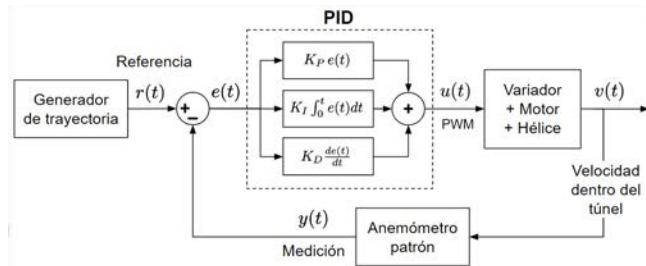


Fig. 6. Diagrama en bloques del controlador PID para el control de la velocidad de viento en el túnel.

C. Software

La aplicación de software, implementada en el servidor local, comprende entre sus objetivos, simplificar la carga de metadatos esenciales, incluyendo la información de los sensores de referencia y los sensores bajo calibración, los certificados de calibración y las especificaciones de la zona de medición del túnel de viento. También ofrece la posibilidad de configurar el datalogger, definiendo la interfaz eléctrica de los anemómetros, los intervalos de muestreo y los puntos de medición de la velocidad del viento, entre otras opciones. Además, la aplicación se encarga de calcular y enviar al datalogger la curva de referencia para el controlador PID. Los resultados son almacenados en una base de datos, quedando disponibles para su descarga y previsualización mediante gráficos y tablas desde la misma interfaz.

La arquitectura del software se muestra en el esquema de capas de la Figura 7. La primera capa está conformada por el servidor web Nginx, encargado de manejar las solicitudes HTTP entrantes, distribuyéndolas eficientemente y proporcionando un equilibrio de carga, además de brindar contenido estático como archivos HTML, CSS, JavaScript e imágenes. La segunda capa está compuesta por Unicorn, un servidor WSGI (*Web Server Gateway Interface*) que sirve como intermediario entre Nginx y la aplicación web desarrollada en Django. Esta capa es crucial para asegurar

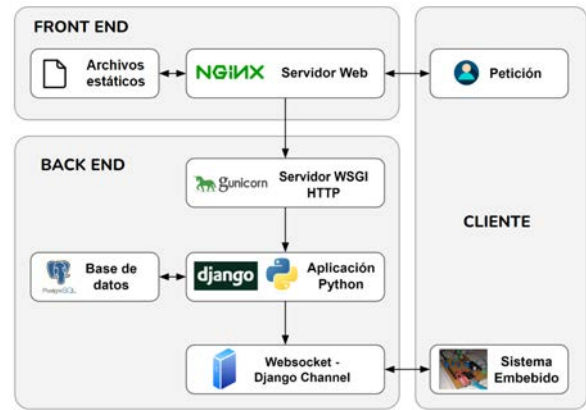


Fig. 7. Arquitectura del software implementado. Se observan el *front end* (Nginx) y *back end* (Gunicorn, Django y WebSocket Server). También se muestran los clientes de la aplicación (usuario y sistema embebido)

que la aplicación pueda responder de manera rápida y eficiente a las demandas de los usuarios. En la tercera capa se encuentra la aplicación web desarrollada en Django, un *framework* de alto nivel responsable de la lógica de negocio de la aplicación, la gestión de las bases de datos y la interacción con los usuarios a través de interfaces web dinámicas. Esta interactúa con el sistema de gestión de bases de datos PostgreSQL, encargado del almacenamiento y recuperación de datos de manera eficiente y segura. Finalmente, la última capa consiste en un servidor *WebSocket*, protocolo de comunicación basado en HTTP que permite establecer una conexión entre el sistema embebido y la aplicación web, logrando una comunicación bidireccional en tiempo real. En la Figura 8 se puede apreciar una de las vistas de la aplicación web, donde se muestra la visualización de un perfil de velocidades medidas durante uno de los ensayos. A izquierda se observa un menú con las distintas opciones que proporciona el software, entre ellas: La carga de datos; la configuración del datalogger, adquisición de datos, procesamiento y una opción de Ayuda.

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos realizados para la calibración de un anemómetro bajo prueba mediante el sistema automatizado. Tomando como referencia los procedimientos descritos en [2], [4] y [14], los pasos empleados para realizar el proceso de calibración de un anemómetro se resumen a continuación:



Fig. 8. Vista parcial de la aplicación web. En este ejemplo se observa una previsualización del proceso de medición. A izquierda se pueden apreciar las distintas opciones para configuración y procesado.

- 1) Ensamblar el banco de medición, montando los sensores en un soporte dentro del túnel de viento, asegurando su fijación y alineado.
- 2) Tomar las medidas de posición de los instrumentos respecto a un sistema de referencia establecido.
- 3) Medir el área de bloqueo de cada instrumento, incluyendo su soporte.
- 4) Conectar el *datalogger* a los anemómetros y a la red LAN del laboratorio.
- 5) Tomar datos ambiente de temperatura, humedad y presión al inicio y finalización de las mediciones.
- 6) Acceder a la interfaz web y configurar los parámetros de calibración.
- 7) Dar marcha al motor e iniciar la adquisición de datos.
- 8) Monitorear las mediciones desde la interfaz web.
- 9) Al finalizar, verificar los datos obtenidos y luego activar el procesamiento y cálculo de incertidumbre.
- 10) Descargar los datos y elaborar el correspondiente certificado de calibración del instrumento bajo prueba.

En la Figura 9 se muestra la disposición de los anemómetros ultrasónicos en la zona de medición del túnel de viento. Para el anemómetro patrón se utilizó un sensor de la marca Vaisala modelo WMT700, con el que se calibró un sensor bajo prueba marca DeltaOhm modelo HD51.3D. Éstos se instalaron con una separación $d = 65\text{ cm}$ y a una altura $h = 36.5\text{ cm}$ respecto a la base del soporte que los sostiene, quedando ambos alineados y nivelados respecto al eje longitudinal.

En la interfaz web se realizó la carga de metadatos de los sensores y la configuración del datalogger, definiendo un tiempo de muestreo de $T_s = 1\text{ s}$. También se establece la configuración del túnel de viento para un perfil ascendente de velocidades escalonadas de 5, 10, 15, 20 y 24 m s^{-1} . Para medir cada nivel de velocidad, el controlador debe seguir una referencia con el perfil que se indica en la Figura 10, siendo el *tiempo de medición* el intervalo de donde se extraen las muestras válidas. Para el ciclo descendente, se establece la misma configuración pero en orden inverso. Se configuró un tiempo de transición entre velocidades de 3 min, un tiempo de estabilización de 5 min y un tiempo de medición de 2 min. Durante el proceso de medición automatizado, el operador se retira de la sala y monitorea periódicamente el estado de las mediciones a través de la aplicación web hasta que el proceso concluye. Asimismo, los datos de humedad, presión y temperatura deben registrarse para verificar condiciones ambientales normales [4] y para el cálculo de la densidad del aire en caso de utilizar anemómetros *pitot* (que requiere esa variable para el cálculo

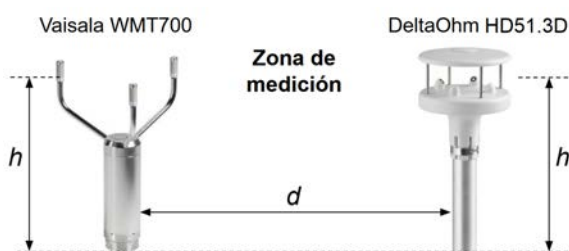


Fig. 9. Ubicación relativa de los sensores en la zona de medición.

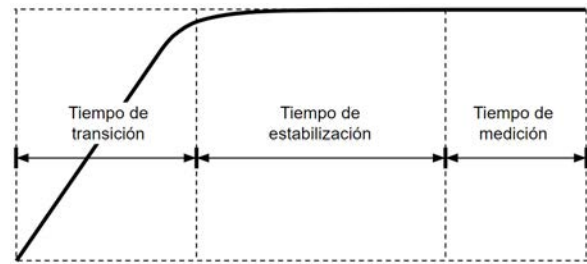


Fig. 10. Perfil de medición de la curva de referencia del ciclo ascendente.

de velocidad). En la Figura 11 se muestra el resultado de un perfil de medición completo, con un entorno de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura ambiente, 45 % de humedad relativa y 1013 hPa de presión a nivel del mar. Para cada nivel de velocidad se obtiene una velocidad promedio corregida por el factor de bloqueo. En las Tablas I y II se observa el valor medido por cada instrumento y su histéresis.

Tabla I
MEDICIONES E HISTÉRESIS DEL INSTRUMENTO PATRÓN (WMT700).

Ascendente [m/s]	Descendente [m/s]	Histéresis [m/s]
5.25	5.23	0.02
10.56	10.54	0.02
15.82	15.82	0.00
21.08	21.07	0.01
25.32	25.33	-0.01

Tabla II
MEDICIONES E HISTÉRESIS DEL IBC (HD51.3D).

Ascendente [m/s]	Descendente [m/s]	Histéresis [m/s]
5.28	5.26	0.02
10.20	10.19	0.01
15.27	15.22	0.05
20.24	20.29	-0.05
24.36	24.39	-0.03

Gráficamente, se pueden comparar las curvas que relacionan las velocidades del instrumento patrón y el IBC para los ciclos ascendente y descendente, como se muestra en la Figura 12. Se puede apreciar que ambas curvas muestran que las mediciones de ambos instrumentos mantienen una relación lineal y con igual pendiente, observando una histéresis despreciable. En la Figura 13 se puede ver un acercamiento más detallado en cada punto de medición. Este resultado indica que el instrumento presenta muy poca alinealidad, observando que cuando varía un valor en ascenso o descenso, lo hace por la misma curva.

En las tablas III y IV se pueden ver los valores correspondientes a la calibración del sensor IBC, tanto para el ciclo ascendente como para el descendente respectivamente. Allí se indican la velocidad del anemómetro patrón (V_P) corregido con su certificado de calibración y factor de bloqueo, la velocidad del IBC (V_{IBC}) corregido por su factor de bloqueo, el término de calibración del IBC (CV_{IBC}) y la incertidumbre expandida de la calibración del IBC ($u(CV_{IBC})$). En base a estos resultados, en las Figuras 14 y 15 se presentan gráficamente las curvas de calibración para los ciclos ascendente y descendente, observando en cada punto de medición una cota que representa la incertidumbre expandida con un factor de cobertura aproximado de 2.

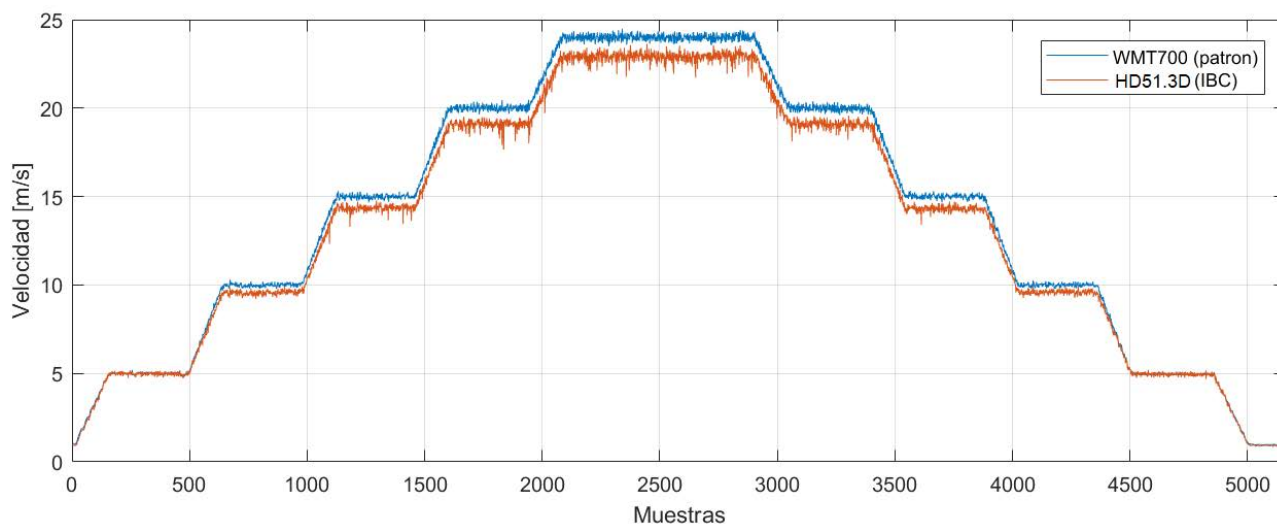


Fig. 11. Perfil de medición completo para los anemómetros Patrón e IBC.

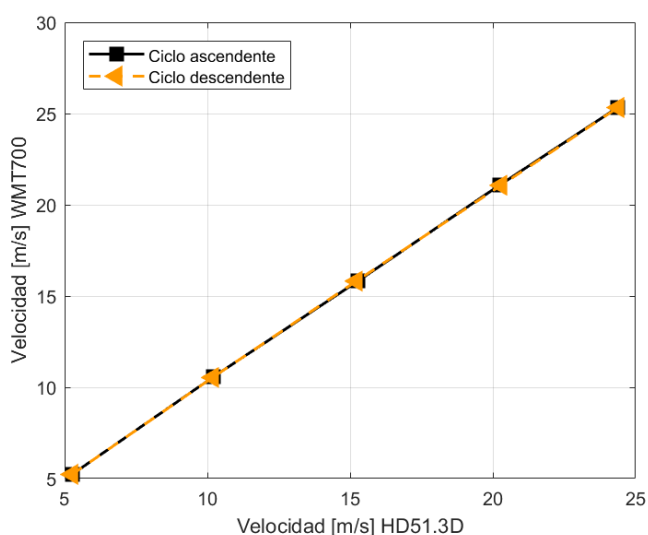


Fig. 12. Curva de histéresis entre ciclo ascendente y descendente de ambos anemómetros. En la Figura 13 se ven las diferencias con mayor detalle.

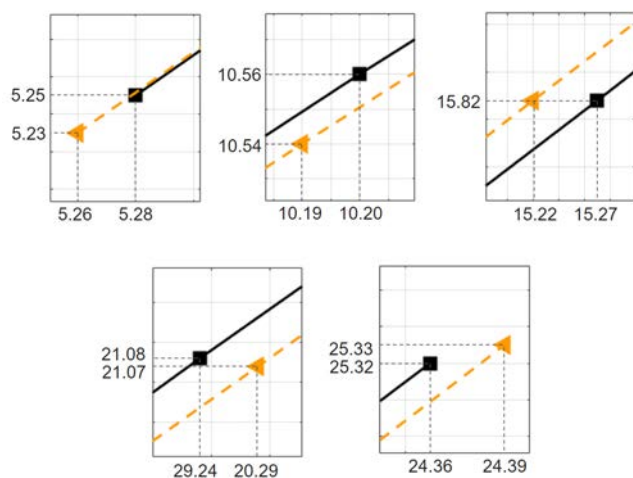


Fig. 13. Ampliación de la Figura 12 para cada punto de medición.

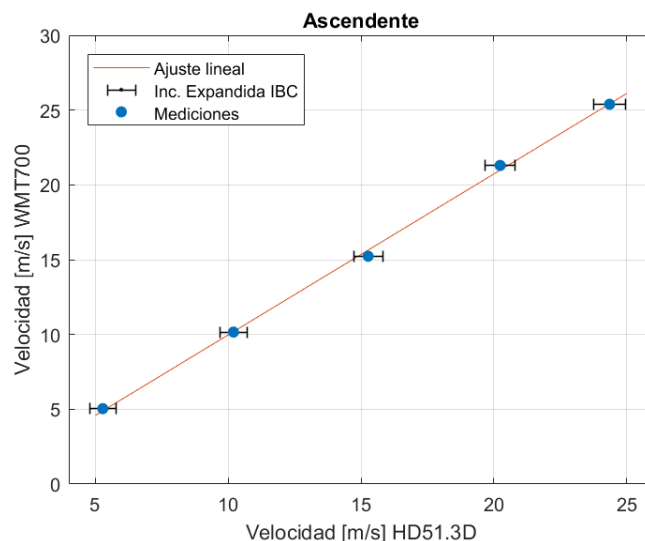


Fig. 14. Curva de calibración del ciclo ascendente.

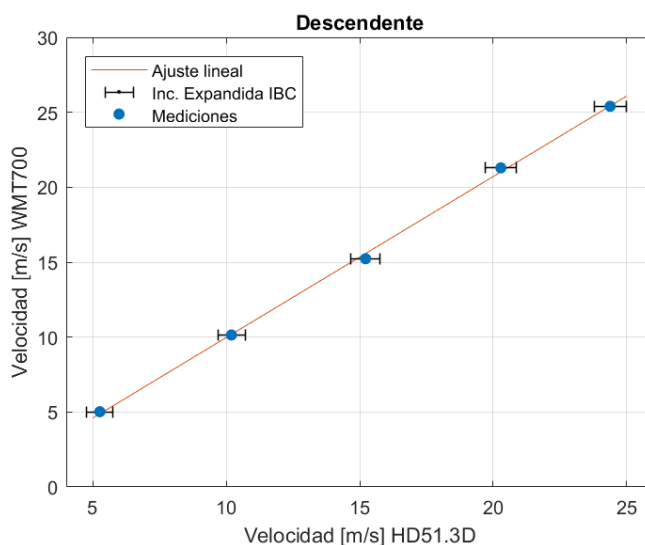


Fig. 15. Curva de calibración del ciclo descendente.

Allí se representa la recta que mejor ajusta a los puntos de medición, notando que en ambos casos (ascendente y descendente) la curva se encuentra dentro de los intervalos de incertidumbre, lo que permite establecer un nivel de confianza del 95% (factor de cobertura de 2). Cabe aclarar que en el SMN se contemplan tolerancias máximas para cada magnitud física [15] establecidas por la WMO. Para la variable viento se acepta una incertidumbre de $\pm 1 \text{ m s}^{-1}$ para ser considerado un instrumento de clase A, una incertidumbre de $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$ para ser considerado de clase B, o una incertidumbre de $\pm 5 \text{ m s}^{-1}$ para ser considerado de clase C. Dependiendo de la categoría, el instrumento podrá ser utilizado para distintas aplicaciones.

Tabla III
CALIBRACIÓN DEL IBC EN EL CICLO ASCENDENTE.

V_P [m/s]	V_{IBC} [m/s]	CV_{IBC} [m/s]	$u(CV_{IBC})$ [m/s]
5.04	5.28	-0.24	0.49
10.16	10.20	-0.04	0.51
15.23	15.27	0.04	0.55
20.30	20.24	0.06	0.57
24.39	24.36	0.03	0.60

Tabla IV
CALIBRACIÓN DEL IBC EN EL CICLO DESCENDENTE.

V_P [m/s]	V_{IBC} [m/s]	CV_{IBC} [m/s]	$u(CV_{IBC})$ [m/s]
5.02	5.26	-0.24	0.49
10.14	10.19	-0.05	0.51
15.23	15.22	0.01	0.54
20.29	20.29	0.00	0.57
24.40	24.39	0.01	0.60

VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha presentado como principal contribución el desarrollo de un sistema automatizado para el procedimiento de calibración de anemómetros en un túnel de viento. Los resultados experimentales demostraron la efectividad del sistema desarrollado y su capacidad para proporcionar mediciones precisas y confiables. Esto contribuye significativamente al avance del conocimiento en el campo de la metrología del viento, proporcionando herramientas prácticas y de fácil uso para mejorar la precisión y eficiencia en la calibración de anemómetros. Como ventajas se pueden mencionar la reducción en los tiempos operativos y en los errores de carácter humano (debido al cálculo manual), así como una disminución de los tiempos de exposición del operador a la contaminación acústica. Asimismo, se ha proporcionado una base sólida para cumplir con los requisitos de acreditación, tales como la implementación de un sistema de calibración robusto, la mejora continua de los procesos y la demostración de la competencia técnica del laboratorio.

Esto permitirá mejorar la calidad y confiabilidad de las calibraciones realizadas, asegurando resultados precisos y válidos. De este modo, la implementación de este sistema permitirá actualizar y mejorar las capacidades del RIC, permitiendo incorporar la calibración de anemómetros, no solo de los instrumentos propios de la red meteorológica del SMN, sino también de instrumentos de terceros tanto a nivel nacional como en la región latinoamericana.

REFERENCIAS

- [1] World Meteorological Organization, *Surface Wind Measurement*. WMO, 2018, p. Chapter 5, wMO-No. 8.
- [2] International Organization for Standardization, "Iso 16622:2002 meteorology - sonic anemometers/thermometers - acceptance test methods for mean wind measurements," 2002. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/29291.html>
- [3] International Organization for Standardization, "Iso 17713-1:2007 meteorology - wind measurements - part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance," 2007. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/31497.html>
- [4] International Electrotechnical Commission, "Iec 61400-12-1:2017 wind energy generation systems - part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines," 2017, annex F (normative): Wind tunnel calibration procedure for anemometers. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/26603>
- [5] World Meteorological Organization, "RIC Argentina - World Meteorological Organization," 2024. [Online]. Available: https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/Regional_Instrument_Centres/ric-argentina
- [6] W. M. Organization, "Wmo online training workshop on quality, traceability and calibration - general metrology and temperature," June 2021, online Training Workshop.
- [7] Joint Committee for Guides in Metrology, "Guide to the expression of uncertainty in measurement (gum:1995 with minor corrections)," 2008. [Online]. Available: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- [8] C. Scientific, "Cr6 measurement and control datalogger," 2023, accessed: 2024-08-26. [Online]. Available: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr6.pdf>
- [9] Vaisala, "Data management unit dmu801," 2024, accessed: 2024-08-26. [Online]. Available: <https://www.vaisala.com/en/products/data-management-unit-dmu801>
- [10] Proyecto CIAA, "Proyecto ciao: Computadora industrial abierta argentina," <https://www.proyecto-ciaa.com.ar/>, 2024, accedido: 1 de julio de 2024.
- [11] C. Project, "firmware_v3: Framework para desarrollo de firmware de sistemas embebidos en c/c++," GitHub, 2024, accedido: 10 de julio de 2024. [Online]. Available: https://github.com/ciaa/firmware_v3
- [12] "itemis create: Herramienta para desarrollar, simular y generar máquinas de estados finitos," Sitio web de itemis, accedido el 23 de julio de 2024. [Online]. Available: https://www.itemis.com/en/products/itemis-create/documentation/user-guide/overview_what_are_itemis_create_statechart_tools
- [13] "Uml state machine," https://en.wikipedia.org/wiki/UML_state_machine, accessed: 2024-08-26.
- [14] "Procedimiento general: Calibración/verificación de instrumentos en el laboratorio de smn," http://iso.smn.gov.ar/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=1094&download=y, 2024, consultado el 26 de agosto de 2024.
- [15] I. Commission for Observation and I. Systems, "Appendix 3. decisions adopted by the session," Interim Abridged Final Report of the First Session Virtual Session, November 2020, wMO-No. 1251. Inclusion of the Measurement Quality Classification for Surface Observing Stations on Land in WMO-No. 8.