

# Anemómetros sónicos y de cazoletas: dos instrumentos distintos en nuestra red de observación

Manuel Lara Jaén. AEMET - Badajoz

## Introducción

Tras varios años de pruebas, el servicio meteorológico de Holanda (KNMI) ha decidido sustituir sus anemómetros de cazoletas y veletas por anemómetros ultrasónicos (sónicos por abreviar). También AEMET ha instalado anemómetros sónicos en parte de sus estaciones automáticas de la red sinóptica complementaria.

Este artículo trata de los anemómetros de cazoletas, su estado del arte actual y su sustitución en redes operativas por anemómetros sónicos y recaba la opinión sobre estos temas de D. Alvaro Cuerva, Dr. Ingeniero Aeronáutico que ha trabajado en proyectos europeos relacionados con la anemometría y la energía eólica

## El anemómetro de cazoletas y la sobrevelocidad

Inventado en 1846 por el astrónomo irlandés T.R. Robinson, el anemómetro de cazoletas es seguramente el instrumento de medida de la velocidad de viento más común, si dejamos aparte el muy específico tubo Pitot, y su imagen es sin duda uno de los iconos de la meteorología. Es sencillo, robusto y con relativamente pocas necesidades de mantenimiento, características todas muy estimables en la observación meteorología operativa. Una ventaja adicional importante, en la que no se suele reparar, es que el instrumento no necesita una alineación específica, en contra de lo que sucede por ejemplo con los anemómetros sónicos.

Entre finales del S. XIX y primeras décadas del XX los estudios sobre el instrumento se centraron en su linealidad, buscando el diseño que ofreciera la mejor relación entre la velocidad de rotación de las cazoletas y la velocidad del viento, encontrándose que ésta era mejor cuanto mayor fuera la razón entre el radio de las cazoletas y el brazo del anemómetro. También se apreció pronto que los modelos con tres cazoletas ofrecían mejor respuesta que los de contaban con cuatro. Tampoco pasó mucho tiempo antes de que se observara que el instrumento sobrestimaba la velocidad media en situaciones en las que la velocidad fluctuaba rápidamente. Dicho de una forma sencilla, los anemómetros de cazoletas responden más rápidamente a un incremento de velocidad que a una disminución de la misma magnitud, por lo que un instrumento perfectamente calibrado en un túnel de viento, tiende a sobrestimar la velocidad media en un ambiente turbulento. A este fenómeno se le denominó sobrevelocidad (*overspeeding*) y ya fue investigada por Schrenk en 1929, comenzando una



**Figura 1** - Tres modelos actuales de anemómetros de cazoletas clasificados dentro del Proyecto ACCUWIND [9]. Los modelos, de izquierda a derecha, son RISO P2546, VECTOR L100K y VAISALA WAA151 este último muy utilizado en observatorios aeronáuticos de AEMET.

larguísima serie de estudios, realizados con el fin de intentar evaluarla, caracterizarla, y en algunos casos, proponer métodos de corrección para la misma.

Un ejemplo relativamente reciente de estos trabajos es el Hayashi de 1987, el cual fija la ecuación de movimiento para el anemómetro estándar de la *Japan Meteorological Agency* (JMA), y forzándolo con un viento horizontal sinusoidal superpuesto a un viento medio, resuelve numéricamente la ecuación resultante. El resultado de este ejercicio teórico fueron sobrevelocidades que llegaban al 9% en las situaciones más desfavorables (amplitud grande, periodo pequeño). Hayashi señala que son similares aunque numéricamente superiores a los encontrados en trabajos anteriores por otros autores (Schrenk 1929, Sanuki 1952, Kondo et al 1972).

A su estudio teórico dinámico, Hayashi añade un experimento de campo en el que compara el citado anemómetro de cazoletas estándar de la JMA con un anemómetro sónico, situados ambos a 20 m de altura y muestreando a 5 Hz. Los resultados muestran una sobrestimación media del 6% para un rango de velocidades entre 5 y 12 ms<sup>-1</sup>. Termina Hayashi su artículo proponiendo un método relativamente simple para corregir este efecto, pero que para sus propios datos sólo consigue disminuir la sobrevelocidad del 6% inicial al 4%.

Este trabajo, tomado sólo como ejemplo de que todavía en 1987 el tema seguía poco claro, muestra sobrevelocidades intermedias respecto al de otros autores: Izumi y Barad (1970) la estimaron en general en un 10%, Kondo et al (1971) hablan de unos pocos tantos por ciento en el peor de los casos, mientras que Busch y Kristensen (1976) hablan de que solo en casos extremos superarían el 10%.

En la actualidad sabemos que en la sobrestimación de la velocidad media influye, no sólo la intensidad de la tur-

bulencia, sino su estructura. En contra de lo asumido en principio, la varianza de la componente longitudinal del viento medio no es el factor más influyente sino las varianzas de las componentes vertical y transversal así como sus covarianzas, y que diseños adecuados permiten minimizar el problema. Hoy existen en el mercado anemómetros de cazoletas con gran respuesta dinámica, y respuesta angular muy próxima a la ideal respuesta coseno (filtrado de la componente vertical) que dejan la sobrestimación en valores muy bajos o despreciables (inferiores a 2%, ver Fig. 1).

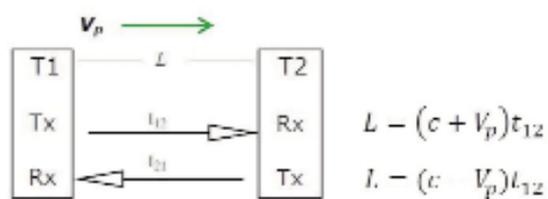
### Anemómetros sónicos

Los anemómetros sónicos comenzaron su desarrollo a mediados del siglo pasado, por lo que no suponen ninguna novedad, aunque si pueda serlo su utilización en redes meteorológicas operativas, ya que durante décadas su uso había estado reservada a la investigación. Su elevada frecuencia de muestreo y su capacidad para medir la componente vertical hicieron de él un instrumento muy utilizado en la investigación de la turbulencia atmosférica.

Su funcionamiento se basa en la medida de los tiempos de viaje de los pulsos ultrasónicos (~100 KHz) enviados por transductores que, en los modelos actuales, actúan alternativamente como emisores y receptores. Es habitual utilizar cuatro transductores enfrentados dos a dos tal y como se muestra en el modelo THIES de la Fig.2.

Supongamos que dos transductores T1 y T2 están separados una distancia L, típicamente del orden de 20 cm, y que emiten y reciben de manera alternativa un pulso sónico. Si llamamos c a la velocidad del sonido y  $V_p$  a la componente de la velocidad del viento en la dirección que los une, tendremos que la distancia L que los separa se podrá

escribir en función de los tiempos de viaje  $t_{12}$  y  $t_{21}$  como



Resolviendo para  $V_p$  y c obtenemos

$$V_p = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad c = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} + \frac{1}{t_{21}} \right)$$

Repetiendo el procedimiento con otro par de transductores en otra dirección en el mismo plano conseguiríamos la otra componente necesaria para definir el vector viento

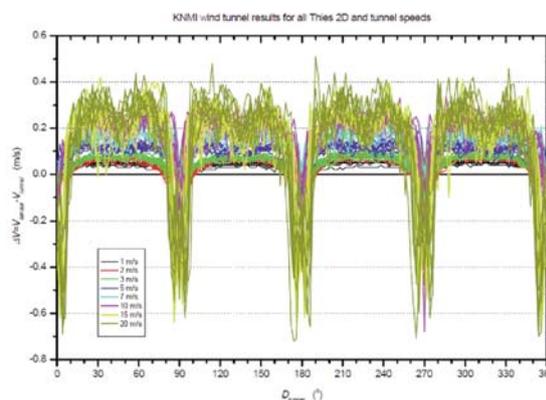
horizontal, y si añadiéramos otro par fuera de este plano, obtendríamos el vector viento tridimensional.

Las ventajas principales de los anemómetros sónicos son que, al no tener partes móviles, son más robustos y sus necesidades de mantenimiento casi nulas, y que su límite inferior de detección es virtualmente cero. Otra posible ventaja es que conocida la velocidad del sonido c, es posible calcular la temperatura virtual, por lo que los anemómetros sónicos pueden utilizarse como “termómetros virtuales” (algunos modelos comerciales incluyen este dato con una precisión nominal de +/-1 K). También puede considerarse una ventaja adicional el hecho de que un mismo instrumento nos proporciona el módulo y la dirección de la velocidad, frente al par de instrumentos, anemómetro y veleta, necesarios tradicionalmente.

Sin embargo, los anemómetros sónicos también tienen sus inconvenientes. En primer lugar, los transductores, y los brazos que los soportan, crean pequeñas turbulencias que distorsionan el flujo y la propagación del sonido, afectando a la medida de la velocidad (subestimándola) y a la



**Figura 2** - Anemómetro sónico THIES. Modelo probado y elegido por el KNMI



**Figura 3** - Errores en la medida velocidad del viento con simetría de 90° causados por las perturbaciones introducidas por brazos y transductores para 8 velocidades distintas del túnel aerodinámico. Extraído de [2].

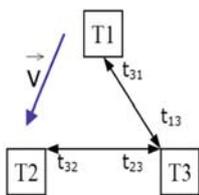
dirección del viento (ver Fig. 3). Este efecto, que se incrementa con la velocidad, es especialmente notable cuando el viento sopla paralelo a una pareja transductora, y debe ser corregido mediante técnicas de tratamiento de la señal.

El anemómetro WS425 de VAISALA, modelo instalado en las EMAS de AEMET (ver Fig.4) ofrece una variante de diseño interesante que ayuda en este problema. En lugar de utilizar 4 transductores funcionando como 2 parejas, utiliza sólo 3 formando un triángulo. Sus transductores tienen un ángulo de visión suficiente como para que cada uno ellos pueda recibir los pulsos de los otros dos, con el resultado de que dis-



**Figura 4** - Anemómetro VAISALA, mod. WS425, instalado en EMAS de AEMET.

ponemos de tres parejas en lugar de dos. De esta manera se consigue una redundancia que permite elegir los datos que resulten más óptimos para el cálculo. Por ejemplo, si el equipo detectara que el viento es paralelo a la pareja T1-T2, descartaría para el cálculo de la velocidad del viento el tiempo de viaje entre ellos y utilizaría los tiempos entre T1-T3 y T2-T3 evitando así utilizar caminos paralelos al viento (ver Fig. 5)



**Figura 5** - Esquema de funcionamiento del anemómetro sónico VAISALA WS425 de tres transductores. Los tiempos de vuelo entre las parejas T1-T3 y T2-T3 serían los utilizados en caso de que el viento soplará en la dirección T1-T2

En cualquier caso esta “anisotropía” del instrumento obliga a un proceso de calibración más complejo, en el que el sensor debe ser verificado para todos los acimuts.

Por otro lado algunas formas de precipitación también pueden perturbar las medidas. Este problema parece que se ha resuelto con el uso de transductores mayores y/o mediante detección y corrección de datos anómalos mediante algoritmos contenidos en el software del instrumento. Este aspecto también debe ser tenido en cuenta: estamos ante un instrumento técnicamente más complejo, y la complejidad técnica no es un buen aliado, en principio, cuando hablamos de instrumentos operativos en campo, que deben tener en la fiabilidad una de sus características principales. Sin embargo hay que decir, por los estudios de KNMI y por la limitada experiencia de que disponemos en AEMET, que estos instrumentos parece que se comportan de modo robusto.

estamos ante un instrumento técnicamente más complejo, y la complejidad técnica no es un buen aliado, en principio, cuando hablamos de instrumentos operativos en campo, que deben tener en la fiabilidad una de sus características principales. Sin embargo hay que decir, por los estudios de KNMI y por la limitada experiencia de que disponemos en AEMET, que estos instrumentos parece que se comportan de modo robusto.

**Estudios en el KNMI e instalaciones en AEMET**

En el año 2003 el Servicio Meteorológico Nacional de Holanda (KNMI) comenzó una serie de pruebas para comprobar la idoneidad de tres modelos comerciales de anemómetros sónicos de tres firmas distintas (THIES, GILL, VAISALA) para ser instalados en su red de observación. Las pruebas incluían verificaciones en túneles de viento, del propio KNMI (ver Fig.6) y del *Dutch National Aerospace Laboratory*, y comparaciones en campo, entre ellos y con los anemómetros y veletas utilizados por KNMI. Estos exhaustivos trabajos son realmente sobresalientes y muy de agradecer la disponibilidad de la información sobre los mismos. Los resultados más notables fueron ([1], [2] y [3]):

- 1.- En general los tres modelos se comportaron de forma satisfactoria, manteniéndose dentro de los requisitos OMM, y se consideraron aptos para operaciones, con la importante excepción del rango ya que ninguno de los probados alcanzaban nominalmente los 75 ms<sup>-1</sup>.
- 2.- Los anemómetros sónicos, además de medir dentro de margen, lo hacen homogéneamente entre ellos, con una correlación entre sus medidas de 0.999. La diferencia entre

las medidas de los sónicos y el anemómetro de cazoletas de KNMI resultan mayores, con una correlación de 0.992. 3.- Como consecuencia de lo anterior, si se instalaban anemómetros sónicos deberían desarrollarse funciones de transferencia para el uso climatológico de sus datos.

Las perturbaciones causadas por los brazos y transductores aparecían en todos los modelos en mayor o menor medida, siendo el equipo VAISALA el que mejor se mostraba en este aspecto, manteniéndose, en general, todos dentro de la precisión requerida, excepto puntualmente el equipo GILL para velocidades muy altas (> 60 ms<sup>-1</sup>) y ciertas orientaciones. En las pruebas de campo se detectó que un sensor fue dañado por aves y que estas también causaron algunas rachas espurias en otros.

Por último hay que señalar que se detectaron diferencias apreciables entre los sónicos y los convencionales en caso de precipitaciones líquidas intensas, sin que se pudiera concluir que fueran debidas a mal funcionamiento de los primeros en estas condiciones, ya que la capa líquida adherida a las cazoletas modifica también las propiedades dinámicas de los segundos.

A la vista de los resultados, KNMI se decidió por el modelo de la firma THIES, y en 2008 continuaron las pruebas con 10 unidades iguales de un modelo perfeccionado, más robusto y con un rango extendido hasta los 75 ms<sup>-1</sup> requeridos por OMM.

Por su parte AEMET instaló a finales de 2008 en sus nuevas EMAS de la Red Sinóptica Complementaria anemómetros sónicos VAISALA modelo WS425 (ver Fig. 4), antes ya mencionado y uno de los modelos probados por KNMI. En la tabla 1 figuran las características generales de este modelo, junto con los requisitos OMM y las del anemómetro de cazoletas VAISALA WAA151, instalado en numerosos observatorios aeronáuticos de AEMET.

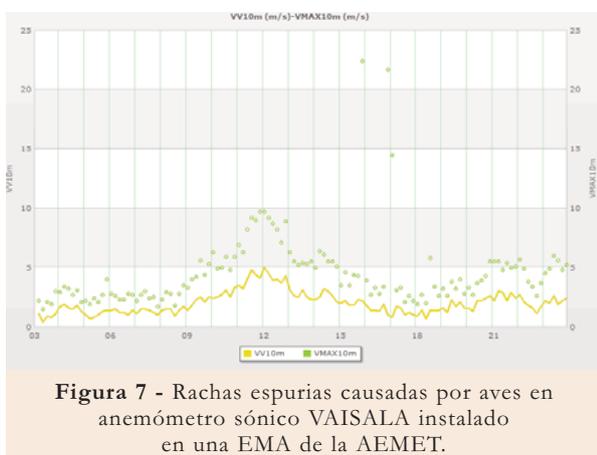
Puede comprobar el atento lector que el anemómetro sónico VAISALA no cumple la condición OMM para el rango. De hecho esta fue una de las principales razones que decantaron a KNMI en la elección del modelo de THIES. También puede comprobar que para una velocidad de 10 ms<sup>-1</sup> el sónico VAISALA ofrece una precisión de +/- 0.3 ms<sup>-1</sup> mientras que el anemómetro de cazoletas de la misma casa da un valor de +/- 0.17 ms<sup>-1</sup>, todos valores nominales extraídos de sus especificaciones técnicas, y esta diferencia aumenta al aumentar la velocidad. Hay que indicar que el Dr. Wauben señala en [1] como primera ventaja de los anemómetros sónicos la de ser instrumentos casi libres de mantenimiento, no su precisión.



**Figura 6** - Anemómetro sónico THIES en túnel de viento de KNMI, extr.de [2].

	OMM	VAISALA WS425 (sónico)	VAISALA WAA151 (cazoletas)
Rango	0-75 ms <sup>-1</sup>	0-65 ms <sup>-1</sup>	0.4-75 ms <sup>-1</sup>
Resolución	0.5 ms <sup>-1</sup>	0.1 ms <sup>-1</sup>	0.1 ms <sup>-1</sup>
Precisión	+/- 0.5 ms <sup>-1</sup> si v < 5 ms <sup>-1</sup> +/- 10% si v > 5 ms <sup>-1</sup>	+/- 0.13 ms <sup>-1</sup> ó +/- 3% (mayor valor)	+/- 0.17 ms <sup>-1</sup> (hasta 60 ms <sup>-1</sup> )
Umbral arranque	0.5 ms <sup>-1</sup>	Virtualmente cero	< 0.5 ms <sup>-1</sup>

Sin disponer de un estudio, ni siquiera parecido de lejos al realizado por KNMI, poco puede decirse hasta ahora del funcionamiento de estos anemómetros en nuestra red. Los instrumentos parece que funcionan de manera robusta, si bien la ausencia de parte móviles, una de las ventajas de los mismos, parece ser también un problema, ya que en algunos emplazamientos los pájaros se posan sobre el sensor, induciendo rachas falsas de velocidad (ver Fig. 7).



**Figura 7** - Rachas espurias causadas por aves en anemómetro sónico VAISALA instalado en una EMA de la AEMET.

## Anemometría e industria de la energía eólica

Resulta una obviedad hablar de la importancia de medidas precisas de velocidad de viento para la industria de la energía eólica. La toma de decisiones en esta industria, que suelen suponer una elevada inversión, se hace en base a estimaciones de producción de energía, las cuales dependen directamente de la velocidad media del viento, por lo que la incertidumbre en la medida de ésta se traduce, también directamente, en incertidumbre o riesgo financiero.

Es natural, por tanto, que en el sector de la energía eólica se haya hecho un gran esfuerzo en investigación y desarrollo en anemometría, convencional y sónica, del que la comunidad meteorológica resulta beneficiada, a pesar de que nuestros requerimientos de medida son diferentes.

Algunos ejemplos de esta actividad investigadora son los proyectos CLASSCUP y ACCUWIND de clasificación de anemómetros, y la red MEASNET de institutos de energía eólica. Miembros españoles de esta red son el CENER y el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” de la Universidad Politécnica de Madrid. A esta última institución pertenece el Dr. Alvaro

Cuerva, Ingeniero Aeronáutico y profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, que ha participado en diversos proyectos europeos relacionados con la anemometría, principalmente aplicada a la industria de la energía eólica. El Dr. Cuerva ha sido tan amable como para responder a algunas preguntas sobre estas cuestiones:

### ¿Desde el punto de vista de la industria de la energía eólica, qué requisitos debe satisfacer un anemómetro en cuanto a rango, precisión, frecuencia de muestreo etc?

Depende de la aplicación. Si se pretende caracterizar la velocidad media en periodos de 10 minutos, lo cual es un estándar en los análisis de recurso eólico o en la certificación de curva de potencia, los requisitos habituales son: un rango de calibración de 4 a 16 m/s y una frecuencia de muestreo superior a 0.5 Hz. En cuanto a la precisión se debe establecer la “clase del anemómetro” de acuerdo a la norma IEC 61400-121. La clase del anemómetro es un índice de precisión del anemómetro asociado al modelo, no a la unidad, que tiene en cuenta el comportamiento del sensor en diferentes condiciones de viento con diferentes niveles de turbulencia, inclinación del vector velocidad, temperatura, etc. Este índice de clase depende de si el anemómetro se va a instalar en terreno llano o complejo y permite calcular la incertidumbre asociada a la medida de la velocidad de viento. Además cada unidad debe ser calibrada individualmente.

Si el anemómetro se usa en análisis de turbulencia en los que es preciso determinar los parámetros estadísticos de 2º orden como varianzas, correlaciones o densidades espectrales de potencia, o bien en el análisis de extremos (ráfagas) es preciso utilizar sensores que midan las tres componentes del vector velocidad con un frecuencia de muestreo superior a los 10Hz.

### El problema de la sobrevelocidad siempre ha sembrado dudas sobre la bondad de los anemómetros de cazoletas en ambientes turbulentos. ¿Es un tema ya cerrado?

Es un tema muy conocido a partir de los últimos trabajos de los proyectos SITEPARIDEN, CLASSCUP y ACCUWIND. El proceso de clasificación recogido en la norma IEC 61400-121 tiene como objetivo, entre otros, cuantificar este efecto sobre la incertidumbre en la medida del anemómetro. Una conclusión general es que si se pretende medir de forma adecuada la turbulencia es preciso utilizar otro tipo de sensores como son los anemómetros sónicos.

**A la vista de los trabajos de MEASNET, de los labora-**

torios RisØ (Dinamarca) y otras instituciones, parece que la industria eólica sigue confiando en los anemómetros de cazoletas. ¿Ve Vd. una tendencia en la industria eólica hacia la sustitución de éstos por anemómetros sónicos?

Es cierto que el anemómetro de cazoletas ha sido y es una herramienta fundamental en el desarrollo de la energía eólica. Sin embargo cuando se pretenden determinar ciertas características de la turbulencia atmosférica como son las tres componentes del vector velocidad, la intensidad de turbulencia, espectros o ráfagas; todas ellas características que afectan intensamente al comportamiento de aerogeneradores y otras estructuras que operan en la atmósfera, el anemómetro de cazoletas no es suficiente. En estos casos el anemómetro sónico es la alternativa. Además este último presenta ventajas adicionales en cuanto a su robustez estructural y a la no necesidad de calibraciones periódicas. Sin embargo es preciso trabajar más en cuanto a fiabilidad de la electrónica ya que en la industria eólica se requiere que los anemómetros operen de forma ininterrumpida durante largos periodos. En el momento que este problema quede resuelto, muy posiblemente los anemómetros sónicos invadan las aplicaciones eólicas.

**La calibración de los anemómetros es un tema complejo. Es reconocido que diferentes calibraciones en túneles de viento de instituciones diferentes, todas de primer nivel, pueden conducir a resultados diferentes. El túnel aerodinámico del Instituto de Microgravedad Ignacio Da Riva de la UPM es el único homologado en España por MEASNET para la calibración de anemómetros. ¿Existe para estas instalaciones un concepto similar al de trazabilidad, utilizado en la calibración de otros sensores como barómetros o sondas de T?**

Dentro de MEASNET hay instituciones de ensayo e instituciones calibradoras. La diferencia es que las primeras no tienen trazabilidad a patrones mientras que las segundas sí. Al margen de esto, un túnel acreditado MEASNET ha calibrado una serie de anemómetros de referencia circulados por los centros de la red, y ha medido la salida de estos anemómetros, con un error respecto a la media de los centros MEASNET, menor que un cierto umbral de admisión/exclusión.

**En los anemómetros sónicos las perturbaciones causadas por los brazos y transductores son corregidas por software, al igual que las causadas por la precipitación; en su experiencia, ¿funcionan estas correcciones de manera adecuada?**

Los algoritmos de corrección referidos son excelentes si se han obtenido adecuadamente en túnel aerodinámico para cada unidad.

**¿Considera suficientemente madura y robusta la tec-**

**nología ultrasónica para el uso en redes meteorológicas operativas?**

Si lugar a dudas la tecnología está más que madura, sin embargo, debido a lo ambicioso y amplio de la aplicación propuesta, sería óptimo un análisis de los modelos candidatos en cuanto a la robustez de su operación en modo desatendido. Sin duda los fabricantes de anemometría sónica estarían dispuestos a abordar la construcción de modelos con criterios de redundancia que permitiesen una operación robusta y desatendida.

**Para ilustrar la importancia de la exactitud de la medida de viento en la industria eólica, puede concretar numéricamente a qué error en energía producida estimada conduciría un error del 10% en la velocidad media (+/- 10% es la tolerancia OMM para la medida de la velocidad media del viento) para una turbina media?**

Una estimación conservadora y muy simplificada, aunque orientativa, del mencionado error es que un error del 10% en la determinación de la velocidad media en un periodo se traduce aproximadamente en un 30% de error en la estimación de la potencia media durante ese periodo.

## Referencias

- [1] *Operational test of sonic wind sensors at KNMI*. Wauben y Van Krimpen. TECO-2008. [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-96\\_TECO-2008/P2\(28\)\\_Wauben\\_Netherlands.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-96_TECO-2008/P2(28)_Wauben_Netherlands.pdf)
- [2] *Wind tunnel and field test of three 2D sonic anemometers*. Wauben. TECO-2005. [http://www.knmi.nl/~wauben/Sensor/TECO2005\\_P3\(17\)\\_Wauben.pdf](http://www.knmi.nl/~wauben/Sensor/TECO2005_P3(17)_Wauben.pdf)
- [3] *Wind tunnel and field test of three 2D sonic anemometers*. Wauben. KNMI Tec. Rep. 296. <http://www.knmi.nl/~wauben/Sensor/TR296.pdf>
- [4] *Dynamic response of a cup anemometer*. Hayashi. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Jun 1987.
- [5] *Cup anemometer behavior in turbulent environments*. Kristensen. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Feb 1998.
- [6] MEASNET: <http://www.measnet.org>
- [7] ACCUWIND – *Summary report*- <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1563.pdf>
- [8] CLASSCUP – *Development of a classification system for cup anemometers*. Pedersen. <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1348.pdf>
- [9] ACCUWIND – *Classification of five cup anemometers according to IEC61400-12-1*. Pedersen e al.. <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1556.pdf>

## Agradecimiento

El autor quiere agradecer la colaboración y amabilidad de los Drs. Wauben y Cuerva.