

Anexo E: Anemometría sónica

Álvaro Cuerva Tejero, Ángel Sanz Andrés

Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva", IDR/UPM
E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid
28040 Madrid, España

ÍNDICE

RESUMEN	
E1. INTRODUCCIÓN	2
E2. IMPORTANCIA DE LAS MEDIDAS DE ANEMÓMETROS SÓNICOS EN METEOROLOGÍA, ENERGÍA EÓLICA Y AERODINÁMICA CIVIL	2
E3. COMPARACIÓN CON OTROS SENSORES	2
E4. EVOLUCIÓN	3
E5. LIMITACIONES	3
E6. MEDIDA DE LA TURBULENCIA	4
E7. MODELOS DE CORRECCIÓN	5
E8. BIBLIOGRAFÍA NORMATIVA	5
E9. REFERENCIAS	7

RESUMEN

Con este trabajo, presentado en el IX Congreso Ibérico de Energía Solar, se pretende establecer los pasos que deberían darse con objeto de permitir un uso sistemático de anemómetros sónicos en aplicaciones de energía eólica. Se presenta su importancia en las últimas actividades experimentales en energía eólica, como herramientas que permiten caracterizar propiedades del flujo atmosférico que tiene una influencia fundamental en el estado de cargas estructurales y en la producción energética de los aerogeneradores así como en la evaluación de recursos, y que por otro lado están haciendo posible la mejora de los diseños estructurales de las máquinas así como de los códigos computacionales que se utilizan en estas tareas. En lo que sigue se pretende proporcionar una visión del estado del arte de esta tecnología así como sus principales limitaciones.

NOTA

Aunque el contenido de este anexo corresponde a material elaborado con anterioridad para otros propósitos, es posible que en el proceso de adaptación a este curso se hayan deslizado erratas e inconsistencias no detectadas por el momento. Para consultar la posible lista de erratas véase <http://www.idr.upm.es/sita>

E1. INTRODUCCIÓN

Un anemómetro sónico es un sensor capaz de determinar el vector velocidad (modelos de tres o más sondas) a partir de la determinación de la influencia de dicho vector velocidad sobre la transmisión de señales de ultrasonidos entre pares de transmisores y receptores que configuran sondas de medida. Los anemómetros sónicos no tienen partes móviles y permiten velocidades de muestreo que abarcan hasta 100 Hz. Por otra parte prácticamente no requieren mantenimiento ni posteriores calibraciones a la inicial. Esto les convierte en instrumentos especialmente indicados en la determinación del vector velocidad con alta resolución temporal en flujos atmosféricos, aunque también se utilizan en medida de flujos en tuberías e interiores de edificios dado su bajo umbral de medida (no existen partes móviles). Profusamente utilizados desde su aparición en Meteorología, en la actualidad constituyen una herramienta fundamental en ensayo de aerodinámica civil, en obras públicas caracterización, del viento en entornos aeroportuarios, energía eólica etc. Los requisitos de precisión de las disciplinas citadas requieren un esfuerzo importante en el conocimiento profundo del sistema de medida de estos sensores y por tanto una revisión y evolución de los modelos existentes que lo describen.

E2. IMPORTANCIA DE LAS MEDIDAS DE ANEMÓMETROS SÓNICOS EN METEOROLOGÍA, ENERGÍA EÓLICA Y AERODINÁMICA CIVIL

Diversos programas de Investigación recientes han revelado la influencia de nuevos parámetros del flujo atmosférico en el comportamiento de estructuras civiles y aerogeneradores en términos de su respuesta estructural o de sus actuaciones (en el segundo caso) [14].

El cálculo de estos parámetros requiere conocer el vector velocidad con una gran resolución temporal. El anemómetro sónico es el sensor más utilizado para este propósito, principalmente en lugares donde el flujo turbulento es altamente tridimensional como ocurre en terreno complejo [13]. Sin embargo no hay una confianza general en los anemómetros sónicos. Aun cuando su funcionalidad ha sido ampliamente evidenciada, su respuesta no está bien caracterizada y es altamente dependiente del diseño que estemos utilizando, lo cual hace que su utilización como sensor estándar sea de algún modo arriesgada [2]. Es por tanto necesario avanzar algunos pasos para ampliar el conocimiento sobre estos sensores con el objetivo de alcanzar un uso sistemático adecuado.

E3. COMPARACIÓN CON OTROS SENSORES

Los anemómetros sónicos presentan diferentes ventajas comparados con los anemómetros de cazoletas y anemómetros de hilo caliente en aplicaciones atmosféricas [39], [8]. Los efectos dinámicos no afectan a los anemómetros sónicos ya que éstos no presentan ninguna parte móvil (caso contrario al de los anemómetros de cazoletas). Por otra parte estos sensores son capaces de medir el vector de viento completo en un punto, mientras que los anemómetros de cazoletas no [10]. Estos sensores pueden medir con una resolución temporal mucho mayor que los anemómetros de cazoletas o de hélice. Aunque las sondas de hilo caliente pueden admitir velocidades de muestreo en el orden de 10 kHz, su fragilidad y la necesidad de mantener el hilo (los hilos) libres de depósitos de polvo, constituye un grave problema en aplicaciones atmosféricas. Finalmente el mantenimiento de los anemómetros sónicos es bastante más simple que en el caso de otros sensores.

Presentan como inconveniente su precio, si bien éste no es intrínseco, sino que al tratarse de componentes electrónicos, está ligado directamente a los volúmenes de producción.

E4. EVOLUCIÓN

En 1944 apareció el primer sistema para medir la velocidad de viento por medios sónicos [25] (ver también [9]). Durante los primeros años 50 se produjo una intensa actividad en el desarrollo de las diferentes tecnologías [35], [37]. La solución basada en pulsos de ultrasonidos fue aplicada inicialmente, pero problemas existentes con la detección de frentes de pulsos [24] condujeron al uso de sistemas basados en la transmisión de señales continuas [18], [6], [25], [4] y [12].

En esta época aparecieron un conjunto de excelentes trabajos científicos sobre la teoría de medida de anemómetros sónicos. El modelo de Promedio a lo largo de la sonda quedó establecido (ver referencias [19], [36], [28]).

Aunque el uso de los sistemas basados en ondas continuas se mantuvo hasta los años 70 [29], [5], la mejora de los dispositivos electrónicos permitió poner a punto nuevos sistemas basados en transmisión de pulsos [31], [27] y [24].

En los años ochenta se comenzaron a utilizar anemómetros sónicos monoestáticos (las sondas están configuradas sólo por un par de transductores que actúan alternativamente de transmisores y receptores) [2]. Prácticamente de modo simultáneo se introdujo el algoritmo de medida basado en los inversos de los tiempos de transmisión de pulsos y se abandonaron los algoritmos basados en diferencias directas de tiempos y detección de fase. ([30], [7]).

En los años 80 se pone de manifiesto un gran interés sobre la influencia de la distorsión aerodinámica inducida por la propia estructura de los anemómetros sónicos, tanto sobre la medida de los valores medios [3] como sobre la de los parámetros turbulentos [16], [41].

En los años 90 tiene lugar un nuevo impulso de la anemometría sónica de la mano de la Energía Eólica. Se realiza una intensa revisión de su aplicabilidad en el campo de la Energía Eólica en comparación con otras técnicas. ([8], [10], [21], [33], [32]).

E5. LIMITACIONES

Los anemómetros sónicos presentan ciertas limitaciones que deberían conocerse como paso previo a su solución, mediante la modificación del diseño o mediante la corrección de los datos medidos. La mejora del diseño es siempre preferible, cuando es posible. Los anemómetros sónicos no miden exactamente el verdadero vector velocidad en un punto específico. En primer lugar se produce un proceso, que hasta ahora ha sido descrito por el modelo de Promedio instantáneo a lo largo de la sonda, el cual supone que las medidas de los sónicos son promedios instantáneos de los verdaderos valores a lo largo de las sondas de medida [28]. De modo adicional hay que considerar que estos promedios no se aplican sobre los verdaderos valores reales ya que el flujo es perturbado por la presencia del sensor de dos formas, bien introduciendo una perturbación aguas arriba (efecto de bloqueo) o bien por las estelas generadas por las estructuras soportes y las cabezas de los transmisores [17]. Del mismo modo la temperatura del flujo así como los depósitos sobre los transductores pueden afectar a la medida [15].

Estos factores limitan la capacidad para medir valores promedio así como magnitudes turbulentas del flujo. En primer lugar los efectos de la interferencia aerodinámica provocan desviaciones en la medida del vector velocidad de viento y por lo tanto en su módulo (órdenes de error del 10%), dirección de viento (órdenes de error de 5°) y ángulos de inclinación (órdenes de error de 5°). Del

mismo modo, estas interferencias introducen variaciones en parámetros turbulentos tales como las componentes del tensor espectral unidimensional siendo estos errores de hasta el 10% para las componentes longitudinal, lateral y vertical e incluso superiores al 50% para la componente de correlación uw . El modelo de Promedio instantáneo a lo largo de la sonda permite representar al anemómetro sónico como un filtro direccional caracterizado en principio por la geometría del sensor [23].

De forma añadida a las consideraciones anteriores conviene tener presente la alta dependencia de las actuaciones anteriores con el modelo específico de sónico que se esté manejando. Esto significa que cada modelo requiere una caracterización propia. Esta caracterización, principalmente la parte que tiene que ver con la interferencia aerodinámica, se lleva a cabo en túnel aerodinámico, Esta clase de ensayos es altamente sensible al proceso de ejecución del mismo. Finalmente existe una complicación relacionada con la influencia en la medida de las variaciones geométricas respecto a las condiciones de diseño entre diferentes unidades dentro de un mismo modelo de sensor [21], [33].

E6. MEDIDA DE LA TURBULENCIA

La medida de la Turbulencia mediante anemómetros sónicos ha sido modelada hasta este momento mediante un promedio instantáneo de los valores de velocidad turbulenta a lo largo de la sonda [28], [36]. Este modelo básicamente implica que las medidas de velocidad turbulenta del flujo dadas por cada una de las sondas son promedios instantáneos de las velocidades turbulentas reales a lo largo de las sondas en cuestión. De la aplicación de este modelo se desprende que el anemómetro sónico se comporta como un filtro pasa bajos que puede presentar atenuación o amplificación en rangos específicos de frecuencia, dependiendo de factores geométricos tales como las longitudes de las sondas, sus orientaciones, las distancia entre sus centros, y el módulo de la velocidad de viento y su ángulo de incidencia. Esto ocurre incluso para un sensor ideal que cuya estructura soporte no tuviese dimensiones físicas.

Kaimal [28] establece el valor $k_1 \cdot l = 1$ ($k_1 = 2\pi f/U$, siendo f la frecuencia en Hz, U la velocidad media expresada en m/s y l la longitud de la sonda) como el límite para considerar el efecto de modelar la medida como un promedio de los valores reales a lo largo de la sonda de medida. Esto constituye únicamente una estimación del efecto en casos reales (anemómetros de más de una sonda) aunque es válido para el caso de una única sonda. Este límite puede verse afectado por factores geométricos tales como posición y orientación de las sondas o los ángulos de incidencia de la velocidad del viento. En términos de frecuencia esto supone una limitación para la velocidad de muestreo equivalente a U/l . [38].

De forma adicional al modelo de Promedio Instantáneo a lo largo de la sonda, el proceso de medida es completado, en algunos casos recogidos en la literatura, considerando el efecto del método de cálculo de la velocidad. Los valores de velocidad que los sensores suministran consisten en agrupaciones por bloques de medidas muestreadas a alta frecuencia posteriormente promediados y que se entregan al usuario a una velocidad menor a la de muestreo original. [22].

Las medidas turbulentas se ven afectadas también por perturbaciones aerodinámicas. La Teoría de Wyndgaard junto con la Teoría Potencial permiten proporcionar soluciones analíticas para campo de velocidades turbulento distorsionado aguas arriba de estructuras simples [40] y en combinación con el método de paneles, para estructuras de cualquier complejidad [34].

Los modelos basados en la consideración de la atenuación de la velocidad a lo largo de la sonda

debido a las estelas permiten calcular variaciones en el tensor espectral medido respecto al caso sin perturbar en función del ángulo de acimut del vector velocidad (orientación del sensor) [41,42]. Estas pueden alcanzar valores superiores al 50% para el caso de los términos cruzados uw , el cual tiene una importancia fundamental en las acciones del viento sobre estructuras tales como puentes o aerogeneradores. En la literatura se muestran casos [21] en que aparecen fuertes amplificaciones de estas magnitudes. Del mismo modo, y con total lógica, se describe una importante influencia en la determinación de la desviación estándar de las componentes de viento [16].

7. MODELOS DE CORRECCIÓN

Existen modelos de dos tipos para realizar la corrección de las interferencias aerodinámicas. En todos los casos constituyen combinaciones de modelos analíticos y resultados de experimentos en túnel aerodinámico. Ambos tipos se aplican tanto a valores medidos medios como turbulentos.

El primer grupo pretende corregir la distorsión del flujo existente a lo largo de la sonda debido a la presencia de la cabeza de emisor y receptor mediante una función que depende de l/d (donde l es la longitud de la sonda de medida y d el diámetro equivalente de la cabeza del transductor) y del ángulo determinado por el vector de la sonda y el vector velocidad. En algunos casos la perturbación se modela mediante algoritmos lineales que ajustan datos experimentales [24]. En otros casos se ajustan modelos no lineales algo más complejos [41]. En ambos los esquemas de corrección se realimentan con resultados experimentales específicos.

Esta clase de modelos puede ser aplicada para corregir conjuntos de datos reales. En [21] los errores en la medida de la velocidad de viento media son corregidos mediante modelos de este tipo hasta valores del orden del 2% para velocidades de viento en torno a 8 m/s. Incluso aunque los autores no consideran el efecto de estructuras soportes que no sean las propias cabezas de los transductores.

La influencia del parámetro l/d y del ángulo α configurado por el vector sonda y el vector velocidad determinan un criterio de diseño óptimo consistente en aumentar ambas magnitudes con objeto de reducir la distorsión aerodinámica sobre la sonda de medida. En el caso de l/d esto implica aumentar l (en relación con lo cual existe un límite asociado a la respuesta en frecuencia [28]) o reducir d , posibilidad limitada por consideraciones estructurales. En el caso del mencionado ángulo α es una cuestión afectada por el diseño que puede verse influida por problemas de adherencia de suciedad o hielo para sondas demasiado verticales que permiten obtener mayores ángulos respecto a la velocidad de viento y por tanto minimizar la distorsión aerodinámica. [38].

El otro grupo de modelos de corrección considera el sensor como una estructura global. Estos aplican la teoría de Wyndgard sobre la distorsión de la turbulencia por estructuras [4]. Esta teoría se complementa bastante bien con la Teoría de Flujos Potenciales para describir la distorsión de la turbulencia en localizaciones aguas arriba de estructuras. [26].

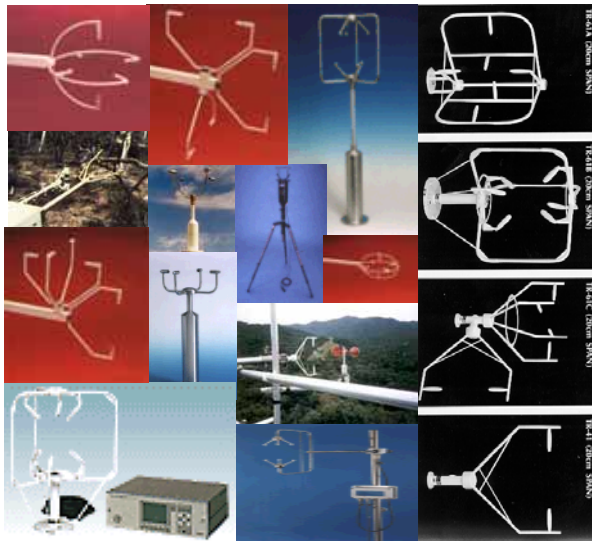
En [17] un modelo de estas características (ajustado mediante resultados de túnel aerodinámico) se aplica para corregir datos medidos con un anemómetro sónico tipo Solent, consiguiendo valores medios de reducción del error del orden del 60% (véanse también [43-46]).

8. BIBLIOGRAFÍA NORMATIVA

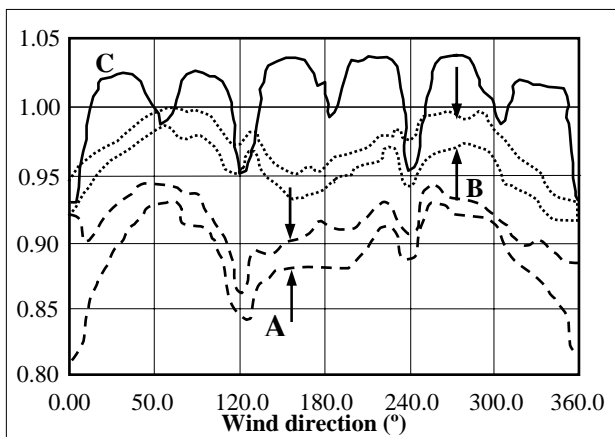
Se han considerado dos documentos de carácter normativo/recomendatorio. El primero de ellos es un futuro documento ISO sobre métodos de ensayos de aceptación para medida de velocidad de viento media [1], el cual trata básicamente sobre los ensayos necesarios para determinar la calidad

de un sensor en la medida de la velocidad de viento media aportando también información interesante sobre la realización de calibraciones. El segundo es un documento VDI sobre medida de turbulencia con anemómetros sónicos [38] y trata de la medida de diferentes parámetros turbulentos con anemómetros sónicos. Contiene aspectos interesantes sobre el montaje (también en [2]). Ambos documentos constituyen una base interesante para las actividades de sistematización en el campo del diseño, evaluación y uso de anemómetros sónicos.

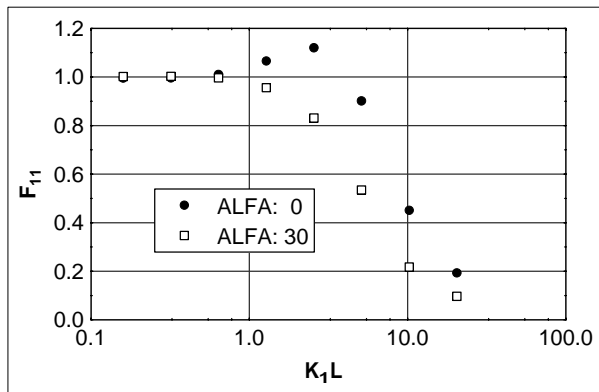
Los modelos matemáticos de anemómetros sónicos actualmente existentes, aunque tratan de considerar los efectos más importantes, tienen en cuenta sólo un número reducido de parámetros, por lo que requieren la introducción de ciertas hipótesis simplificativas significativas, que reducen la aplicabilidad de dichos modelos.



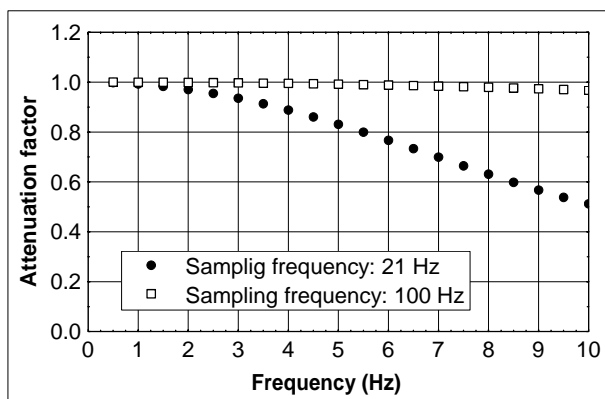
Diversos modelos de anemómetros sónicos.



Ensayos aerodinámicos de Anemómetros Sónicos en Túnel Aerodinámico. Línea continua (C) resultados del modelo Kaijo TR-61B[32]. Línea de puntos resultados del modelo Gill Solent para diferentes velocidades de viento dentro del rango normal de operación [21]. Línea de rayas (A) resultados del modelo Gill Solent para diferentes ensayos bajo las mismas condiciones nominales (diferentes unidades en diferentes túneles aerodinámicos que en el caso B) [33].



Efectos del promedio a lo largo de la línea. Relación de la componente uu del tensor espectral medida (modelo) respecto a la real (F_{11}).



Atenuación asociada a los efectos de muestreo y promedio por bloques.

E9. REFERENCIAS

- [1] Sonic Anemometers/thermometers- Part 1: Part 1 Acceptance Test Methods for Mean Wind Measurements, ed. ISO. ISO/TC 146/SC 5/WG 2, 1997.
- [2] European Wind Turbine Standards II, eds. A. Dekker & J. Pierik. JOR3-CT95-0064, 1998. ECN. Petten.
- [3] C.B. Baker, R.R. Eskridge, P.S. Conkling, and K.R. Knoerr, Wind Tunnel Investigation of Three Sonic Anemometers ed. NOAA. PB90-149808, 1989. NOAA Technical Memorandum. NOAA. Maryland.
- [4] D.J. Beaubien, A. Bisberg, and A. Pappas, Design, Development and Testing of an Acoustic Anemometer ed. Cambridge Systems Inc. AFCRL-66-650, 1966. Cambridge Systems.
- [5] V.M. Bovsheverov, B.M. Koprov, and M.I. Mordukhovic, Spatial Correlation Functions of Velocity and Temperature Components in the Surface Layer of the Atmosphere, *Izv. Atmospheric Oceanic Physics*, vol. 9, pp. 434-437, 1973.
- [6] V.M. Bovsheverov and V.P. Voronov, Acoustic Anemometer, *Izv. Geophysics. Series*, vol. 6, pp. 882-885, 1960.

- [7] G.S. Campbell and M.H. Unsworth, An Inexpensive Sonic Anemometer for Eddy Correlation, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 18, pp. 1072-1077, 1979.
- [8] S. Cervenka, Selection of an Anemometer For Measurement of Wind Turbulence, ed. ECN. ECN-I-92-029 DE92 557290, 1992. ECN.
- [9] R.E. Corby, Acoustic Anemometer-Anemoscope, *Electronic* 23, vol. 1, pp. 88-90, 1950.
- [10] A. Cuerva, A. Sanz-Andrés, N. Benzdenejnykh, and J.M. Perales, Assessment of Performances of Ultrasonic Anemometers as one Step Ahead in Wind Measurements of Energy Production of a Wind Turbine, ed. R. Watson. pp. 418-421, 1998. European Wind Energy Conference EWEC 97. IWEA. Dublin.
- [11] A.J. Dyer and V. Sitaramen, Minimizing the Leveling Error in Reynolds Stress Measurements by Filtering, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 9, pp. 532-534, 1970.
- [12] H.L. Fox, Continuous-wave Three-component Sonic Anemometer, eds. Bolt, Beranek, and Newman. AFCRL-68-0180, 1968.
- [13] A. Fragoulis, The Complex Terrain Wind Environment and Its Effects on the Power Output and Loading of Wind Turbines, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA, pp. 33-40, 1997. Reno.
- [14] A. Fragoulis, Investigation of Design Aspects and Design Options for Wind Turbines Operating in Complex Terrain Environments ,COMTERID Final Report Draft JOR3-CT95-003, 1998. UE.
- [15] C.A. Friehe, Effects of Sound Speed Fluctuations on Sound Anemometer Measurements, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, pp. 607-610, 1976.
- [16] A.L.M. Grant and R.D. Watkins, Errors in Turbulence Measurements with a Sonic Anemometer, *Boundary Layer Meteorology*, vol. 46, pp. 181-194, 1989.
- [17] A. Grelle and A. Lindroth, Flow Distortion by a Solent Sonic Anemometer: Wind Tunnel Calibration and its Assessment for Flux Measurement over Forest Field, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 11, pp. 1529-1542, 1994.
- [18] A.S. Gurvich, Acoustic Microanemometer for Investigation of the Microstructure of Turbulence, *Acoustic Journal*, vol. 15, pp. 368-369, 1959.
- [19] A.S. Gurvich, The Pulsation Spectra of the Vertical Component of Wind Velocity and their Relations to the Micrometeorological Conditions, *Izv. Atmospheric Oceanic Physics*, pp. 101-136, 1962.
- [20] T. Hanafusa, Y. Korobi, and Y. Minutsa, Single Head Sonic Anemometer-Thermometer 3, 1980. Lower Tropospheric Data Compatibility. WMO Instruments and Observing Methods. Geneva.
- [21] D. Heinemann, D. Langner, U. Stabe, and H. Waldl, Measurement and Correction of Ultrasonic Anemometer Errors and Impact on Turbulence Measurements, ed. R. Watson. pp. 409-412, 1998. European Wind Energy Conference EWEC 97. IWEA. Dublin.

- [22] K. Henjes, P.K. Taylor, and M.J. Yelland. Effect of Pulse Averaging on Sonic Anemometer Spectra, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999.
- [23] T.W. Horst, Spectral Transfer Functions for a Three-Component Sonic Anemometer, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 12, pp. 1072-1075, 1973.
- [24] J.C. Kaimal, Sonic Anemometer Measurement of Atmospheric Turbulence, pp. 551-565, 1978. Dynamic Flow Conference. Pergamon Press.
- [25] J.C. Kaimal and J.A. Businger, A Continuous Wave Sonic Anemometer-Thermometer, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 2, pp. 156-164, 1963.
- [26] J.C. Kaimal, J.E. Gaynor, H.A. Zimmerman, and G.A. Zimmerman, Minimising Flow Distortion Errors in a Sonic Anemometer, *Boundary Layer Meteorology*, vol. 53, pp. 103-115, 1990.
- [27] J.C. Kaimal, J.T. Newman, A. Bisberg, and K. Cole, An Improved Three-component Sonic Anemometer for Investigation of Atmospheric Turbulence. In "Flow-Its Measurement and Control in Science and Industry" Instrument Society of America, vol. 1, pp. 349-359, 1974.
- [28] J.C. Kaimal, J. Wyngaard, and D.A. Haugen, Deriving Power Spectra from a Three-Component Sonic Anemometer, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 7, pp. 827-837, 1968.
- [29] B.M. Koprov, D. Sokolov, and D. Yu, Spatial Correlation Functions of Velocity and Temperature Components in the Surface Layer of the Atmosphere, *Izv. Atmospheric Oceanic Physics*, vol. 9, pp. 349-359, 1973.
- [30] S.E. Larson, F.W. Weller, and J.A. Businger, A Phase Locked Loop Continuous Wave Sonic Anemometer for Investigation of Atmospheric Turbulence, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 18, pp. 562-568, 1979.
- [31] Y. Minutsa, Sonic Anemometer-Thermometer for General Use, *Journal of Meteorology Society*, vol. 44, pp. 12-24, 1966.
- [32] N.G. Mortensen, Flow-Response Characteristics of the Kaijo Denki Omni-Directional Sonic Anemometer (TR-61B) ed. Risø. Risø, 1994. Roskilde, Denmark.
- [33] N.G. Mortensen and J. Højstrup, The Solent Sonic-Response and Associated Errors pp. 501-506, 1992. 9th Symposium of Meteorology Observation and Instrumentation.
- [34] H.G. Norment, Calculation of Wyndgaard Turbulence Distortion Coefficients and Turbulence Ratios; and Influence of Instrument-Induced Wakes on Accuracy, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 9, pp. 505-519, 1992.
- [35] R.M. Schotland, The Measurement of Wind Velocity by Sonic Means, *Journal of Meteorology*, vol. 12, pp. 386-390, 1955.
- [36] B.A. Silverman, The Effect of Spatial Averaging on Spectrum Estimation, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 7, pp. 168-172, 1968.
- [37] V.E. Suomi. Sonic Anemometer. Exploring the Atmosphere First Mile, 1957.

- [38] VDI, Turbulence Measurement with Sonic Anemometers, ed. VDI. VDI 3786 Part 12, 1994. VDI.
- [39] J. Wyngaard, Cup, Propeller, Vane, and Sonic Anemometers in Turbulence Research, Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 13, pp. 399-423, 1981.
- [40] J. Wyngaard, The Effects of Probe-Induced Flow Distortion on Atmospheric Turbulence Measurements, Journal of Applied Meteorology, vol. 20, pp. 784-794, 1981.
- [41] J. Wyngaard, Transducer-Shadow Effects on Turbulence Spectra Measured by Sonic Anemometers, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 2, pp. 548-558, 1985.
- [42] S.F. Zhang, J. Wyngaard, J.A. Businger, and S.P. Oncley, Response Characteristics of the U.W. Sonic Anemometer, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 3, pp. 315-323, 1986.
- [43] Cuerva, A., Sanz-Andrés, A., On the sonic anemometer measurement theory, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 88, pp. 25-55, 2000.
- [44] Cuerva, A., Sanz-Andrés A., Sonic anemometry of planetary atmospheres, Journal of Geophys. Research, vol. 108, pp. 10-1-10-7, 2003.
- [45] Cuerva, A., Sanz-Andrés, A., Navarro, J., On multiple-path sonic anemometer measurement theory, Experiments in Fluids, vol. 34, pp. 345-357, 2003.
- [46] Cuerva, A., Sanz-Andrés A., Lopez, O., Singularities and undefinitions in the calibration functions of sonic anemometers, Journal of Atmospheric and Ocean Technology, vol. 21, pp. 1868-1875, 2004.