

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 5. MEDICIÓN DEL VIENTO DE SUPERFICIE	177
5.1 Generalidades	177
5.1.1 Definiciones	177
5.1.2 Unidades y escalas	178
5.1.3 Requisitos meteorológicos	178
5.1.4 Métodos de medición y observación	179
5.2 Estimación del viento	181
5.2.1 Velocidad del viento	182
5.2.2 Dirección del viento	182
5.2.3 Fluctuaciones del viento	182
5.3 Métodos instrumentales simples	182
5.3.1 Velocidad del viento	182
5.3.2 Dirección del viento	182
5.4 Anemómetros de cazoletas y de hélice	183
5.5 Veletas	183
5.6 Otros sensores de viento	184
5.7 Sensores y combinaciones de sensores para la medición de las componentes	185
5.8 Métodos de procesamiento de datos	185
5.8.1 Promediado	185
5.8.2 Ráfagas máximas y desviaciones típicas	186
5.8.3 Recomendaciones relativas al diseño de los sistemas de medición del viento ..	187
5.9 Exposición de los instrumentos de viento	188
5.9.1 Problemas de carácter general	188
5.9.2 Anemómetros en tierra	189
5.9.3 Anemómetros en el mar	190
5.9.4 Corrección de la exposición	191
5.10 Calibración y mantenimiento	192
ANEXO. LONGITUD DE RUGOSIDAD EFICAZ	194
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	196

CAPÍTULO 5. MEDICIÓN DEL VIENTO DE SUPERFICIE

5.1 GENERALIDADES

5.1.1 Definiciones

El presente capítulo está basado en las definiciones siguientes (se encontrarán más detalles al respecto en Mazzarella, 1972).

La *velocidad del viento* es una magnitud vectorial tridimensional que experimenta fluctuaciones aleatorias de pequeña escala en el espacio y en el tiempo, que se superponen a un flujo organizado de mayor escala. Esta definición es la utilizada, por ejemplo, para el estudio de la contaminación atmosférica y para el aterrizaje de aeronaves. A los efectos de esta Guía, sin embargo, se considerará que el viento de superficie es fundamentalmente una magnitud vectorial bidimensional definida por dos números que representan la dirección y la velocidad. El grado de fluctuación experimentado por el viento se denomina “rafagosidad”, y las diferentes fluctuaciones, “ráfagas” o “rachas”.

La mayoría de los usuarios de datos sobre el viento necesitan conocer el viento horizontal medio, expresado, por lo general, en coordenadas polares de velocidad y dirección. Cada vez son más las aplicaciones que también precisan información acerca de la variabilidad o rafagosidad del viento. A tal efecto, se utilizan tres magnitudes: la ráfaga o racha máxima y las desviaciones típicas de la velocidad y de la dirección del viento.

Las *magnitudes medias* son variables (por ejemplo, la velocidad horizontal del viento) promediadas a lo largo de un período comprendido entre 10 y 60 minutos. En este capítulo se calculan principalmente promedios correspondientes a intervalos superiores a 10 minutos, como los utilizados con fines de predicción. Normalmente, las estadísticas climatológicas se basan en promedios a lo largo de horas, días y noches. En las aplicaciones aeronáuticas suelen utilizarse intervalos de promediado menores (véase el capítulo 2 de la parte II). Los períodos de promediado inferiores a unos pocos minutos no suavizan suficientemente las fluctuaciones turbulentas naturales del viento; por ello, los “promedios” o “valores medios” de períodos de 1 minuto deberían considerarse como ráfagas largas.

La *ráfaga* (o *racha*) máxima es la velocidad del viento máxima observada en un intervalo de tiempo determinado. En los informes meteorológicos horarios, la ráfaga máxima indica el valor extremo del viento durante la última hora completa.

La *duración de una ráfaga* expresa la duración de una ráfaga máxima observada y viene determinada por la respuesta del sistema de medición. Los sistemas de respuesta lenta suavizan los extremos y miden ráfagas suaves y prolongadas mientras que los sistemas de respuesta rápida pueden registrar ráfagas con frentes de onda abruptos y de corta duración.

Para definir la duración de una ráfaga se utiliza un proceso de medición teórica, consistente en un filtro único que arroja una media móvil de la señal de viento entrante a lo largo de t_0 segundos. Los extremos detectados tras aplicar el filtro se definen como ráfagas máximas de duración t_0 . Se dice que otros sistemas de medición con diversos elementos filtrantes miden las ráfagas de duración t_0 cuando un filtro de media móvil con un tiempo de integración t_0 produce un extremo de la misma magnitud (se encontrará una discusión más detallada en Beljaars, 1987, y OMM, 1987).

La *desviación típica* se calcula a partir de la expresión:

$$s_u = \sqrt{(u_i - U)^2} = \sqrt{\left(\left(\sum (u_i^2) - (\sum u_i)^2 / n \right) / n \right)} \quad (5.1)$$

donde u es una variable dependiente del tiempo (por ejemplo, la velocidad horizontal del viento) de valor medio U y el trazo superior indica el promediado a lo largo del tiempo para n muestras, u_i . La desviación típica permite caracterizar la magnitud de las fluctuaciones de una variable dada.

La *constante de tiempo* (de un sistema de primer orden) es el tiempo necesario para que un dispositivo detecte e indique aproximadamente un 63% de un cambio en función escalonada.

La *longitud de respuesta* corresponde, en términos aproximados, al recorrido del viento (en metros) necesario para que un anemómetro indique aproximadamente un 63% de un cambio en función escalonada de la velocidad entrante.

El *amortiguamiento crítico* (de un sensor, como por ejemplo una veleta, cuya respuesta se describe mejor mediante una ecuación diferencial de segundo orden) es el valor de amortiguamiento que proporciona la respuesta transitoria más rápida a un cambio brusco sin sobreoscilación.

El *coeficiente de amortiguamiento* es el cociente entre el amortiguamiento real y el amortiguamiento crítico.

La *longitud de onda natural no amortiguada* es el recorrido del viento que sería necesario para que una veleta completara un período de oscilación en ausencia de amortiguamiento. Su valor es inferior en un factor $\sqrt{1-D^2}$ al de la longitud de onda "amortiguada" real, siendo D el coeficiente de amortiguamiento.

Se denomina *viento variable sin dirección media* tanto al viento de velocidad inferior a 6 km/h (3 nudos) que presenta una variación total en su dirección igual o superior a 60° , e inferior a 180° , con respecto a la dirección media del viento en los últimos 10 minutos, como al viento cuya variación total en su dirección es igual o superior a 180° .

5.1.2 Unidades y escalas

La velocidad del viento debería comunicarse con una resolución de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, o en nudos ($0,515 \text{ m s}^{-1}$), redondeada a la unidad más próxima, y, en los informes sinópticos, debería representar un promedio a lo largo de un período de 10 minutos. Para ciertos fines aeronáuticos se necesitan promedios que abarquen un período menor (véase el capítulo 2 de la parte II).

En las claves tradicionalmente utilizadas, la dirección del viento debería expresarse en grados verdaderos a la decena más próxima, mediante una clave de cifrado 01 ... 36 (la clave 2, por ejemplo, indica que la dirección del viento está comprendida entre 15° y 25°), y debería representar un promedio a lo largo de un período de 10 minutos (véase el capítulo 2 de la parte II). En clave BUFR, la dirección del viento debería notificarse en grados verdaderos con resolución de 1° . La dirección del viento se define como la dirección desde la que sopla el viento y se mide en sentido dextrorso a partir del norte geográfico, es decir, del norte verdadero (de conformidad con el Sistema geodésico mundial de 1984 (WGS-84) y su modelo del geode terrestre de 1996 (EGM-96)).

Se debería comunicar una situación de "calma" cuando la velocidad media del viento sea inferior a 1 nudo. En tales casos, la dirección se expresa con la clave 00.

La dirección del viento, en las estaciones situadas hasta a 1° del polo norte o a 1° del polo sur, debería medirse de modo que el círculo acimutal se alinee de forma que su cero coincida con el meridiano 0° de Greenwich.

5.1.3 Requisitos meteorológicos

Las observaciones o mediciones del viento son necesarias para vigilar y predecir el tiempo, para estudiar el clima según la carga de viento, para determinar la probabilidad de daños causados por el viento y evaluar la energía eólica, y para estimar los flujos de superficie, por ejemplo, los

datos de evaporación son necesarios para estudiar la dispersión de la contaminación atmosférica y para aplicaciones agrarias. En el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) se facilitan los requisitos con respecto al rendimiento. Generalmente basta con una incertidumbre de la velocidad horizontal de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ por debajo de 5 m s^{-1} , e inferior al 10% por encima de 5 m s^{-1} . La dirección del viento debería medirse con una exactitud de 5° . Además de la velocidad y la dirección medias del viento, son numerosas las aplicaciones para las que es necesario conocer la desviación típica y los valores extremos (véase la sección 5.8.2). La exactitud requerida es fácil de conseguir con los instrumentos modernos. El aspecto más delicado de la observación del viento es la exposición del anemómetro. Dado que es casi imposible encontrar un lugar en que la velocidad del viento sea representativa de un área extensa, se recomienda obtener estimaciones de los errores de exposición (en la sección 5.9 y en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B) se señalan los requisitos de emplazamiento y exposición).

Muchas aplicaciones precisan datos sobre la rafagosidad del viento. Estas aplicaciones proporcionan "predicciones inmediatas" de utilidad para el despegue y aterrizaje de aeronaves, para la climatología de la carga de viento y para el estudio de los problemas de dispersión de la contaminación atmosférica y la corrección de las exposiciones. Hay dos variables apropiadas para las lecturas de rutina: la desviación típica de la velocidad y la dirección del viento, y las ráfagas máximas en períodos de 3 segundos (véanse las Recomendaciones 3 y 4 (CIMO-X) (OMM, 1990)).

5.1.4 Métodos de medición y observación

El viento de superficie suele medirse utilizando una veleta y un anemómetro de cazoletas o de hélice. Cuando los instrumentos estén momentáneamente fuera de servicio o no se disponga de ellos, la dirección y la fuerza del viento pueden estimarse por métodos subjetivos (en los cuadros 5.1 y 5.2 se indican las equivalencias de velocidad del viento habitualmente utilizadas para tal fin).

Los instrumentos y las técnicas específicamente examinados en este texto son solo algunos de los más convenientes de que se dispone y no constituyen una lista completa. En las referencias y la bibliografía complementaria que aparecen al final de este capítulo se encontrará una lista de publicaciones apropiadas sobre el particular.

Los sensores que se reseñan a continuación son anemómetros de cazoletas y de hélice, y veletas. Con frecuencia se hacen combinaciones de cazoletas y veleta o de hélice y veleta, así como anemómetros únicamente de hélice. Otros sensores clásicos, como el tubo de Pitot, se utilizan menos en la actualidad para las mediciones rutinarias, pero pueden dar resultados satisfactorios, mientras que los nuevos tipos en fase de desarrollo o utilizados como herramientas de investigación podrían servir para esos fines a medida que avancen las tecnologías.

Para casi todas las aplicaciones es necesario medir los promedios de velocidad y de dirección del viento. En muchas de ellas son también necesarios los datos de rafagosidad. Así pues, un sistema de medición del viento no solo consta de un sensor, sino también de un sistema de procesamiento y registro de datos. El procesamiento consiste en calcular los promedios, las desviaciones típicas y los valores extremos. En su forma más simple, el procesamiento puede efectuarse anotando la señal de viento con un registrador de plumilla y estimando la media y el extremo a partir de las lecturas del registro.

Cuadro 5.1. Equivalencias de la velocidad del viento

Número de la escala Beaufort y término descriptivo	Velocidad del viento equivalente a una altura tipo de 10 m sobre un terreno plano y descubierta				Especificaciones para estimar la velocidad sobre tierra
	(nudos)	($m s^{-1}$)	($km h^{-1}$)	($mi h^{-1}$)	
0 Calma	< 1	0-0,2	< 1	< 1	Calma; el humo sube verticalmente
1 Ventolina	1-3	0,3-1,5	1-5	1-3	La dirección del viento se define por el humo que se eleva y no por las veletas
2 Flojito (brisa muy débil)	4-6	1,6-3,3	6-11	4-7	El viento se siente en la cara; se mueven las hojas de los árboles; se mueven las veletas comunes
3 Flojo (brisa débil)	7-10	3,4-5,4	12-19	8-12	Las hojas y las ramas de los árboles se agitan constantemente; las banderas se extienden al viento
4 Bonancible (brisa moderada)	11-16	5,5-7,9	20-28	13-18	Se levanta polvo y vuelan papeles pequeños; se mueven las ramas pequeñas de los árboles
5 Fresquito (brisa fresca)	17-21	8,0-10,7	29-38	19-24	Se balancean los árboles pequeños; se forman en los estanques pequeñas olas
6 Fresco (brisa fuerte)	22-27	10,8-13,8	39-49	25-31	Se mueven las ramas grandes de los árboles; silban los hilos del telégrafo; dificultad para mantener abierto el paraguas
7 Frescachón (viento fuerte)	28-33	13,9-17,1	50-61	32-38	Todos los árboles se mueven; dificultad para andar contra el viento
8 Temporal	34-40	17,2-20,7	62-74	39-46	Se rompen las ramas pequeñas de los árboles; generalmente no se puede andar contra el viento
9 Temporal fuerte	41-47	20,8-24,4	75-88	47-54	Se producen ligeros desperfectos en los edificios (caen chimeneas y vuelan tejas) Se observa rara vez
10 Temporal duro	48-55	24,5-28,4	89-102	55-63	Se observa rara vez en tierra; arranca árboles y ocasiona daños de consideración en los edificios
11 Temporal muy duro (borrasca)	56-63	28,5-32,6	103-117	64-72	Muy poco frecuente; ocasiona daños generalizados
12 Temporal huracanado (huracán)	64 o más	32,7 o más	118 o más	73 o más	

Cuadro 5.2. Equivalencias de la velocidad del viento en zonas árticas y en zonas exentas de vegetación

Número de la escala Beaufort y término descriptivo	Velocidad del viento equivalente a una altura tipo de 10 m sobre un terreno plano y descubierto				Especificaciones para estimar la velocidad en áreas árticas y en áreas exentas de vegetación
	(nudos)	($m s^{-1}$)	($km h^{-1}$)	($mi h^{-1}$)	
0 Calma	< 1	0-0,2	< 1	< 1	
1 Ventolina	1-3	0,3-1,5	1-5	1-3	Viento no apreciable; el humo asciende de forma casi vertical
2 Flojito (brisa muy débil)	4-6	1,6-3,3	6-11	4-7	El viento se siente en la cara; se mueven las hojas de los árboles
3 Flojo (brisa débil)	7-10	3,4-5,4	12-19	8-12	Se mueve el cabello y ondea la ropa
4 Bonancible (brisa moderada)	11-16	5,5-7,9	20-28	13-18	Se levantan polvo y papeles sueltos; se revuelve el cabello
5 Fresquito (brisa fresca)	17-21	8,0-10,7	29-38	19-24	La fuerza del viento se siente sobre el cuerpo; marca el límite del viento agradable en tierra
6 Fresco (brisa fuerte)	22-27	10,8-13,8	39-49	25-31	Cierta dificultad para caminar
7 Frescachón (viento fuerte)	28-33	13,9-17,1	50-61	32-38	Dificultad para caminar contra el viento
8 Temporal	34-40	17,2-20,7	62-74	39-46	Dificultad para mantener el equilibrio caminando
9 Temporal fuerte	41-47	20,8-24,4	75-88	47-54	Peligro de ser derribado
10 Temporal duro	48-55	24,5-28,4	89-102	55-63	Arranca árboles y causa daños estructurales considerables
11 Temporal muy duro (borrasca)	56-63	28,5-32,6	103-117	64-72	
12 Temporal huracanado (huracán)	64 o más	32,7 o más	118 o más	73 o más	

5.2 ESTIMACIÓN DEL VIENTO

En ausencia de un equipo de medición del viento, las observaciones deben efectuarse mediante estimación. Los errores de observación que esto conlleva pueden ser considerables, pero, siempre que las observaciones se lleven a cabo con precaución, el método se justifica, ya que proporciona datos que de otro modo no estarían disponibles. Cuando en algunas estaciones se obtengan datos de viento mediante estimación en lugar de por medición, ya sea con carácter temporal o permanente, esta circunstancia debería quedar documentada en los registros de la estación y estar a disposición de los usuarios de los datos.

5.2.1 **Velocidad del viento**

Las estimaciones se basan en el efecto del viento sobre objetos móviles. Si bien se puede utilizar prácticamente cualquier objeto sostenido por un soporte que pueda moverse libremente bajo la influencia del viento, resultarán especialmente útiles las especificaciones descriptivas de la escala Beaufort de la fuerza del viento, reproducidas en los cuadros anteriores.

Para realizar las estimaciones, el observador (y el objeto sensible al viento) debe estar situado en un terreno llano abierto, carente de obstáculos en la medida de lo posible. Conviene tener siempre presente que incluso los obstáculos más pequeños pueden dar lugar a cambios importantes de la velocidad del viento y desviaciones de su dirección, especialmente a sotavento.

5.2.2 **Dirección del viento**

Cuando no se disponga de instrumentos o el equipo instrumental esté fuera de servicio, la dirección del viento se debería estimar observando la deriva del humo que sale por una chimenea elevada, el movimiento de las hojas, etc., en terreno abierto, o bien la orientación de un banderín o de una serpentina sujeta a un mástil alto. Podrán servir también las mangas de viento de los aeropuertos cuando la velocidad del viento sea suficiente para moverlas.

Sea cual sea el medio utilizado, es probable que se cometan errores de perspectiva, a menos que el observador se coloque de pie verticalmente bajo el indicador. Debería procurarse no confundir las turbulencias locales causadas por edificios u otros obstáculos con la deriva general del viento.

En un lugar abierto, la dirección del viento de superficie puede estimarse con bastante exactitud si el observador se coloca de cara al viento. No debería tenerse en cuenta el movimiento de las nubes, por bajas que estas sean.

5.2.3 **Fluctuaciones del viento**

No se debería intentar estimar las ráfagas máximas o las desviaciones típicas sin contar con los instrumentos y dispositivos de registro apropiados.

5.3 **MÉTODOS INSTRUMENTALES SIMPLES**

En las estaciones donde no es posible instalar anemómetros clásicos, se podría proporcionar al observador instrumentos simples y de muy bajo costo como ayuda para realizar mediciones algo más fiables que las obtenidas por mera estimación.

5.3.1 **Velocidad del viento**

En caso de utilizarse un anemómetro de mano, sería preciso configurarlo y leerlo con arreglo a las instrucciones del fabricante. La observación se debería efectuar en un lugar bien expuesto al viento, y no a sotavento de obstáculos tales como edificios, árboles o lomas. Si ello no fuera posible, el lugar de observación debería estar situado a suficiente distancia de los obstáculos, concretamente a no menos de 10 veces la altura del obstáculo y, con viento frontal o lateral, a no menos del doble de su altura.

5.3.2 **Dirección del viento**

La dirección puede estimarse con una veleta (o un banderín) instalada en un mástil y provista de indicadores que señalen los principales puntos cardinales. La veleta deberá observarse desde

abajo y la dirección del viento podrá estimarse en el más próximo de los 16 puntos de la brújula. Si la veleta oscilara con el viento, se debe considerar que la dirección del viento es la dirección media en torno a la cual se producen las oscilaciones.

5.4 ANEMÓMETROS DE CAZOLETAS Y DE HÉLICE

Los anemómetros de cazoletas y de hélice se utilizan habitualmente para determinar la velocidad del viento. Constan de dos componentes: el rotor y el generador de señales. En los sistemas adecuadamente diseñados, la velocidad angular del rotor de cazoletas o de la hélice es directamente proporcional a la velocidad del viento o, más precisamente, en el caso del rotor de hélice, a la componente de la velocidad del viento paralela al eje de rotación. Asimismo, presentan una calibración lineal independiente de la densidad del aire, un buen cero y una gran estabilidad, y se pueden fabricar en serie fácilmente. Cerca del umbral de arranque, por ejemplo para velocidades del viento inferiores a 4 m s^{-1} , la calibración de los anemómetros de cazoletas puede desviarse considerablemente de la linealidad cuando el brazo que conecta la cazoleta al eje de rotación es mucho más largo que el diámetro de aquella (Patterson, 1926).

El tipo de respuesta de los anemómetros de cazoletas y de hélice a las variaciones de la velocidad del viento puede expresarse en función de una longitud de respuesta, cuya magnitud es directamente proporcional al momento de inercia del rotor y, además, depende de varios factores geométricos (Busch y Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

La mayoría de los sensores de cazoletas y de hélice reaccionan más rápidamente en caso de aceleración que de desaceleración, por lo que la velocidad media obtenida a partir de sus rotores sobrestima la velocidad media real del viento. Además, las fluctuaciones de la velocidad vertical pueden inducir un exceso de velocidad de los anemómetros de cazoletas, debido a una menor interferencia de las cazoletas en condiciones de flujo oblicuo (MacCready, 1966). El exceso de velocidad total puede llegar a ser del 10% con ciertos diseños y en determinadas condiciones de viento turbulento (anemómetros de cazoletas a 10 m de altura con una longitud de respuesta de 5 m en terreno muy accidentado; Coppin, 1982). Este efecto puede minimizarse seleccionando anemómetros de respuesta rápida: o bien de cazoletas con diseños verificados que presenten una respuesta conforme a la ley de los cosenos, o bien veletas de hélice que carezcan prácticamente de una componente vertical de exceso de velocidad. Si no fuera posible estudiar la respuesta en un túnel de viento, los anemómetros operativos podrán compararse sobre el terreno con un anemómetro calibrado (Albers y otros, 2000).

Tanto los rotores de cazoletas como los de hélice giran con una velocidad angular directamente proporcional a la velocidad o a la componente axial, por lo que resultan particularmente convenientes para activar diversos tipos de generadores de señales. A este respecto se han utilizado generadores de corriente alterna y continua, generadores de impulsos ópticos y magnéticos, y contadores y registradores de vueltas (OMM, 2001). La elección del generador de señales o transductor dependerá en gran medida del tipo de procesador de datos y del sistema de lectura que se utilice. Convendría asegurarse de que los cojinetes y el generador de señales tengan pares de arranque y rozamiento durante el funcionamiento bajos, y de que el momento de inercia del generador de señales no reduzca demasiado la respuesta. Cuando la transmisión se realice a larga distancia, las señales de tensión disminuirán debido a las pérdidas por resistencia del cable y serán, por consiguiente, inferiores a las señales de frecuencia en impulsos, que no resultan afectadas en la misma medida durante la transmisión.

Las características requeridas y posibles de los sensores de velocidad del viento figuran en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E).

5.5 VELETAS

Para obtener una medición satisfactoria es necesario que la veleta esté bien equilibrada, de modo que no adopte una posición de preferencia cuando el eje no sea vertical. Si la veleta tiene

aletas múltiples, estas deberían preferiblemente ser paralelas al eje de la veleta, ya que una veleta con dos aletas en ángulos $> 10^\circ$ respecto de su eje presenta dos posiciones de equilibrio, cada una de las cuales difiere considerablemente de la dirección del viento real (Wieringa y van Lindert, 1971).

La respuesta de las veletas clásicas, de pequeño amortiguamiento, a un cambio repentino de la dirección del viento se caracteriza normalmente por un movimiento excesivo y oscilaciones en torno a su posición verdadera, de tal modo que la amplitud disminuye de manera aproximadamente exponencial. Se utilizan dos variables para definir esta reacción: la "frecuencia natural no amortiguada" o "longitud de onda", y el "coeficiente de amortiguamiento", que es el cociente entre el amortiguamiento real y el crítico (MacCready, 1966; Mazzarella, 1972). Se considera que los coeficientes de amortiguamiento comprendidos entre 0,3 y 0,7 son adecuados, no presentan una sobreoscilación excesiva y tienen una respuesta razonablemente rápida (Wieringa, 1967). Cuando se desee calcular una media correspondiente a un período relativamente largo a partir de datos captados a intervalos cortos, es evidente que resultarán aceptables coeficientes de amortiguamiento menores.

El generador de señales consiste básicamente en un transductor de eje que transmite los movimientos angulares. Se han empleado dispositivos de muchos tipos con buenos resultados en potenciómetros, sincronizadores de corriente alterna y continua, discos digitales de codificación angular, cuadrantes de lectura directa y conmutadores giratorios. La elección del generador de señales dependerá en gran medida del tipo de procesador de datos y del sistema de lectura que se utilice. Convendría asegurarse de que los cojinetes y el generador de señales tienen pares de arranque y de rozamiento durante el funcionamiento bajos. El método de registro más simple consiste en acoplar una lámina en torno a un cilindro que está en rotación con el eje de la veleta, sobre el que desciende lentamente un instrumento de plumilla.

La exactitud absoluta de las mediciones de dirección dependerá también del cuidado con que se haya alineado el instrumento respecto al norte verdadero. Las características necesarias y posibles de las veletas figuran en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E).

5.6 OTROS SENSORES DE VIENTO

Para medir la velocidad y la dirección del viento pueden utilizarse diversos principios físicos, que presentan ventajas e inconvenientes. A menudo se han desarrollado sistemas nuevos para fines específicos, como las fluctuaciones de pequeña escala o los estudios de contaminación atmosférica (véase, por ejemplo, Smith, 1980). Otros tipos de sensores son:

- a) Los anemómetros de tubo de Pitot, que miden el exceso de presión en un tubo que se mantiene alineado con el vector de viento mediante una veleta (véanse Gold, 1936, y OMM, 1984a, para una descripción del anemómetro de Dines). El sistema de registro lineal de Dines aborda el problema del promediado de la velocidad causado por la relación cuadrática entre la velocidad del viento y la presión, y proporciona además unos registros útiles de la rafagiosidad sin necesidad de energía eléctrica.
- b) Los anemómetros sónicos, que miden el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de un impulso ultrasónico que se desplaza a lo largo de una distancia fija (Kaimal, 1980). Dado que los anemómetros sónicos no tienen piezas móviles (en razón de su principio básico de funcionamiento), su durabilidad es alta y su exactitud se deteriora muy poco.
- c) Los anemómetros de disco caliente (instrumentos de estado sólido desarrollados recientemente), que miden el gradiente de temperatura a través de un ensamblaje de chips proporcionando así la velocidad y la dirección del viento con un grado de exactitud acorde con las especificaciones del capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) (Van Oudheusden y Huijsing, 1991; Makinwa y otros, 2001). Son resistentes y estables en la calibración, pero la experiencia práctica con ellos es, hasta la fecha, limitada.

- d) Los anemómetros de hilo caliente, que miden el enfriamiento de hilos finos a alta temperatura. Para usos operativos son bastante poco fiables, tanto por su fragilidad excesiva como por los cambios de su calibración, bastante rápidos, en entornos poco limpios o húmedos. Se recomienda no utilizarlos en condiciones de precipitación.
- e) Las antiguas veletas de placa movable, que son ligeramente mejores que la ausencia total de instrumentos.
- f) Las técnicas de teledetección de viento mediante ondas acústicas (sodar), luminosas (lidar) o electromagnéticas (radar), que son inhabituales en las redes meteorológicas ordinarias y no se abordarán en la presente Guía. Se encontrarán más detalles al respecto en Lenschow (1986).

5.7 **SENSORES Y COMBINACIONES DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE LAS COMPONENTES**

Las hélices, que responden únicamente a la componente de la velocidad del viento paralela al eje de rotación del rotor, se pueden instalar perpendicularmente para obtener dos lecturas directamente proporcionales a las componentes de las direcciones del eje. Otros sensores, como los anemómetros sónicos de dos ejes, realizan la misma función, aunque necesitan de unos dispositivos electrónicos más sofisticados. Las hélices perpendiculares tienen el inconveniente de que, con ellas, es difícil de conseguir una respuesta que sea exactamente conforme a la ley de los cosenos (es decir, sensibilidad a una sola componente). También es posible utilizar una combinación de anemómetros de cazoletas y de veleta o una veleta de hélice cuando las componentes de la velocidad se calculan a partir de los valores medidos de velocidad y dirección del viento.

5.8 **MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE DATOS**

Las señales obtenidas de las combinaciones de anemómetros y veletas pueden procesarse y promediarse de muy diversas maneras. Antes de examinar los aspectos de todo el proceso de medición del viento (exposición, detección, transmisión, filtrado, registro y procesamiento de datos), conviene abordar el problema del promediado. La presente Guía trata sobre los datos siguientes: viento horizontal medio (componentes o velocidad/dirección), desviaciones típicas y ráfaga máxima.

5.8.1 **Promediado**

En principio, el promediado de los vectores de viento o de sus componentes es una tarea simple, aunque plantea algunos problemas. El primero de ellos estriba en que la velocidad vectorial media en la dirección media del viento U es ligeramente inferior al promedio de todas las velocidades del viento instantáneas, generalmente en varias unidades por ciento (MacCready, 1966; Wieringa, 1980a). En caso necesario, esta situación puede corregirse si se mide la desviación típica de la dirección del viento s_d ; con respecto al cociente de U y el promedio de las velocidades del viento instantáneas, se tiene (Frenkiel, 1951):

$$U / \sqrt{(u_i^2 + v_i^2)} = 1 - s_d^2 / 2 \quad (5.2)$$

Este efecto de turbulencia transversal al viento suele confundirse con la sobrestimación (exceso de velocidad), causando así distorsiones en la desviación típica s_u (véase la sección 5.4).

El segundo problema es la discontinuidad de la dirección del viento entre 0° y 360° . Este problema puede resolverse registrando los datos en un cilindro, ampliando la horquilla de valores del registrador (por ejemplo, hasta 540° en el caso de un dispositivo automático que conmute la horquilla de valores de 0 a 360 y de 540 a 180), o mediante un algoritmo informático

que genere muestras sucesivas en una función continua añadiendo o restando 360° en caso necesario. La imposibilidad de ajustar completamente la respuesta de primer orden de un anemómetro de cazoletas y la respuesta de segundo orden de una veleta constituye un problema menor, ya que las diferencias de respuesta están reflejadas solo en la parte de las fluctuaciones que corresponde a las altas frecuencias.

Desde el punto de vista teórico, es preferible promediar las componentes que calcular por separado la media de la velocidad y de la dirección. Las diferencias son, sin embargo, muy pequeñas y, en la mayoría de las aplicaciones, los promedios de las componentes se pueden deducir fácilmente de los promedios de velocidad y de dirección. Esta consideración también es aplicable a las desviaciones típicas correspondientes. Desde el punto de vista técnico, es preferible tratar de forma independiente la velocidad y la dirección por varias razones. En primer lugar, el tratamiento por separado de las señales de la velocidad y de la dirección implica que un instrumento puede seguir funcionando cuando el otro falla. En segundo lugar, esta reducción de datos plantea menos dificultades que en aquellos casos donde haya que calcular las diversas componentes. Por último, el tratamiento independiente de la velocidad y de la dirección es compatible con los usos habituales (incluidas las claves SYNOP y SHIP).

Los promedios de la velocidad horizontal del viento se pueden obtener mediante diversos dispositivos mecánicos y eléctricos. El ejemplo más simple es posiblemente el registrador mecánico de recuento del número de revoluciones de un anemómetro de cazoletas que se utiliza habitualmente para medir el recorrido del viento durante un intervalo de tiempo de promediado previamente seleccionado. En el extremo opuesto, se pueden utilizar dispositivos muy complejos, como los generadores de impulsos eléctricos, que activan procesadores digitales para usos especiales capaces de calcular fácilmente los promedios, las ráfagas máximas y las desviaciones típicas.

Si la velocidad y la dirección del viento se registran en forma de gráfico continuo, un observador puede estimar con bastante exactitud los promedios de 10 minutos con un registrador de plumilla. La señal de viento registrada puede utilizarse también para determinar las ráfagas máximas. La lectura de los cuadrantes o medidores permitirá hacerse una idea de la velocidad del viento y de su variabilidad pero como los resultados pueden tener grandes errores, las medias no son fiables. Las lecturas instantáneas son, por consiguiente, menos apropiadas para obtener promedios de 10 minutos para informes meteorológicos ordinarios.

5.8.2 **Ráfagas máximas y desviaciones típicas**

El cálculo o registro de las fluctuaciones del viento es extremadamente sensible a la respuesta dinámica de todos los elementos del proceso de medición, en particular a la longitud de respuesta y al coeficiente de amortiguamiento de los sensores. Además, la respuesta dinámica del sistema en su conjunto determina la duración de las ráfagas máximas, tal como se define en la sección 5.1.1. Con los sistemas de respuesta lenta se hacen más difusos los valores extremos y se registran grandes ráfagas de pequeña amplitud, mientras que los de respuesta rápida registran ráfagas máximas intensas y breves (ráfagas de corta duración). Es evidente que la respuesta dinámica de los sistemas de medición del viento se debe diseñar adecuadamente para obtener ráfagas o desviaciones típicas que sean exactas, fiables y compatibles entre estaciones.

Antes de especificar las características de respuesta apropiadas de los sistemas de medición del viento, es necesario definir la duración de ráfaga que exija la aplicación de que se trate. Los valores extremos se utilizan principalmente como medio de aviso y para la climatología de cargas máximas sobre edificios, construcciones y aeronaves. Es importante comprender que las ráfagas más breves no tienen ni la duración ni la extensión horizontal suficientes para causar todo su efecto dañino sobre las grandes construcciones. En OMM (1987) se concluye que la mayoría de los usuarios potenciales aceptan una duración de ráfaga de aproximadamente 3 segundos. Las ráfagas que persisten durante unos 3 segundos corresponden a un "recorrido del viento" (duración del viento multiplicada por la velocidad media) del orden de 50 a 100 m en condiciones de viento fuerte. Estos valores son suficientes para incidir en estructuras de tamaño suburbano o urbano ordinario y exponerlas íntegramente a la carga de una ráfaga potencialmente dañina.

Es fácil calcular la desviación típica de la dirección y de la velocidad del viento utilizando equipos de microcomputadora y obteniendo muestras de las señales a intervalos de aproximadamente 1 segundo. Las frecuencias de muestreo no deberían ser demasiado grandes, ya que el propio sensor aminora los resultados por encima de un múltiplo de su distancia de respuesta (Wieringa, 1980b). En la mayoría de los casos será adecuada una frecuencia de muestreo de 0,25 Hz, aunque todo dependerá de la distancia de respuesta del sensor y de la velocidad del viento. En el capítulo 2 de la parte IV se ofrece un análisis detallado de la teoría con respecto a las señales de los sensores de muestreo.

El cálculo simultáneo de la desviación típica de la velocidad horizontal del viento en períodos de 10 minutos, junto con la detección de ráfagas con una duración de varios segundos, fija unos requisitos interesantes para los filtros electrónicos. Las ráfagas son el elemento más crítico del proceso de filtrado, por lo que en la práctica el sistema estará optimizado para ellas. Todo filtro de paso bajo utilizado para la detección de ráfagas máximas medidas con anemómetros rápidos, y suavizadas a lo largo de varios segundos, podrá reducir en hasta un 10% el valor de la desviación típica. Este resultado se puede subsanar si las variables de filtrado del proceso de medición se documentan correctamente. En la práctica, la reducción suele ser menor, ya que la desviación típica aumenta cuando la velocidad media del viento exhibe una tendencia positiva o negativa. Alternativamente, es posible registrar por separado la señal no filtrada, con el fin de medir una desviación típica sin error sistemático. En la sección siguiente se ofrecen recomendaciones con respecto a los sistemas de medición del viento y se mencionan los valores exactos de los parámetros del filtro.

Para determinar con exactitud las ráfagas máximas es conveniente muestrear la señal filtrada del viento cada 0,25 segundos (4 Hz de frecuencia). Pueden utilizarse frecuencias de muestreo menores, pero se debería tener en cuenta que en ese caso el valor máximo estimado será generalmente inferior, porque la señal filtrada puede alcanzar el valor extremo entre las muestras.

Sin contar el amortiguamiento inercial de la veleta, debería evitarse todo filtrado ulterior para determinar la dirección del viento. Ello quiere decir que la desviación típica de la dirección del viento puede calcularse dentro del 2% con la mayoría de las veletas.

Para determinar con exactitud la desviación típica de la dirección del viento será necesaria una resolución mínima del proceso de digitalización, que suele tener lugar en el eje de la veleta mediante un codificador digital. Para ello, será más que suficiente una resolución de 7 bits, puesto que así todavía se puede medir una desviación típica de 5° con una exactitud del 1% (OMM, 1987).

5.8.3 **Recomendaciones relativas al diseño de los sistemas de medición del viento¹**

Los sistemas de medición del viento se pueden diseñar de muchas maneras, y resulta imposible describir todas las opciones técnicas en esta Guía. A continuación se abordan dos ejemplos habituales, uno de ellos con tratamiento principalmente analógico de señales y el otro con procesamiento digital (OMM, 1987).

El primer sistema consiste en un anemómetro con una longitud de respuesta de 5 m, un generador de impulsos que opera con una frecuencia proporcional a la velocidad de rotación del anemómetro (preferiblemente, varios impulsos por rotación), un contador de impulsos a intervalos de 0,25 segundos y un microprocesador que calcula promedios y desviaciones típicas en intervalos de 10 minutos, con unas muestras extraídas cada 0,25 segundos. El extremo se determinará a partir de promedios de 3 segundos, estableciendo la media de las 12 últimas muestras. Este proceso deberá tener lugar cada 0,25 segundos (superponiendo promedios de 3 segundos cada 0,25 segundos). La dirección del viento se mide con una veleta que tiene una longitud de onda no amortiguada de 5 m, un coeficiente de amortiguamiento de 0,3 y un codificador digital de 7 bits capaz de sacar muestras por segundo. Cada 10 minutos el sistema

¹ Recomendado por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su décima reunión (1989).

calcula los promedios y las desviaciones típicas, y además verifica la continuidad de las muestras sucesivas. Si dos muestras sucesivas difieren en más de 180° , la diferencia puede corregirse sumando o restando 360° al valor de la segunda muestra. Con longitudes de respuesta de 5 m para el anemómetro y la veleta (con un coeficiente de amortiguamiento de 0,3 y una longitud de onda no amortiguada de 10 m), las desviaciones típicas de la velocidad y de la dirección del viento se reducen en torno a un 7% y un 2%, respectivamente. La duración de la ráfaga correspondiente a todo el proceso de medición (conforme se define en la sección 5.1.1) es de aproximadamente 3 segundos.

El segundo sistema consiste en un anemómetro con una longitud de respuesta de 5 m, un generador de tensión que produce un voltaje proporcional a la velocidad de rotación del anemómetro, un convertidor analógico-digital que actúa cada segundo y un dispositivo de procesamiento digital de las muestras. La parte correspondiente a la medición de la dirección del viento consta de una veleta con una longitud de onda no amortiguada de 5 m y un coeficiente de amortiguamiento de 0,3, un conversor analógico-digital que actúa cada segundo y un dispositivo de cálculo digital de los promedios y las desviaciones típicas. Para determinar las ráfagas máximas se filtrará la tensión con un filtro de primer orden y una constante de tiempo de 1 segundo, efectuando una conversión analógico-digital cada 0,25 segundos. Con respecto al filtrado, este sistema es ligeramente diferente del primero en el sentido de que las desviaciones típicas de la velocidad y de la dirección del viento se filtran en un 12% y un 2%, respectivamente, mientras que la duración de la ráfaga es de aproximadamente 3 segundos. El sistema también puede utilizarse con un registrador de plumilla conectado a la salida analógica, en lugar de al convertidor analógico-digital. En ese caso solo será posible leer promedios y valores extremos, mientras que la duración de la ráfaga será de unos 3 segundos, a menos que el registrador de plumilla responda más lentamente que el filtro de primer orden.

El procedimiento de tratamiento de señales anteriormente descrito es conforme a la Recomendación 3 (CIMO-X) (OMM, 1990), y garantiza una exactitud óptima. Sin embargo, es bastante complicado y difícil, ya que implica la superposición de promedios y una frecuencia de muestreo relativamente elevada. Para muchas aplicaciones se admite que se reduzca el ritmo de muestreo a una muestra cada 3 segundos, siempre y cuando las medias de la señal del viento se calculen cada 3 segundos (es decir, a intervalos que no se superpongan). De esta manera, la duración de las ráfagas es de unos 5 segundos y la desviación típica se reduce un 12% (Beljaars, 1987; OMM, 1987).

5.9 EXPOSICIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE VIENTO

5.9.1 Problemas de carácter general

La velocidad del viento aumenta de forma considerable con la altura, particularmente en terrenos accidentados. Por esa razón, se ha definido una altura estándar de 10 m por encima del terreno abierto para la exposición de los instrumentos de viento. Con respecto a la dirección del viento, el desplazamiento correspondiente a un intervalo de altura de ese orden es relativamente pequeño y se puede ignorar en las mediciones del viento de superficie. Un emplazamiento óptimo para realizar observaciones del viento es un lugar donde el viento observado es representativo del existente sobre una zona de por lo menos algunos kilómetros, o puede corregirse fácilmente para que lo sea.

En un terreno irregular, con obstáculos, o cuya superficie esté cubierta de manera no homogénea, la velocidad y la dirección del viento pueden variar considerablemente. Con frecuencia es posible introducir correcciones y empieza a disponerse de las herramientas necesarias para calcularlas. A fin de mejorar la aplicabilidad de los datos sobre el viento, las mediciones directas transmitidas a los usuarios deberían ir acompañadas de la información esencial para efectuar tales correcciones.

5.9.2 Anemómetros en tierra

La exposición normalizada de los instrumentos de viento sobre terreno llano abierto se efectúa a 10 m por encima del suelo. Se define el terreno abierto como un área en que la distancia entre el anemómetro y un obstáculo cualquiera es como mínimo 10 veces la altura de este último. Las observaciones del viento que se hacen al abrigo de hileras de árboles, edificios u otros obstáculos son de escaso valor y contienen poca información sobre el viento no perturbado. Como los obstáculos pueden abrigar fácilmente a sotavento una distancia igual a 12 o 15 veces su altura, el requisito de 10 veces la altura del obstáculo constituye un mínimo absoluto. En la práctica, suele resultar difícil encontrar un emplazamiento bueno, o incluso aceptable, para una estación anemométrica. Nunca se insistirá lo suficiente en la importancia de escoger un emplazamiento óptimo, aunque sea difícil ofrecer unas directrices universales. No obstante, en algunos casos, los datos relativos a las obstrucciones pueden corregirse en gran medida como sigue:

- Obstáculos a una distancia mayor a 30 veces su altura: no es necesario aplicar una corrección.
- Obstáculos a una distancia mayor a 20 veces su altura: puede aplicarse una corrección.
- Obstáculos a una distancia mayor a 10 veces su altura: en algunos casos puede aplicarse una corrección prestando especial atención.

Cabe señalar que, cuando la distancia es menor a 20 veces la altura del obstáculo, el valor medido antes de la corrección puede ser erróneo hasta un 25%; cuando la distancia decuplica aproximadamente la altura del obstáculo, en algunos casos el valor medido puede incluso indicar la dirección contraria.

En la sección 5.9.4 se proporciona información detallada sobre la corrección de la exposición.

En el cuadro 5.3 se ofrece un resumen de la clasificación de los emplazamientos de observación del viento sobre la base del emplazamiento y la exposición. En el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B) de la presente Guía se proporciona información detallada sobre la clasificación de emplazamientos de las estaciones terrestres de observación en superficie, en la que figuran orientaciones suplementarias sobre la selección de un emplazamiento y la ubicación de un sensor del viento en un emplazamiento para optimizar la representatividad.

Cuadro 5.3. Clasificación de los emplazamientos de observación del viento sobre la base del emplazamiento y la exposición

Clase	Distancia de los mástiles a obstáculos circundantes ^a (altura: h)	Distancia de los sensores a los obstáculos estrechos ^b (con una altura > 8 m; anchura: w)	Índice de clase de rugosidad ^c	Se pueden ignorar los obstáculos aislados por debajo de x m
1	$\geq 30 h$	$\geq 15 w$	2-4 (longitud de rugosidad $\leq 0,1$ m)	$x = 4$
2	$\geq 10 h$	$\geq 15 w$	2-5 (longitud de rugosidad $\leq 0,25$ m)	$x = 4$
3	$\geq 5 h$	$\geq 10 w$		$x = 5$
4	$\geq 2,5 h$	Ningún obstáculo con anchura angular $> 60^\circ$ y una altura > 10 m en una distancia de 40 m		$x = 6$, si la medición es ≥ 10 m
5	No satisface las necesidades de ninguna otra clase			

Notas:

- Un obstáculo es cualquier objeto con una anchura angular superior a 10° .
- Un obstáculo estrecho es, por ejemplo, un mástil, un árbol delgado o un poste de luz.
- En el anexo al presente capítulo se proporciona la definición de "rugosidad".

Dos aspectos son muy importantes a este respecto. En primer lugar, los sensores deberían mantenerse, en la medida de lo posible, alejados de los obstáculos locales. Cuando se efectúen mediciones de viento en la parte lateral de mástiles o torres en lugar de en su cima, los instrumentos deberían estar situados en el extremo de un brazo cuya longitud sea como mínimo el triple de la anchura del mástil o de la torre (Gill y otros, 1967). Cuando se sitúe un instrumento en lo alto de un edificio, aquel deberá elevarse como mínimo el equivalente a una anchura del edificio por encima de la cima. En segundo lugar, la situación local debería estar suficientemente documentada (Wieringa, 1983). Debería existir como mínimo un mapa de los alrededores de la estación en un radio de 2 km, con documentación sobre la localización de los obstáculos y de la vegetación y su altura, cambios de elevación del terreno, etc. Toda alteración de las inmediaciones, como la construcción de edificios o el crecimiento de árboles cercanos, debería figurar explícitamente en los libros de registro de la estación. Asimismo, debería especificarse detalladamente la instrumentación de la estación.

Cuando no sea posible conseguir una exposición normalizada, el anemómetro se puede instalar a una altura tal que sus indicaciones no resulten demasiado afectadas por los obstáculos locales y representen en la medida de lo posible las condiciones de viento que habría a 10 m en ausencia de obstáculos en las inmediaciones. Si el terreno varía poco con el acimut, ese resultado puede obtenerse situando el anemómetro a una altura superior a 10 m conforme determine la longitud de rugosidad eficaz de la superficie z_0 de las inmediaciones (véase el anexo): aproximadamente 13 m cuando $z_0 = 0,1$ m, y unos 19 m cuando $z_0 = 0,5$ m. En Wieringa (1980b) se pone de manifiesto que la estrategia de incrementar la altura del anemómetro no da buenos resultados cuando las condiciones de abrigo locales varían considerablemente con el acimut. En la actualidad existen procedimientos de cálculo simples para determinar el efecto de la topografía local (Walmsley y otros, 1990), y es posible utilizar la climatología de los registros de rafagosidad para determinar las correcciones de la exposición en un entorno no homogéneo (Verkaik, 2000). En Evans y Lee (1981) y Grimmond y otros (1998) se aborda este problema enfocado a las áreas urbanas (véase también el capítulo 9 de la parte II).

En condiciones meteorológicas de congelación, deben adoptarse precauciones especiales para proteger los sensores de viento contra la acumulación de aguanieve y hielo. En ciertos lugares podría ser conveniente instalar algún sistema de calefacción artificial para las partes expuestas, como por ejemplo un radiador infrarrojo controlado por un termostato. Se han diseñado protectores contra el aguanieve y el hielo para determinados tipos de instrumentos anemométricos (véase Curran y otros, 1977).

5.9.3 Anemómetros en el mar

Cada vez es mayor la necesidad de realizar mediciones del viento sobre el mar, especialmente mediante sistemas automáticos que no requieran personal (véase también el capítulo 4 de la parte II). Esta tarea plantea problemas particulares, ya que no siempre se puede respetar en un medio marino la altura de exposición normalizada de 10 m especificada para los instrumentos en tierra, debido al efecto de las olas, de la marea, o de ambos factores a la vez. La mera extrapolación de los criterios de exposición aplicables en tierra induce a pensar que, en boyas fondeadas, el anemómetro debería estar instalado a 10 m sobre la línea de flotación de la boya. Sin embargo, otras fuentes de error son a menudo más importantes que las que resultan de la variación de la altura de exposición (se encontrará una descripción al respecto en OMM, 1981). En el caso de plataformas fijas y barcos, es fundamental que los sensores de viento estén expuestos a una altura suficiente por encima de la plataforma y de su superestructura, a fin de evitar la influencia, frecuentemente considerable, de la plataforma sobre la estructura local del viento. En general, no es seguro suponer que un sensor de viento no se vea afectado por la estructura de la plataforma, aunque esté colocado a más de 10 m por encima de la altura del obstáculo más alto, a menos que la plataforma sea relativamente pequeña. En OMM (1981) se concluye que, para obtener mediciones exactas y útiles en el mar, una buena exposición debería ser más importante que la normalización de las observaciones a 10 m de altura (OMM, 1989). En la práctica, aunque se haya escogido cuidadosamente el emplazamiento de los instrumentos, con frecuencia resulta imposible evitar los errores de exposición. Para que se puedan efectuar las correcciones vinculadas con la altura y las perturbaciones del flujo es muy importante llevar un registro y reunir información detallada acerca de la localización del

anemómetro y del tipo de plataforma o barco (forma y dimensión). Si la velocidad del viento se mide a una altura considerablemente superior a 10 m (es decir, cuando el factor de reducción apropiado fuese mayor que 1,2), debería efectuarse una reducción al nivel de 10 m con arreglo a los procedimientos recomendados en el apartado siguiente, y utilizando la constante correspondiente a “mar abierto” del cuadro del anexo.

5.9.4 Corrección de la exposición

Es raro que las observaciones del viento de superficie no planteen problemas de exposición. Resulta difícil encontrar un terreno llano abierto y la mayoría de las estaciones anemométricas terrestres se ven perturbadas por los efectos topográficos, por la cobertura superficial, o por ambos (OMM, 1987; Wieringa, 1996).

Es obvio que los errores de exposición plantean problemas a los usuarios de datos anemométricos y hacen que a menudo los datos sean inutilizables. Este problema es particularmente grave en el caso de los modelos de predicción numérica, donde se tiende a analizar los campos de viento y de presión por separado. Sin embargo, los vientos de superficie solo se pueden utilizar para la inicialización si son representativos de una zona extensa, lo que significa que deben eliminarse los errores debidos a la exposición local y/o a una altura de observación no estándar.

En el caso de la exposición local, pueden efectuarse correcciones de las observaciones anemométricas solo cuando se dispone de mediciones de calidad aceptable en localizaciones no demasiado rugosas ($z_0 \leq 0,5$ m), y razonablemente llanas. No se debería tratar de corregir mediciones que no tengan casi relación con la media regional. Por ejemplo, las observaciones de una estación anemométrica instalada en un valle profundo, donde el flujo se caracteriza por efectos catabáticos, serán importantes para las predicciones locales, pero no se podrán utilizar como medida representativa del viento a escala regional.

Si U es la velocidad del viento medida a una altura z , la velocidad del viento corregida U_c , que estaría indicada localmente a 10 m por encima de un terreno de rugosidad z_0 , viene dada por la expresión:

$$U_c = U \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln(10/z_{0u})}{\ln(z/z_{0u})} \cdot \frac{\ln(60/z_{0u}) \ln(10/z_0)}{\ln(10/z_{0u}) \ln(60/z_0)} \quad (5.3)$$

donde C_F es la corrección de la distorsión del flujo, C_T es el factor de corrección debido a los efectos topográficos, z_{0u} es la longitud de rugosidad eficaz del terreno a barlovento de la estación de observación, y z_0 es la longitud de rugosidad en la aplicación (por ejemplo, un valor de celda de retícula en un modelo de predicción numérica). En esta expresión, z , z_0 y z_{0u} están especificados en metros. Los diferentes términos de corrección representan lo siguiente:

- Distorsión del flujo: el factor de corrección C_F refleja la distorsión del flujo por objetos cercanos de gran tamaño. Es particularmente importante en los anemómetros situados en edificios, buques y plataformas marinas. La mejor manera de determinar el valor de C_F en función de la dirección del viento es por medio de la simulación con modelos en un túnel de viento (Mollo-Christensen y Seesholtz, 1967). También pueden utilizarse estimaciones basadas en el flujo potencial en torno a configuraciones simples (Wyngaard, 1981; OMM, 1984b). Cuando las mediciones tengan lugar en la cima de un mástil independiente, la distorsión del flujo será despreciable ($C_F = 1$).
- Corrección topográfica: esta corrección refleja los efectos de la altura del terreno en torno a la estación anemométrica. C_T es el cociente entre la velocidad del viento promediada regionalmente (calculada a partir de las observaciones efectuadas sobre las dorsales y los valles a 10 m por encima del suelo) y la velocidad del viento observada en la estación. Por ejemplo, en el caso de una estación instalada en la cima de una colina aislada, C_T será inferior a 1 para corregir la aceleración inducida por la colina, a fin de que el resultado sea representativo de las condiciones que reinan en la zona y no solo en lo alto de la colina. En terreno llano, C_T será igual a 1. En el caso de colinas y dorsales aisladas, podrán realizarse estimaciones de C_T con la ayuda de directrices simples (Taylor y Lee, 1984). Si la topografía

es más compleja, será necesario realizar cálculos con modelos sobre la base de mapas topográficos detallados del terreno que rodea las estaciones anemométricas (Walmsley y otros, 1990). Estos cálculos son bastante complicados, pero solo es necesario realizarlos una vez para cada estación, y de ellos se obtiene una tabla semipermanente de valores de C_T en función de la dirección del viento.

- c) Altura de observación no estándar: este efecto se incluye simplemente en la fórmula de U_c suponiendo un perfil logarítmico combinado con la longitud de rugosidad z_{0u} del terreno a barlovento. En estaciones marinas, la reducción a la altura estándar puede ser importante, pero las correcciones de estabilidad serán relativamente pequeñas, justificando así la forma logarítmica de la reducción.
- d) Efectos de rugosidad: los efectos de rugosidad a barlovento, así como los efectos producidos por los obstáculos situados en la superficie, pueden corregirse extrapolando el perfil logarítmico de la velocidad del viento hasta una altura de 60 m con la longitud de rugosidad eficaz z_{0u} específica de la estación, y realizando una interpolación retrospectiva a 10 m con la longitud de rugosidad z_0 necesaria para la aplicación. La longitud de rugosidad z_{0u} debería ser representativa de un alcance de 2 km a barlovento de la estación, y su valor depende generalmente de la dirección del viento. En el anexo se explica la manera de estimar z_{0u} .

Si los problemas de distorsión del flujo y de topografía son despreciables o han sido corregidos, se aplicarán las correcciones de la exposición c) y d) mediante la fórmula 5.3 hasta los niveles $z = 10$ m y $z_0 = 0,03$ m. Con ello, las velocidades del viento corregidas serán equivalentes a las que habrían sido medidas en una estación anemométrica local hipotética completamente conforme con los requisitos de la OMM (10 m sobre terreno abierto). Las velocidades del viento corregidas por ese método se denominan velocidades del viento potenciales (OMM, 2001). A este respecto corresponde efectuar dos comentarios. En primer lugar, la altura de extrapolación de 60 m no debería considerarse como un valor muy estricto, pues valores comprendidos entre 40 y 80 m también serían aceptables; 60 m es aproximadamente la magnitud correcta en relación con el alcance de 2 km para el que z_{0u} es representativa, y se ha demostrado que los resultados obtenidos con esa altura son satisfactorios (Wieringa, 1986). En segundo lugar, no se pueden subestimar las correcciones de los perfiles de viento vinculadas con la estabilidad en el intervalo entre 10 y 60 m de altura, pero el efecto de la estabilidad es relativamente pequeño en la formulación actual porque las correcciones de estabilidad en las transformaciones a barlovento y a sotavento se anulan entre sí. En OMM (2000 y 2001) se proporciona un ejemplo práctico de corrección aplicada a una medición de viento en un contexto operativo. Aunque la mayoría de las correcciones de exposición pueden aplicarse directamente a las mediciones, deberían darse a conocer tanto los datos no ajustados (nivel I) como los ajustados (nivel II).

5.10 CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO

La calibración totalmente eficaz de los anemómetros de cazoletas y de hélice y de las veletas solo es posible en un túnel de viento. El funcionamiento de esos instrumentos ya se conoce bien y, si están en buenas condiciones, se puede confiar en la calibración del fabricante. Las pruebas en túneles de viento son útiles en el caso de proyectos especiales o de pruebas de prototipos de nuevos modelos. Para mayor información, véanse las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) (ISO 16622:2002 e ISO 17713-1:2007).

Sobre el terreno, los anemómetros se pueden deteriorar, por lo que conviene revisarlos con regularidad. Un daño físico, la fricción de los cojinetes por la penetración de polvo o por corrosión, o una alteración del proceso de transducción (por ejemplo, una disminución de rendimiento de un generador de cazoletas o de hélice debido al desgaste de la escobilla) pueden entrañar una modificación de las características del sensor y un deterioro de la calidad de los datos anemométricos.

La inspección de trazas analógicas permitirá detectar fallos como los revelados por un cero incorrecto, un trazado escalonado debido al rozamiento, un ruido anormal (que podría percibirse a velocidades del viento bajas), una sensibilidad reducida (a velocidades bajas), y una variabilidad irregular o reducida del viento registrado.

Con ocasión de la inspección de los instrumentos y para determinar posibles daños físicos, convendría verificar el sistema de puesta a cero del anemómetro sujetando las cazoletas o la hélice, y también la orientación de la veleta, manteniéndola fija en una o varias posiciones predeterminadas. En general, los instrumentos se pueden reparar solamente en un taller.

Los componentes eléctricos y electrónicos de los instrumentos de registro o de telemetría se deberían controlar regularmente. En particular, hay que verificar el cero y el rango de funcionamiento de los sistemas de medición de la velocidad y de la dirección del viento.

ANEXO. LONGITUD DE RUGOSIDAD EFICAZ

A los efectos de corregir la exposición, es necesario definir, en función de la dirección del viento, una longitud de rugosidad z_0 que sea representativa del terreno a una distancia de 2 km a barlovento. La calidad de la corrección de los efectos de la rugosidad depende mucho de la exactitud de esa longitud de rugosidad.

En el mar, la tarea es relativamente simple debido al alcance uniforme. Puede aplicarse en estos casos la relación de Charnock para expresar la rugosidad de la superficie del mar en función de la velocidad de rozamiento u^* y de la aceleración de la gravedad g mediante la ecuación $z_{0u} = \alpha u^{*2}/g$, donde α es una constante empírica aproximadamente igual a 0,014. La velocidad de rozamiento se relaciona con el perfil del viento neutro por la expresión $U(z) = (u^*/\kappa) \ln(z/z_{0u})$, donde κ es la constante de von Karman (0,4) y z es la altura de observación. Estas dos ecuaciones deben resolverse por medios iterativos, para lo cual se comenzará con $z_{0u} = 0,0001$, y se calculará u^* a partir del perfil logarítmico, evaluando z_{0u} de nuevo y repitiendo el proceso varias veces.

Sobre tierra firme, la longitud de rugosidad en superficie, que depende de la cubierta superficial y del uso de la tierra, suele ser difícil de estimar. Un método subjetivo para determinar z_{0u} consiste en efectuar un reconocimiento visual del terreno en torno a la estación anemométrica, con ayuda de la tabla adjunta, cuya validez ha sido corroborada recientemente (Davenport y otros, 2000). Los resultados más satisfactorios se obtienen seleccionando unos sectores de dirección del viento de 30° hasta una distancia de 2 km. En condiciones de alcance muy poco homogéneas, la rugosidad eficaz debería determinarse promediando los valores de $\ln(z_{0u})$ en vez de los de z_{0u} .

La mejor manera de determinar el valor de z_{0u} consiste en aprovechar la climatología de las desviaciones típicas a lo largo de un período de un año aproximadamente. Las desviaciones típicas de la velocidad y de la dirección del viento están relacionadas con la rugosidad a barlovento a lo largo de varios kilómetros, y pueden utilizarse para estimar objetivamente z_{0u} . Conociendo la desviación típica de la velocidad del viento s_u y la de su dirección s_d (en radianes) es posible utilizar las fórmulas siguientes:

$$s_u/U = c_u \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad 5.A.1$$

$$s_d/U = c_v \kappa [\ln(z/z_{0u})]^{-1} \quad 5.A.2$$

donde $c_u = 2,2$, $c_v = 1,9$ y $\kappa = 0,4$ para mediciones no filtradas de s_u y s_d . En el caso de los sistemas de medición descritos en la sección 5.8.3, la desviación típica de la velocidad del viento se filtra en un 12% aproximadamente y la de la dirección del viento, en un 2% aproximadamente, lo que implica que c_u y c_v se reducen a 1,94 y 1,86, respectivamente. Para aplicar las ecuaciones anteriores será necesario seleccionar situaciones de viento fuerte ($U > 4 \text{ m s}^{-1}$) y promediar s_u/U y/o s_d/U para todos los datos disponibles por cada clase de sector de viento (30° de anchura) y por cada estación del año (la rugosidad de la superficie depende, por ejemplo, de la densidad del follaje de los árboles). Será así posible determinar los valores de z_{0u} mediante las ecuaciones anteriores y la comparación de los resultados obtenidos a partir de s_u y s_d permitirá hacerse una idea del grado de exactitud conseguido.

Cuando no se disponga de información sobre la desviación típica, pero se haya determinado la ráfaga máxima para un cierto período de promediado de la velocidad del viento (10 minutos o 1 hora), también podrán utilizarse los cocientes entre esas ráfagas máximas y los promedios durante el mismo período (factores de ráfaga) para determinar z_{0u} (Verkaik, 2000). Para utilizar este método será necesario conocer la dinámica del sistema, es decir, la longitud de respuesta del sensor y el tiempo de respuesta de la cadena de registro.

Clasificación del terreno en términos de longitud de rugosidad aerodinámica z_0 según Davenport (1960), adaptada por Wieringa (1980b)

<i>Clase</i>	<i>Breve descripción del terreno</i>	<i>z_0 (m)</i>
1	Mar abierto, alcance de 5 km como mínimo	0,0002
2	Marismas, nieve; ausencia de vegetación, ausencia de obstáculos	0,005
3	Terreno llano y despejado; hierba, algunos obstáculos aislados	0,03
4	Cultivos bajos; obstáculos ocasionales grandes, $x/H > 20$	0,10
5	Cultivos altos; obstáculos dispersos, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Parques, matorrales; numerosos obstáculos, $x/H \approx 10$	0,5
7	Grandes obstáculos regularmente distribuidos (barrios residenciales, bosques)	1,0
8	Aglomeraciones urbanas con edificios de diversas alturas	≥ 2

Nota: En este cuadro x representa la distancia característica de un obstáculo a barlovento y H la altura de los principales obstáculos. Para una descripción más detallada y actualizada de las clases de terreno, véase Davenport y otros (2000) (véase también el capítulo 9 de la parte II (cuadro 9.2)).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Ackermann, G. R., 1983: "Means and standard deviations of horizontal wind components", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 22, págs. 959 a 961.
- Albers, A., H. Klug y D. Westermann, 2000: "Outdoor comparison of cup anemometers", en *DEWI Magazin*, núm. 17.
- Beljaars, A. C. M., 1987: "The influence of sampling and filtering on measured wind gusts", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 4, págs. 613 a 626.
- Busch, N. E. y L. Kristensen, 1976: "Cup anemometer overspeeding", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 15, págs. 1328 a 1332.
- Coppin, P. A., 1982: "An examination of cup anemometer overspeeding", en *Meteorologische Rundschau*, vol. 35, págs. 1 a 11.
- Curran, J. C., G. E. Peckham, D. Smith, A. S. Thom, J. S. G. McCulloch e I. C. Strangeways, 1977: "Cairngorm summit automatic weather station", en *Weather*, vol. 32, págs. 60 a 63.
- Davenport, A. G., 1960: "Rationale for determining design wind velocities", en *Journal of the Structural Division*, Asociación de Ingenieros Civiles de Estados Unidos, vol. 86, págs. 39 a 68.
- Davenport, A. G., C. S. B. Grimmond, T. R. Oke y J. Wieringa, 2000: "Estimating the roughness of cities and sheltered country", en *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology* (Asheville, NC, Estados Unidos de América), págs. 96 a 99.
- Evans, R. A. y B. E. Lee, 1981: "The problem of anemometer exposure in urban areas: a wind-tunnel study", en *Meteorological Magazine*, vol. 110, págs. 188 a 189.
- Frenkiel, F. N., 1951: "Frequency distributions of velocities in turbulent flow", en *Journal of Meteorology*, vol. 8, págs. 316 a 320.
- Gill, G. C., L. E. Olsson, J. Sela y M. Suda, 1967: "Accuracy of wind measurements on towers or stacks", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 48, págs. 665 a 674.
- Gold, E., 1936: "Wind in Britain – The Dines anemometer and some notable records during the last 40 years", en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 62, págs. 167 a 206.
- Grimmond, C. S. B., T. S. King, M. Roth y T. R. Oke, 1998: "Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations", en *Boundary Layer Meteorology*, vol. 89, págs. 1 a 24.
- Kaimal, J. C., 1980: "Sonic anemometers", en *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse y R. Davis, eds.). Plenum Press, Nueva York, págs. 81 a 96.
- Lenschow, D. H. (ed.), 1986: *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. Sociedad Meteorológica de Estados Unidos, Boston.
- MacCready, P. B., 1966: "Mean wind speed measurements in turbulence", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 5, págs. 219 a 225.
- MacCready, P. B. y H. R. Jex, 1964: "Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 3, págs. 182 a 193.
- Makinwa, K. A. A., J. H. Huijsing y A. Hagedoorn, 2001: "Industrial design of a solid-state wind sensor", en *Proceedings of the First ISA/IEEE Conference* (Houston, noviembre de 2001), págs. 68 a 71.
- Mazzarella, D. A., 1972: "An inventory of specifications for wind-measuring instruments", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 53, págs. 860 a 871.
- Mollo-Christensen, E. y J. R. Seesholtz, 1967: "Wind tunnel measurements of the wind disturbance field of a model of the Buzzards Bay Entrance Light Tower", en *Journal of Geophysical Research*, vol. 72, págs. 3549 a 3556.
- Organización Internacional de Normalización, 2002: *Meteorology – Sonic Anemometers/Thermometers – Acceptance Test Methods for Mean Wind Measurements*, ISO 16622:2002. Ginebra.
- , 2007: *Meteorology – Wind Measurements – Part I: Wind Tunnel Test Methods for Rotating Anemometer Performance*, ISO 17713-1:2007. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial, 1981: *Review of Reference Height for and Averaging Time of Surface Wind Measurements at Sea* (F. W. Dobson). Informe N° 3 sobre meteorología marina y actividades oceanográficas conexas. Ginebra.
- , 1984a: *Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la Clase IV* (B. J. Retallack) (OMM-N° 266). Ginebra.
- , 1984b: "Distortion of the wind field by the Cabauw Meteorological Tower" (H. R. A. Wessels), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations* (TECEMO). Informe N° 15 sobre instrumentos y métodos de observación. Ginebra.
- , 1987: *The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations: A Review* (A. C. M. Beljaars). Informe N° 31 sobre instrumentos y métodos de observación. Ginebra.

- , 1989: *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R. J. Shearman and A. A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22 (WMO/TD-No. 311). Ginebra.
- , 1990: *Informe final abreviado de la décima reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación* (OMM-N° 727). Ginebra.
- , 1991: *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D. Painting). Report of the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Report No. 47 (WMO/TD-No. 452). Ginebra.
- , 2000: "Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations" (J. P. van der Meulen), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Ginebra.
- , 2001: *Compendio de apuntes para la formación de personal agrometeorológico de las Clases II y III* (J. Wieringa y J. Lomas) (OMM-N° 551). Ginebra.
- , 2011: *Manual de claves* (OMM-N° 306), volumen I.1. Ginebra.
- Patterson, J., 1926: "The cup anemometer", en *Transactions of the Royal Society of Canada*, serie III, vol. 20, págs. 1 a 54.
- Smith, S. D., 1980: "Dynamic anemometers", en *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse y R. Davis, eds.). Plenum Press, Nueva York, págs. 65 a 80.
- Taylor, P. A. y R. J. Lee, 1984: "Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features", en *Climatological Bulletin*. Sociedad Meteorológica y Oceanográfica de Canadá, vol. 18, págs. 3 a 22.
- Van Oudheusden, B. W. y J. H. Huijsing, 1991: "Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface wind", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 8, págs. 374 a 384.
- Verkaik, J. W., 2000: "Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, págs. 1613 a 1626.
- Walmsley, J. L., I. B. Troen, D. P. Lalas y P. J. Mason, 1990: "Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations", en *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 52, págs. 259 a 281.
- Wieringa, J., 1967: "Evaluation and design of wind vanes", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 6, págs. 1114 a 1122.
- , 1980a: "A reevaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding", en *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 18, págs. 411 a 430.
- , 1980b: "Representativeness of wind observations at airports", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 61, págs. 962 a 971.
- , 1983: "Description requirements for assessment of non-ideal wind stations, for example Aachen", en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 11, págs. 121 a 131.
- , 1986: "Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages", en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 112, págs. 867 a 889.
- , 1996: "Does representative wind information exist?", en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 65, págs. 1 a 12.
- Wieringa, J. y F. X. C. M. van Lindert, 1971: "Application limits of double-pin and coupled wind vanes", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 10, págs. 137 a 145.
- Wyngaard, J. C., 1981: "The effects of probe-induced flow distortion on atmospheric turbulence measurements", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, págs. 784 a 794.