

Comparación experimental de anemómetros de copas

Maximino ménez-Ceciliano

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

maxjimenez@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>

Gustavo Richmond-Navarro

Instituto Tecnológico de Costa Rica., Costa Rica

grichmond@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Recepción: 03 Febrero 2023

Aprobación: 06 Junio 2023



Acceso abierto diamante

Resumen

Debido a que la potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, esta velocidad usualmente se convierte en el factor más importante para determinar la potencia de una turbina eólica. Por tanto, la incertidumbre relacionada con los anemómetros ha sido investigada a fondo, buscando disminuir el error involucrado en la medición. En este trabajo se determina si un grupo de anemómetros comerciales de copas tienen medias que no difieren estadísticamente entre sí, utilizando varios túneles de viento disponibles y un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad de referencia. En algunos escenarios, se encuentra una relación lineal entre la medición de referencia y el valor medido por los anemómetros de copas, con un factor de corrección que depende de la velocidad del viento. En otros casos hubo algunos comportamientos atípicos, los cuales varían de una velocidad a otra, lo que hace suponer que esto es debido a factores externos al anemómetro. Esta suposición se refuerza por análisis de varianza y comparaciones de Tukey realizadas para los anemómetros a diferentes velocidades. En otros escenarios se encontró que, a pesar de obtener medias que no son estadísticamente iguales, el grupo de anemómetros entregó resultados en un rango que cae dentro de la incertidumbre declarada para el equipo. Se concluye que los resultados obtenidos no son suficientes para determinar si los anemómetros son estadísticamente equivalentes o no, pero si es posible observar que ninguno de los equipos analizados presenta un nivel de error que lo distinga del resto.

Palabras clave: Anemómetro de copas, análisis de varianza, túnel de viento, velocidad del viento, calibración.

Abstract

Since wind power is proportional to the cube of wind speed, wind speed usually becomes the most critical factor in determining the power of a wind turbine. Therefore, the uncertainty related to anemometers has been thoroughly investigated, seeking to decrease the error involved in the measurement. This work determines whether a group of commercial cup anemometers has means that do not differ statistically from each other, using different wind tunnels and a hot-wire anemometer to measure the reference velocity. In some scenarios, a linear relationship is found between the reference measurement and the cup anemometers one, with a correction factor depending on the wind speed. In other cases, there were atypical behaviors, which vary from one speed to another. It is assumed that external factors must cause the described abnormal behaviors. This assumption is reinforced by analyzing the variance and performing Tukey comparisons for the anemometers at different speeds. In other scenarios, it was found that, despite obtaining means that are not statistically equal, the group of anemometers delivered results in a range that falls within the stated uncertainty for the equipment. It is concluded that the results obtained are not sufficient to determine if the anemometers are statistically equivalent or not, but it is possible to observe that none of the analyzed equipment presents an error level that distinguishes it from the rest.

Keywords: Cup anemometer, analysis of variance, wind tunnel, wind velocity, calibration.

Introducción

Las energías renovables han tenido un aumento del 15 % entre 2006 y 2015 [1]. Entre ellas, la energía eólica representa el 25% de la capacidad instalada en todo el planeta [2]. Para determinar la potencia en el viento, es necesario medir su velocidad, en efecto, esta potencia es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento, por esta razón es de suma importancia medir de manera adecuada esta variable.

Se puede afirmar que los anemómetros, equipos que miden la velocidad del viento, se pueden agrupar en dos categorías, los calibrados y los no calibrados. En el caso de los anemómetros no calibrados, la incertidumbre de las mediciones aumenta debido a que la función de transferencia que gobierna la relación entre la señal eléctrica generada por el anemómetro y la velocidad del viento correspondiente es dada por el fabricante. Esta función de transferencia es creada con base en el diseño original del anemómetro y el comportamiento estadístico de una muestra de los anemómetros fabricados [3]. Por tanto, no refleja necesariamente el comportamiento de cada anemómetro particular, lo que si se obtiene mediante una prueba de calibración según los requerimientos de la norma IEC [4]. Esta misma norma prescribe el uso de anemómetros de copas para las mediciones de velocidad del viento, debido a su robustez y que han sido empleados por mucho tiempo con mucha investigación asociada a su uso y calibración.

Conocer la precisión de los anemómetros y asegurar esta con una calibración adecuada es de suma importancia tanto para los trabajos de investigación como para los anemómetros instalados en un aerogenerador ya que cualquier falencia en la medición de la velocidad del viento tendrá un gran impacto en los ingresos económicos [5]. En algunos estudios relacionados con la evaluación del recurso eólico no se hace mención de qué tipo de calibración es con la que cuentan los anemómetros utilizados, por ejemplo en [6], se realiza una investigación sobre la estimación del recurso eólico usando como base la velocidad del viento y modelos de curvas de potencia de aerogeneradores, donde se utilizaron datos diarios de velocidad del viento del cinco lugares diferentes de Nueva Zelanda, se realiza la estimación utilizando modelos de regresión lineal y no lineal, con y sin variables exógenas, con lo que se observó que el modelos no lineales superan a los lineales. En [7] se realiza un estudio la medición del coeficiente para un aerogenerador de eje vertical de 12 kW, donde se utilizó un anemómetro de copas para determinar la velocidad promedio del viento, con lo cual se determinan los parámetros necesarios para hacer funcionar la turbina en una relación de velocidad de punta óptima. Al momento de realizar una caracterización de un anemómetro es de suma importancia tomar en cuenta factores externos como los que se mencionan en [8] donde se estudió como afectan las condiciones ambientales en las calibraciones de los anemómetros, y con ello estimar los errores en la magnitud de la velocidad del viento debido a los cambios de las condiciones ambientales en las que se desarrolló previamente la calibración, En [8] se analizaron 9 diferentes anemómetros con la ayuda de un túnel de viento S4 del Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” en la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM) , y se logró determinar que las constantes de calibración de transferencia de estos equipos son afectadas por los cambios de la densidad del aire. Además, existen factores de interferencia entre los límites del túnel, los rotores de los anemómetros y sus sistemas de montajes que pueden introducir un sesgo significativo en los resultados de la calibración [9].

En [10] se estudia el efecto de la geometría del rotor en la función de transferencias del anemómetro de copas de una forma experimental y analítica llevados a cabo en el instituto IDR/UPM, en este se determina que la función de transferencia se ve afectada principalmente por la relación entre el radio de las copas y el radio de rotación del centro de las copas.

Son múltiples parámetros los que se deben de tomar en cuenta, para lograr una calibración adecuada en los anemómetros de copas, en [11] se desarrolló un calibrador de anemómetro totalmente automático destinado a realizar calibraciones rápidas y precisas con el fin de satisfacer la creciente demanda y los estrictos requisitos de la industria eólica, el instrumento utiliza un conjunto amplio de diferentes sensores e instrumentación,

controla el túnel de viento, realiza todo el procesamiento de datos y cálculos necesarios para que un usuario si experiencia pueda llevar a cabo la calibración con una notable precisión. Además, en la actualidad existen empresas las cuales ofrecen el servicio de calibración de los anemómetros como [12] y [13] las cuales son certificadas por MEASNET (Red internacional de medidas armonizadas y reconocidas en energía eólica) y Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS-Organismo de acreditación alemán) respectivamente.

En el presente trabajo se muestra una validación experimental de la homogeneidad estadística de un grupo de anemómetros de copas, realizada sin equipos certificados, con el objetivo de determinar si alguno del lote de anemómetros presenta un comportamiento notablemente diferente del resto, o bien si todos operan dentro del rango declarado por el mismo fabricante.

Materiales y métodos

Primero, se realizaron pruebas sobre un grupo de diez anemómetros de copas del fabricante Davis, empleando un datalogger Envoy 8X y el software Weather Data Transfer Utility; el mismo tipo de equipos que se encuentran en literatura de medición de potencial eólico [14]. Se empleó un túnel de viento con un ventilador axial de velocidad variable y además un túnel de viento con un ventilador centrífugo, operado a velocidad fija. Los anemómetros en este caso se colocaron a la salida de los túneles de viento, pues sus áreas de sección transversal no permiten colocar los anemómetros dentro de los túneles.

Segundo, se realizaron pruebas sobre dos anemómetros de copas del fabricante Inspeed, modelo Vortex, distintos del lote anterior. Se empleó un anemómetro de hilo caliente como velocidad de referencia. Las pruebas se realizaron con los mismos dos túneles de viento del caso anterior, pero en este caso variando la velocidad de ambos. Una vez más los anemómetros se colocaron a la salida del túnel de viento.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de los ensayos realizados y las variables de cada caso. La descripción detallada de las condiciones específicas de cada prueba se brinda en las subsecciones siguientes.

Cuadro 1
Descripción de los tres ensayos

Ensayo	Anemómetros	Fabricante	Turbo máquina	Distancias desde el ventilador	Velocidad de rotación o porcentaje del voltaje máximo en el motor
1	A, B, C, D, E, F, G, H, I, NUEVO	Davis	Túnel de viento axial	No aplica	32, 54, 74 y 100 %
			Túnel de viento centrífugo		1000 RPM
			Túnel de viento axial		40, 70 y 100 %
2	A, B	Inspeed	Túnel de viento centrífugo		1000, 1400 y 1800 RPM

La variabilidad de los equipos fue debido a la disponibilidad de estos, en el caso del lote de anemómetros Davis, no fueron comparados con los Inspeed debido a que, según las necesidades del proyecto, fueron instalados en las torres de medición antes de la llegada de los anemómetros Inspeed. Por esa razón los últimos dos anemómetros fueron probados de manera independiente y se optó por tener un anemómetro de hilo caliente de referencia.

En todos los casos las mediciones obtenidas fueron procesadas con el software Minitab mediante análisis de varianza y para las pruebas con túnel de viento la información fue agrupada mediante el método de Tukey y una confianza de 95%.

Siguiendo lo indicado en [15] se siguió en todo caso el principio de aleatorización, para dar validez a las pruebas estadísticas que se realizan. En algunos casos donde fue posible se siguió también el principio de repetición, entendido como ejecutar más de una vez una combinación de factores. Adicionalmente, se indica que para el caso de los anemómetros Davis, se trata de una tecnología reportada en literatura previa [16].

Ensayo #1 Pruebas de anemómetros Davis con túneles de viento axial y centrífugo

Los anemómetros sujetos a pruebas fueron del tipo de copas, modelo 6410, miden la velocidad del viento en el rango de 0,4 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0,1 m/s y un valor umbral de 0,4 m/s. Fueron identificados con letras de la A hasta la J. Luego el anemómetro rotulado como J, que fue reemplazado y se rotuló como “NUEVO” para diferenciarlo del resto. El grupo de ensayos realizado fue realizado con dos túneles de viento. El primer túnel con un ventilador axial, potencia de $\frac{1}{4}$ hp, dimensiones del ducto: diámetro interno 5,125 in., longitud 47 in., velocidad de rotación variable gobernando el voltaje de operación del motor. Las pruebas se realizaron con porcentajes de voltaje de 32%, 54%, 74% y 100%. El segundo túnel con un ventilador centrífugo, potencia de 1 Hp, velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM) entre 1000 y 1800, dimensiones del ducto: longitud 67 in., diámetro 8 in. Las pruebas se realizaron con el equipo operando a 1000 RPM. En la figura 1 se muestran ambos túneles de viento.

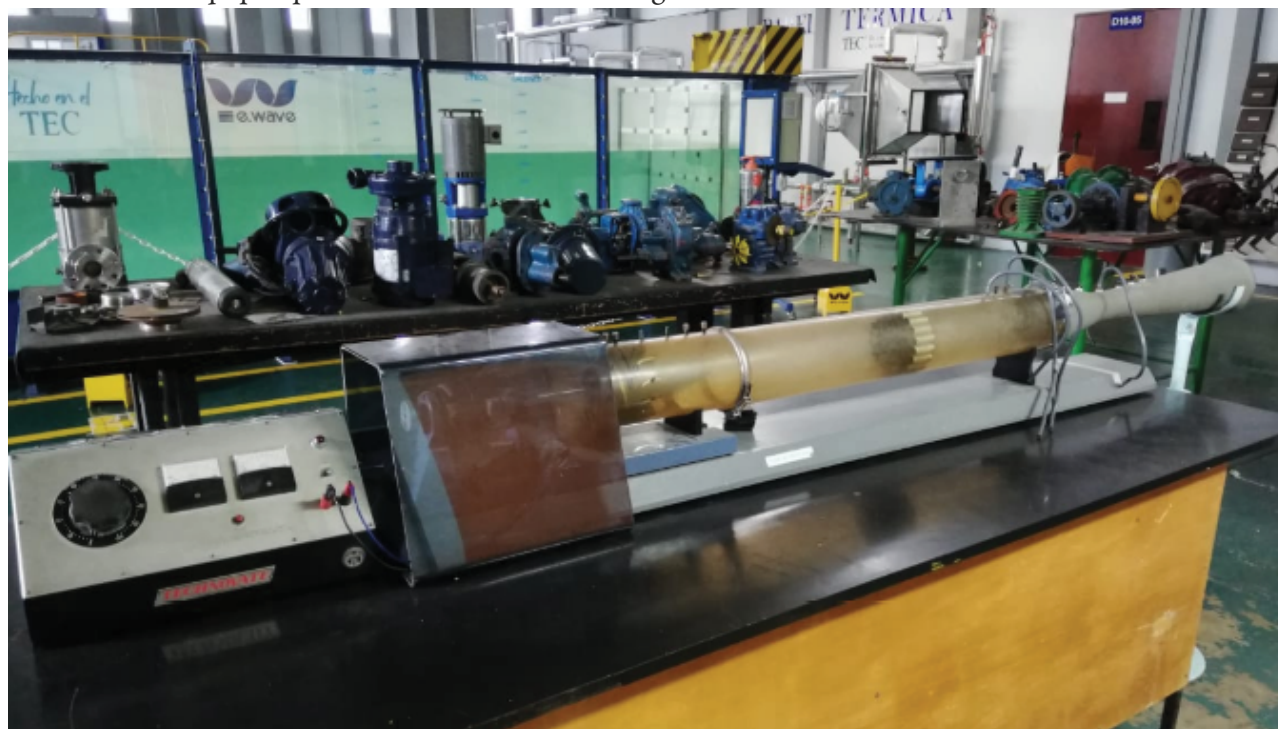


Figura 1.

Túneles de viento de viento: axial (izquierda) y centrífugo (derecha)

La colocación de los anemómetros respecto al túnel de viento se muestra en la figura 2. Se tomaron datos con una frecuencia de muestreo de 10 s durante 5 minutos en para cada velocidad, con el datalogger Envoy 8X del fabricante Davis.



Figura 2

Anemómetro Davis siendo probado en el túnel de viento axial

Ensayo #2 Pruebas de anemómetros Inspeed con túneles de viento axial y centrífugo

El segundo grupo de ensayos fueron realizados sobre dos anemómetros de copas que se rotularon como A y B, distintos del lote anterior, marca Inspeed modelo Vortex, los cuales miden en un rango de velocidades entre 2,2 y 55,9 m/s sin precisión declarada por el fabricante y con una resolución de 0,1 m/s. Ambos túneles tuvieron un tiempo de calentamiento de 15 minutos antes de iniciar el proceso de pruebas. El montaje en el túnel de viento centrífugo se muestra en la figura 3. Se buscó que el poste de medición no interfiriera con el flujo. También que el eje del anemómetro coincidiera con el eje del túnel y que su centro estuviera alineado con el centro del túnel.

En esta ocasión las mediciones se compararon con un valor referencia mediante un anemómetro de hilo caliente, marca Extech modelo 407123. Tanto los anemómetros de copas como el de hilo caliente se colocaron a una distancia fija del túnel de viento y se varió la velocidad en los túneles. En el caso del túnel centrífugo se operó a 1000, 1400 y 1800 RPM. El túnel de viento axial se operó a voltajes de 40%, 70% y 100%. Los datos se recolectaron con un software que se instala directamente en un computador. Del mismo modo los anemómetros se conectan de forma directa al computador, sin un datalogger externo. La frecuencia de muestreo fue de 1 minuto y cada combinación se probó durante 10 minutos.



Figura 3
Anemómetro Inspeed siendo probado en el túnel de viento centrífugo

Resultados y discusión

Ensayo #1 Pruebas de anemómetros Davis con túneles de viento axial y centrífugo

Las mediciones obtenidas en todas las combinaciones realizadas se muestran en la figura 4. Donde se realizaron algunas repeticiones al azar para cada velocidad de los túneles de viento. Se observa que con el túnel centrífugo a 1000 RPM el comportamiento fue similar en todos los anemómetros. La segunda tendencia con mayor similitud ocurre con 32% de voltaje en el túnel axial. Los otros resultados con el túnel axial muestran diferencias importantes para algunos anemómetros. Como no hubo réplicas del experimento completo, se desconoce si hubo efecto de factores externos.

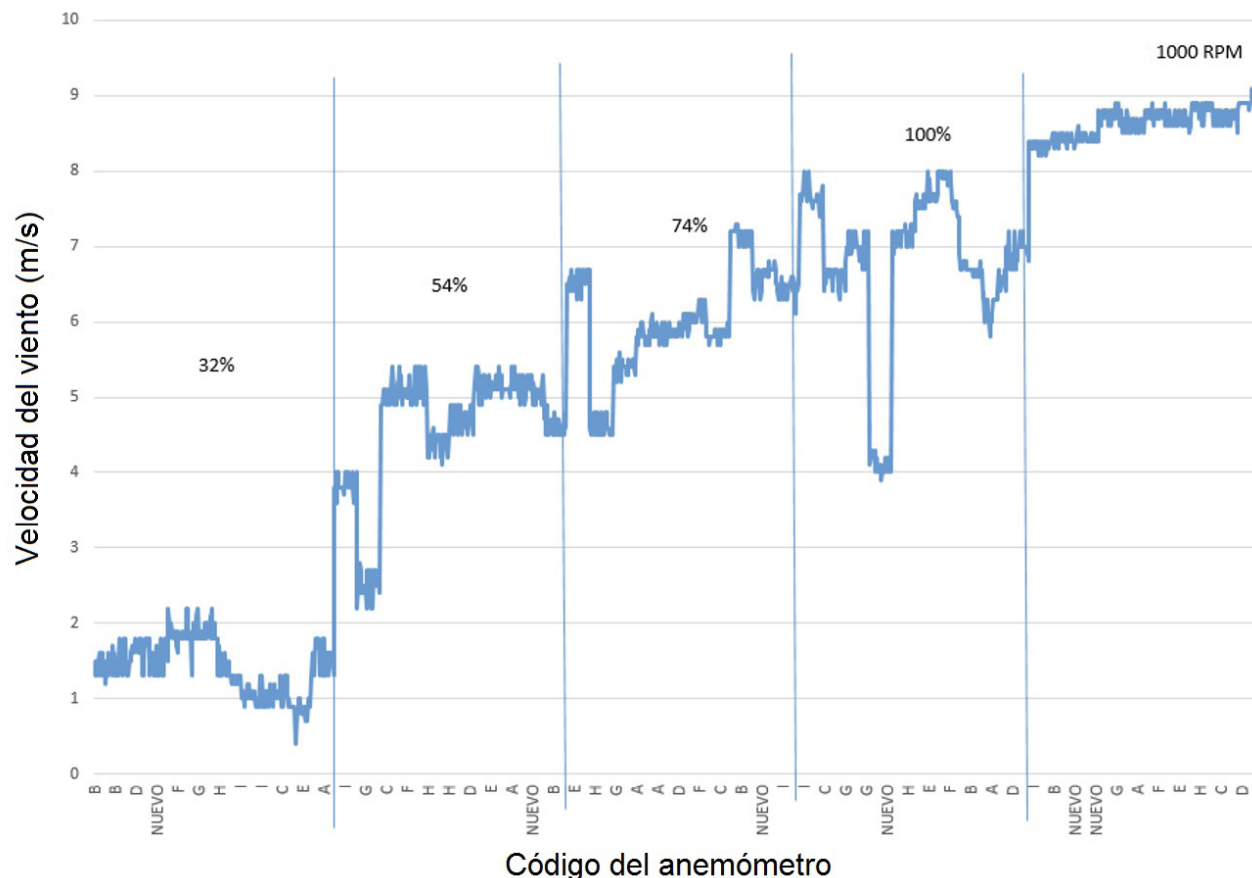


Figura 4.

Velocidades medidas por los anemómetros Davis con el ventilador axial y centrífugo.

Al realizar el análisis de varianza y aplicar el método de Tukey para las pruebas realizadas en el túnel de viento axial con voltajes de 32%, 54%, 74% y 100% del voltaje de operación se obtienen los resultados mostrados en la figura 5.

Para el caso de 32% las medias de D, NUEVO, A, y B no difieren estadísticamente entre sí. Los datos de B, D y NUEVO fueron tomados de forma consecutiva según se puede observar en la figura 5. Las medias de F y G no difieren estadísticamente entre ellas, pero sí con el resto, además estos datos también fueron tomados de forma consecutiva. Las medias de C e I no difieren estadísticamente entre ellas, pero sí con el resto, una vez más estos datos fueron tomados de forma consecutiva. Estadísticamente el Anemómetro E es diferente a los demás.

Al operar el ventilador axial con un voltaje de 54 % las medias de A, E, F, NUEVO y C indican que miden estadísticamente igual entre ellos. Todos sus datos no fueron recolectados de manera consecutiva. Las medias de D, B, H, I y G indican que miden estadísticamente diferentes a los demás.

Al aplicar el mismo procedimiento para un voltaje de 74 % las medias de B, I, F, G y H miden estadísticamente diferentes a los demás, las medias de D, A y C miden estadísticamente igual entre sí y las medias de NUEVO y E miden estadísticamente igual entre sí.

Para el caso de 100% nuevamente algunos anemómetros son similares entre si pero distintos al resto, no obstante, en cada caso la tendencia cambia en cuanto a cuáles son los equipos distintos del resto. Vale la pena indicar que, a pesar de que estadísticamente los resultados no son iguales puesto que la varianza disminuyó para cada anemómetro; todos los resultados están entre 8,3 y 8,9 m/s con el túnel de viento axial al 100% del voltaje. Esto es un rango de 0,6 m/s que es menor al ± 1 m/s declarado por el fabricante.

Anemómetro	N	Media	Agrupación
F	29	1,8759	A
G	33	1,8758	A
D	31	1,5871	B
NUEVO	26	1,5538	B
A	29	1,5517	B
B	34	1,4647	B C
H	29	1,3483	C
C	29	1,0793	D
I	29	1,0414	D
E	29	0,8724	E

(a)

Anemómetro	N	Media	Agrupación
A	29	5,1448	A
E	29	5,1345	A
F	29	5,1034	A
NUEVO	29	5,0931	A
C	29	5,0621	A
D	29	4,7483	B
B	29	4,6241	C
H	29	4,4000	D
I	29	3,8379	E
G	29	2,5414	F

(b)

Anemómetro	N	Media	Agrupación
B	29	7,1655	A
NUEVO	29	6,6207	B
E	29	6,5621	B
I	29	6,4310	C
F	29	6,0759	D
D	29	5,8483	E
A	29	5,8345	E
C	29	5,8207	E
G	29	5,3966	F
H	29	4,6000	G

(c)

Anemómetro	N	Media	Agrupación
D	30	8,9067	A
H	28	8,8286	B
F	29	8,7517	C
G	29	8,7345	C D
C	29	8,7103	C D
E	29	8,6793	D E
A	29	8,6241	E
NUEVO	29	8,4483	F
B	29	8,4138	F
I	29	8,3379	G

(d)

Figura 5.

Método de Tukey para las mediciones del ventilador axial al 32% (a), 54% (b), 74% (c) y 100% (d).

A la luz de estos resultados se debe tener en mente que existe una diferencia entre significancia estadística e importancia práctica, pues de acuerdo con [15] es posible concluir que dos tratamientos son diferentes estadísticamente pero no necesariamente representan una diferencia que en la práctica sea importante. Tal es el caso de estos resultados donde el rango de resultados está dentro del margen de error propio de los equipos.

Un consolidado de los resultados se presenta en la figura 6 que muestra la gráfica de interacción para velocidad para las medias de los datos de todos los anemómetros. Aquí se puede ver que hubo algunos

comportamientos atípicos. El hecho de que los anemómetros con comportamientos atípicos varíen de una velocidad a otra hace suponer que esto es debido a factores externos al anemómetro.

Finalmente, al intentar comprobar la normalidad de los residuos mediante la prueba correspondiente, se encontró que los residuos no son normales.

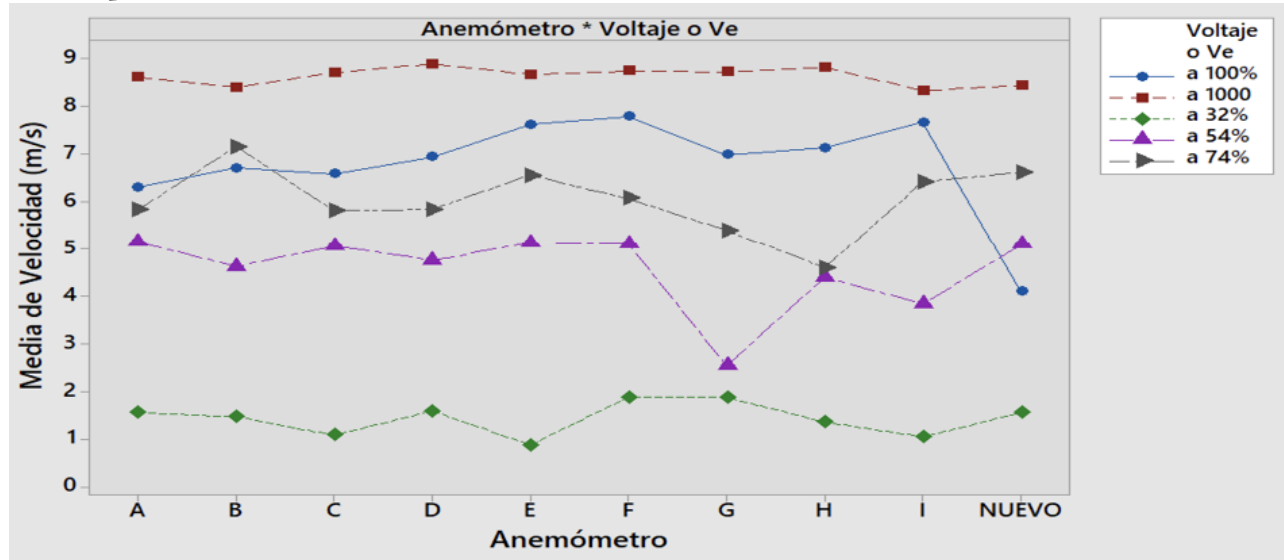
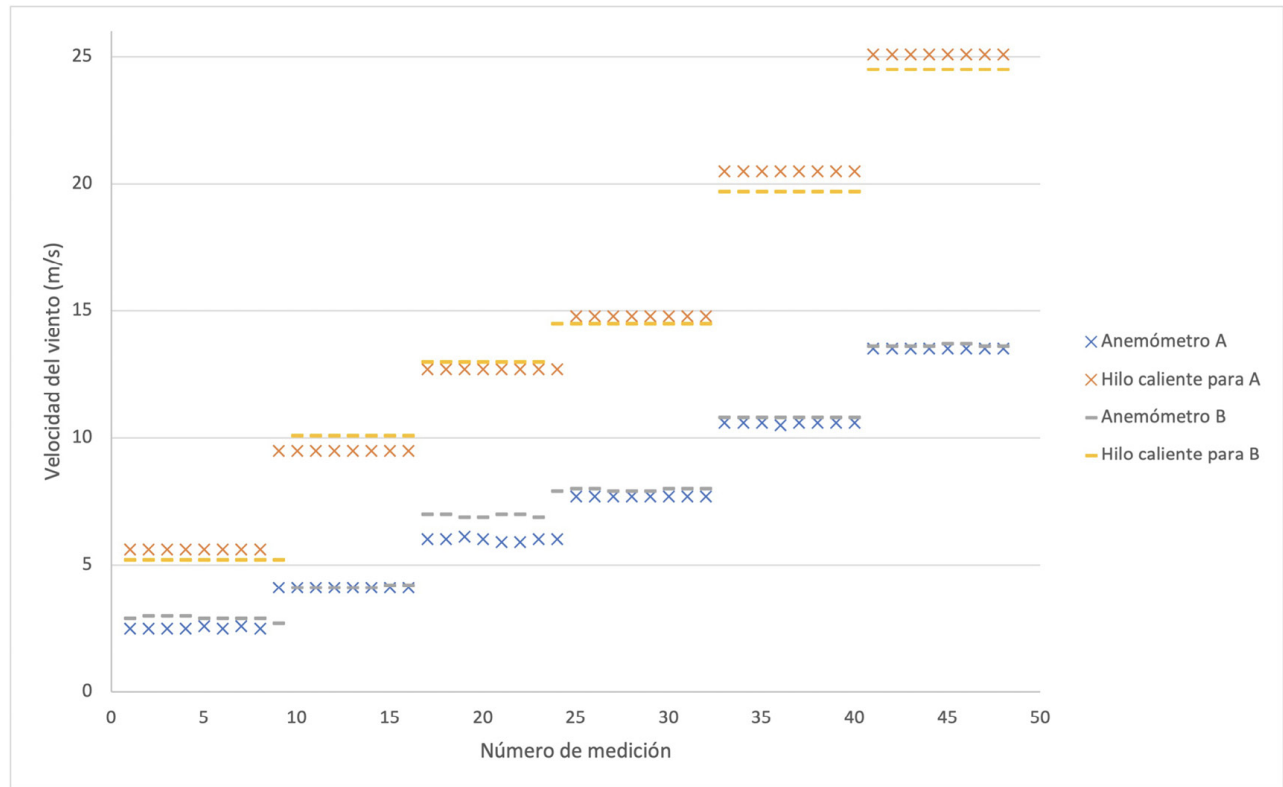


Figura 6.

Medias de velocidad (Ve representa velocidad en RPM).

Ensayo #2 Pruebas de anemómetros Inspeed con túneles de viento axial y centrífugo

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran en la figura 7 para los anemómetros A y B, así como los datos registrados por el anemómetro de hilo caliente que fue colocado luego de cada medición tomada con los anemómetros de copas. Dado que el área de sección del anemómetro de copas es comparable con la sección transversal del túnel de viento, se genera un efecto de bloqueo que supera el máximo de 10% aceptable [17]. Esto no ocurre con el anemómetro de hilo caliente que tiene una sección muy pequeña en relación al túnel de viento. Por esta razón en la figura 7 existe una diferencia considerable entre las velocidades registradas por los anemómetros Inspeed y el de hilo caliente. Siendo mayor, razonablemente, lo registrado por el hilo caliente que no bloquea el flujo.

**Figura 7.**

Mediciones de los anemómetros Inspeed e hilo caliente.

En este caso, dado que se trabaja con una velocidad de referencia, el análisis con Minitab permitió obtener las ecuaciones de regresión (1) y (2). Donde V representa la velocidad del viento de referencia en función de la medición del anemómetro de copas A, indicada como V_A o bien del anemómetro B indicado como V_B .

$$V = 2,196 + 1,6897 V_A \quad (1)$$

$$V = 1,574 + 1,6897 V_B \quad (2)$$

A pesar de que las diferencias entre las velocidades de referencia y las velocidades medidas por los anemómetros varían, entre más baja es la velocidad del viento la diferencia es menor. De modo que, aunque hay una diferencia respecto de la velocidad de referencia, existe una relación lineal entre la referencia y el valor medido por los anemómetros de copas, con un factor de corrección que es lo esperado. Aunado a lo anterior, la pendiente de la recta de mejor ajuste de las ecuaciones (1) y (2) son idénticas, tal cual se espera al ser los anemómetros A y B idénticos.

Conclusiones

Luego de realizar un análisis del comportamiento de un grupo de anemómetros para determinar si poseen un comportamiento similar o distinto entre ellos, es posible llegar a las siguientes conclusiones.

1. Al probar los anemómetros de forma externa en túneles de viento didácticos, se obtienen comportamientos atípicos, pero estos comportamientos varían de una velocidad a otra lo que hace suponer que se deben a factores externos al lote de anemómetros.

2. Mediante las comparaciones de Tukey se muestra que los grupos de anemómetros cuyas medias son estadísticamente equivalentes entre sí, varían de una velocidad a otra, lo que impide identificar de forma inequívoca a algún anemómetro distinto del resto.

3. El análisis con el ventilador centrífugo produjo el rango de mediciones más cerrado de todas las velocidades en este experimento. A pesar de que las medias no son estadísticamente equivalentes, puesto que la varianza disminuyó para cada anemómetro, todos están en un rango de 8,3 m/s a 8,9 m/s.

4. Las medias de los anemómetros ensayados se encuentran dentro de un rango menor a 1 m/s en los casos que se usó el túnel de viento centrífugo, es decir, la medición obtenida con los equipos evaluados mantiene una incertidumbre menor a $\pm 0,5$ m/s, en concordancia con lo declarado por el fabricante.

La información obtenida en este estudio indica que se requiere un espacio más controlado, como lo es un túnel de viento donde se puedan colocar los anemómetros internamente, para obtener un menor efecto de los posibles agentes externos.

A pesar de las limitaciones, se logró identificar que ninguno de los equipos probados mostró una tendencia o sesgo de manera sostenida en las diferentes pruebas. Por tanto, se puede afirmar que este método de pruebas es una alternativa válida, al menos para descartar equipos dañados, en casos de no disponer de un túnel de viento que pueda certificar el funcionamiento de los anemómetros.

Agradecimientos

A los estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica Christopher Arrieta Sánchez y Edward Gómez Chaves, asistentes del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica LIENE.

Referencias

- [1] C. Washburn y Romero M.Pablo, «Measures to promote renewable energies for electricity generation in Latin American countries,» *Energy Policy*, vol. 128, pp. 212-222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.059>
- [2] IRENA, «IRENA International Renewable Energy Agency,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>. [Último acceso: 18 June 2020].
- [3] R. V. Coquilla, J. Obermeier y B. R. White, «Calibration Procedures and Uncertainty in Wind,» *WIND ENGINEERING*, vol. 31, n° 5, 2007. <https://doi.org/10.1260/030952407783418720>
- [4] International Standard, «IEC-61400-12-1. Wind Turbines. Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines,» p. Annex F “Cup anemometer calibration procedure”, 2005-2012.
- [5] E. R. Millan, J. Cubas y S. Pindado, «Studies on Cup Anemometer Performances Carried out at IDR/UPM Institute. Past and Present Research,» *Energies*, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10111860>
- [6] E. Lydia, K. Suresh, I. Selvakumar y Prem Kumar Edwin, «Wind resource estimation using wind speed and power curve models,» *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 425-434, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.045>
- [7] J. Kjellin, F. Bülow, S. Eriksson, P. Deglaire, M. Leijon y H. Bernhoff, «Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 3050-3053, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.031>
- [8] S. Pindado, A. Sanz y A. Wery, «Deviation of Cup and Propeller Anemometer Calibration Results with Air Density,» *Energies*, 2012. <https://doi.org/10.3390/en5030683>
- [9] H. Ole, S. Ole y K. Leif, «Wind tunnel calibration of cup anemometers,» de *WINDPOWER 2012 Conference*, Atlanta, 2012.
- [10] S. Pindado, J. Cubas y F. Sorribes, «The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute,» *Sensors*, 2014. <https://doi.org/10.3390/s141121418>
- [11] L. Fernando y R. Duro, «A virtual instrument for automatic anemometer calibration with ANN based,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.814703>
- [12] NRGSystems, «NRGSystems Solar and Wind Solutions,» 23 April 2015. [En línea]. Available: <https://www.nrgsystems.com/news-media/u-s-based-wind-tunnel-achieves-measnet-certification>. [Último acceso: 22 June 2021].
- [13] WIND, «WIND Ammonit Wind Tunnel,» [En línea]. Available: <https://ammonit-windtunnel.com/kalibrierung-und-klassifizierung-von-anemometern/>. [Último acceso: 22 June 2021].
- [14] L. Bilir, M. Imir, Y. Devrim y A. Albostan, «An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at Incek region – Ankara, Turkey,» *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 910-923, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.017>
- [15] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, «Análisis y diseño de experimentos,» México, Mc Graw Hill, 2008, p. 545.
- [16] A. Bowen, N. Zakay y Ives R, «The field performance of a remote 10 kW wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 28, n° 1, pp. 13-33, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00011-3)

- [17] J. B. Barlow y W. H. Rae Jr, «Low speed wind tunnel testing,» INCAS Bulletin, vol. 7, nº 1, p. 133, 2015.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699877759008>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Maximino ménez-Ceciliano, Gustavo Richmond-Navarro
Comparación experimental de anemómetros de copas

Tecnología en marcha

vol. 37, núm. 1, p. 65 - 76, 2024

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

revistatm@itcr.ac.cr

/ ISSN-E: 2215-3241