

Protocolo de confiabilidad de la medición, verificación de calidad y
reporte de variables meteorológicas en plantas eólicas conectadas al
STN Y STR



Bogotá, Colombia
Septiembre 2019

Índice

1. Introducción	3
2. Objetivo	3
3. Ámbito de aplicación	3
4. Referencias normativas	4
5. Procedimiento para la instrumentación	4
5.1. Selección de la zona de instalación	4
5.2. Selección de instrumentos de medición	7
5.3. Instalación de torres e instrumentos	8
6. Procedimientos de monitoreo y reporte de información meteorológica	9
6.1. Monitoreo y reporte de las variables meteorológicas en tiempo real al CND .	9
6.2. Mantenimiento del sistema de monitoreo	10
7. Aseguramiento de la calidad en la información	11
7.1. Rutinas de validación	11
8. Reporte de información meteorológica al CND	13
A. Equipos	14
B. Velocidad del viento	14
B.1. Medición de velocidad del viento a la altura del cubo	15
C. Dirección de viento	16
D. Temperatura ambiente	16
E. Humedad relativa	16
F. Presión atmosférica	17
G. Montaje de instrumentos en el mástil meteorológico	17
H. Generalidades	17
I. Anemómetro individual montado en la parte superior del mástil	18
J. Anemómetros montados lado a lado en la parte superior del mástil	19
K. Instrumentos montados lateralmente	20

K.1. Generalidades	20
K.2. Mástiles meteorológicos tubulares	22
K.3. Mástiles meteorológicos reticulados	22
L. Montaje de otros instrumentos meteorológicos	26
M. Dispositivos de medición remotos	27
Bibliografía	28

1. Introducción

En la resolución 060 de 2019 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), por la cual se hacen modificaciones al Reglamento de Operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), se exige la definición de un protocolo para la verificación de calidad, confiabilidad de la medición y reporte al CND de las variables meteorológicas correspondientes a velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica para las plantas eólicas.

Este protocolo define los requerimientos respecto al sistema de monitoreo de las variables meteorológicas en el sitio de la planta y reporte de las mismas al CND. Las técnicas de medición y análisis técnicamente precisas recomendadas en este documento deben ser seguidas por todas las partes con el fin de asegurar la calidad y confiabilidad de la medición de las variables meteorológicas de interés. Este documento presenta procedimientos de medición y reporte que aseguran la calidad de los resultados y que éstos puedan ser replicados por otros.

La calidad de las mediciones depende fundamentalmente de la selección, calibración y la correcta instalación, operación y mantenimiento de los instrumentos de medición. Al respecto, se han desarrollado diversas normas, estándares y guías de mejores prácticas relacionadas con la medición de las variables meteorológicas relevantes en la operación de las plantas eólicas, entre las que destacan y se usan principalmente en la industria las mencionadas en la siguiente sección.

2. Objetivo

Establecer los procedimientos para instrumentación, monitoreo, verificación de la calidad y confiabilidad de la información meteorológica y reporte al CND.

3. Ámbito de aplicación

Las plantas de generación eólica conectadas al STR y STN deberán acogerse al protocolo definido y aprobado mediante este Acuerdo. Las plantas conectadas al SDL lo pueden adoptar

de forma opcional.

4. Referencias normativas

Este documento está basado principalmente en el estándar 61400-12-1 de 2017 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [1], en la guía práctica para el desarrollo de un proyecto eólico *Wind Resource Assessment* [2] y en la guía para la *Evaluación de condiciones específicas de viento en sitio* de la Red de Medición de Institutos de Energía Eólica (MEASNET) [3]. Si bien el estándar 61400-12-1 está dirigido al análisis del desempeño de potencia de turbinas eólicas, las especificaciones de medición allí descritas definen un conjunto de criterios técnicos que permiten garantizar la calidad y confiabilidad de la medición de las variables meteorológicas de interés para caracterizar el recurso disponible en el parque. Este protocolo está basado específicamente en la versiones previamente mencionadas.

Si bien el presente protocolo parte de las recomendaciones indicadas en los estándares y guías anteriormente citados, se hace la claridad que *la vigencia de este documento no está ligada a la vigencia de los anteriores*.

5. Procedimiento para la instrumentación

A continuación se plantea el procedimiento con los requerimientos mínimos para garantizar la confiabilidad de la medición, verificación de calidad y reporte de velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad temperatura y presión atmosférica en plantas eólicas conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Los soportes para cada uno de los requerimientos y mayor detalle pueden ser revisados en los anexos.

El procedimiento propuesto está dividido en secciones (o etapas) las cuales deben ser cumplidas en su totalidad para garantizar el objetivo de este. La primera de estas es la *Selección de la zona de instalación*, en donde se especifica dónde serán instaladas las torres meteorológicas, así como su nivel de incertidumbre asociado. La segunda etapa, *Selección de instrumentos de medición*, especifica los requerimientos mínimos que deben cumplir los instrumentos seleccionados para la medición de las variables meteorológicas. En la siguiente etapa, *Instalación de torres e instrumentos*, se especifican los requerimientos geométricos mínimos para la instalación de la torre y los instrumentos montados en ella.

5.1. Selección de la zona de instalación

Dependiendo del tipo de terreno en el cual está ubicado el parque eólico, se define un *radio representativo*, el cual es la distancia máxima desde cualquier turbina hasta el mástil meteorológico más cercano de manera que las medidas sean representativas de las condiciones en

el parque [3].

Para definir el radio de representatividad para diferentes tipos de terreno, se definen dos clases de terreno ejemplares. La clase de terreno simple (figura 1) describe el terreno plano sin variaciones notables de elevación del terreno. Tal sitio tiene solo un relieve menor que conduce a una influencia insignificante de los efectos orográficos en las condiciones del viento. Por lo tanto, estos últimos están influenciados principalmente por las condiciones del terreno. La clase de terreno complejo (figura 2) corresponde a un sitio con una considerable variación orográfica (relieve) y pendientes significativas. Tal sitio es caracterizado por características orográficas con pendientes del terreno mayores a 0.3 (aproximadamente 17°), las cuales tienen una influencia significativa en las condiciones del viento.



Figura 1: Ejemplo de un sitio con *terreno simple* como se define en este protocolo. Tomado de [3]

Tipo de terreno	Radio representativo de un mástil (Máxima distancia entre cualquier turbina y un mástil)
Terreno simple	10 km
Terreno complejo	2 km

Tabla 1: Definición de requerimientos para diferentes terrenos

La tabla 1 consigna el radio representativo de un mástil para los tipos de terreno mencionados. Para terrenos montañosos menos complejos, el radio representativo debe ser obtenido realizando una interpolación entre las clases previamente definidas. Para terrenos montañosos altamente complejos, valores aún menores para el radio representativo pueden ser usados.

El mástil meteorológico debe estar ubicado en la dirección vientos arriba predominante de la turbina más cercana con el fin de evitar perturbaciones del flujo debido a la interacción



Figura 2: Ejemplo de un sitio con *terreno complejo* como se define en este protocolo. Tomado de [3].

con la turbina. Para una especificación más detallada de la posición del mástil meteorológico respecto a las turbinas y el tipo de terreno se recomienda, por ejemplo, seguir los lineamientos de la IEC 61400-12-1 [1].

Con el fin de caracterizar la velocidad del viento incidente en el parque el número de estaciones meteorológicas requeridas es uno (1), ubicada vientos arriba del parque eólico en la dirección de donde se espera que llegue el viento, dentro de un radio representativo, según el tipo de terreno, con centro en uno de los aerogeneradores de la primera hilera del parque.

Cuando las condiciones del terreno no permitan la correcta ubicación e instalación de un mástil meteorológico vientos arriba del parque, el agente puede posicionar la torre meteorológica en ubicaciones alternativas, por ejemplo de manera lateral, siempre y cuando se encuentre dentro del radio representativo para el terreno y las mediciones no se vean impactadas por efecto de las turbinas en la dirección predominante del viento.

Dispositivos de medición remotos, como lo son los sistemas LiDAR y SoDAR, pueden ser utilizados para la medición de velocidad y dirección de viento a la altura del cubo, siguiendo los requerimientos expuestos en M. Estos pueden sustituir las torres meteorológicas en terrenos simples, como lo son definidos en este protocolo, sin necesidad de realizar calibración del sitio de instalación. En los casos de terreno complejo es necesario realizar calibración del sitio como se expresa en el estándar IEC [1], para poder sustituir la instalación de torres meteorológicas.

5.2. Selección de instrumentos de medición

Dentro de los instrumentos requeridos para la medición de variables meteorológicas, el número mínimo de anemómetros requeridos para la medición de velocidad y dirección del viento a la altura del cubo es de dos (2), donde uno es un anemómetro principal y el segundo tiene la función de anemómetro de control y respaldo. El número de veletas (o instrumentos de medición de dirección de viento) es de uno (1), al igual que el número de sensores para temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.

Los anemómetros seleccionados deben cumplir los requerimientos mínimos establecidos en la tabla 2, asegurándose que el nivel de incertidumbre de estos sea por lo menos de clase 1.7. Así mismo, los instrumentos deben cumplir normas de calibración aplicables: IEC 61400-12-1, ASTM D5096-02:2011, ISO 17713-1:2007, ISO 16622:2002, ASTM D6011-96, entre otros.

Especificación	Anemómetro
Rango de medición	0-50 m/s
Umbral de inicio	≤ 1.0 m/s
Distancia constante	≤ 3.0 m/s
Rango de temperatura de funcionamiento, °C	-40 a 60
Rango de humedad relativa de funcionamiento	0-100
Resolución	≤ 0.1 m/s
Incetidumbre	$\leq 1.7\%$

Tabla 2: Características técnicas exigidas para anemómetros

Los sensores de dirección del viento deben cumplir con los requerimientos descritos en la tabla 3, asegurando una banda muerta menor a 8°. Así mismo, los instrumentos deben cumplir normas de calibración aplicables: ASTM D5366-96:2017, entre otros.

Especificación	Anemómetro
Rango de medición	0°-360° (banda muerta $\leq 8^\circ$)
Umbral de inicio	≤ 1.0 m/s
Rango de temperatura de funcionamiento, °C	-40 a 60
Rango de humedad relativa de funcionamiento	0-100
Resolución	$\leq 1^\circ$

Tabla 3: Características técnicas exigidas para sensores de dirección de viento

Los requerimientos mínimos para los sensores de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa, se encuentran en la tabla 4. Estos instrumentos deben cumplir normas de calibración aplicables.

Especificación	Sensor de temperatura	Sensor de presión atmosférica	Sensor de humedad relativa
Rango de medición	-40 a 60 °C	94-106 kPa	0-100 %
Constante de tiempo	≤ 20 s	≤ 2 s	≤ 20 s
Rango de temperatura de funcionamiento, °C	-40 a 60	-40 a 60	-40 a 60
Rango de humedad relativa de funcionamiento	0-100	0-100	0-100
Resolución	≤ 0.1 °C	≤ 0.2 kPa	≤ 1 %

Tabla 4: Características técnicas exigidas para sensores de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.

En el anexo A se encuentra información más detallada respecto a la selección de equipos.

5.3. Instalación de torres e instrumentos

Al momento de instalar nuevas torres o utilizar torres existentes, estas deben seguir los lineamientos de instalación de instrumentos descritos en el estándar internacional [1] u otra guía de buenas prácticas reconocidas en la industria, más información se puede consultar en el anexo G. Se debe especificar si la torre será tubular o reticulada, teniendo en cuenta que si su altura supera los 80 metros, esta debe ser reticulada.

Dependiendo de la torre escogida, se deben seguir los lineamientos descritos en el estándar internacional [1] u otra guía de buenas prácticas reconocidas en la industria, más información se puede consultar en el anexo G. Para el caso de torres con instrumentos montados lateralmente, los anemómetros deben ser instalados en postes horizontales con un desplazamiento de 45° de la dirección del viento predominante para mástiles tubulares, o 90° de la dirección del viento predominante para mástiles reticulados. No se instalará ningún otro instrumento en el mismo poste.

La distancia radial entre la posición del anemómetro y el centro del mástil meteorológico debe cumplir una relación con el diámetro del mástil de 6.1 para torres tubulares; para torres reticuladas, refiérase al cálculo de esta distancia en la sección K.3.

El anemómetro de control debe estar ubicado tan cerca al anemómetro principal como sea posible, mientras se mantienen los requerimientos mínimos de separación descritos en I y K, a fin de proveer una buena correlación entre los dos instrumentos. El anemómetro de control no debe interferir con el correcto funcionamiento del anemómetro principal.

El sensor de dirección de viento debe estar montado de 4 a 10 metros por debajo del anemómetro principal. Este debe estar montado de tal manera que se minimicen los efectos de perturbación de flujo respecto al sector de medición. La separación horizontal entre el sensor de dirección de viento y el mástil meteorológico debe ser por lo menos la mitad de lo requerido para un anemómetro.

Excepto en el caso donde la altura de un mástil meteorológico sea menor a la altura del cubo, los sensores de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica deben estar ubicados a menos de 10 metros de la altura del cubo en el mástil meteorológico y mínimo 1.5 metros por debajo del anemómetro principal mientras se cumplen todos los requerimientos definidos en I y K. Los sensores de temperatura deben estar protegidos mediante un escudo de radiación. El sensor de presión debe estar montado en una caja resistente a la intemperie. Sin embargo, se debe tener cuidado en asegurar que la caja está ventilada de manera apropiada de tal manera que las lecturas no están siendo afectadas por la distribución de presión alrededor de la caja.

Si la altura del mástil meteorológico disponible para la instalación de instrumentos de medición es menor a la altura de cubo, los sensores de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica deben estar ubicados entre 1.5 y 10 metros del anemómetro principal. La presión atmosférica debe ser ajustada a la altura de cubo siguiendo las el estándar IEC 61400-12-1:2017 [1]. Además, la temperatura del aire debe ser ajustada a la altura de cubo asumiendo que la atmósfera varía de acuerdo a ISO 2533:1975. De manera alterna, el sensor de temperatura puede ser instalado en la góndola de la turbina eólica más cercana a la torre meteorológica. El sensor debe estar instalado por lo menos 1 metro por encima de la góndola y aguas arriba de cualquier sistema de ventilación existente. Ejemplos de configuraciones adecuadas se encuentran en las secciones I y K.

6. Procedimientos de monitoreo y reporte de información meteorológica

A continuación, se plantea el procedimiento con los requerimientos mínimos para reportar la velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica en plantas eólicas conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN).

La etapa de Monitoreo de las variables meteorológicas especifica las instrucciones tanto para el reporte en tiempo real, frecuencias de muestreo y transmisión de datos al CND. En la etapa de Mantenimiento del sistema de monitoreo se deben realizar una serie de actividades para garantizar la calidad y confiabilidad de la información.

6.1. Monitoreo y reporte de las variables meteorológicas en tiempo real al CND

El monitoreo de las variables meteorológicas en plantas eólicas conectadas al STN y STR comprende de 2 tareas: muestreo y reporte en tiempo real.

Los agentes deberán muestrear y reportar el promedio, como se especifica en 8, de las si-

guientes variables:

- Velocidad del viento a la altura del cubo (m/s).
- Dirección del viento a la altura del cubo (grados respecto al norte geográfico).
- Temperatura ambiente (°C).
- Presión atmosférica (hPa).
- Humedad relativa (%).

Tanto la velocidad del viento como su dirección deben ser reportadas en tiempo real como promedios de 5 minutos de datos tomados con una tasa de muestreo de 1 Hz. Para las variables de temperatura, presión atmosférica y humedad relativa la tasa de muestreo será de 1 minuto, manteniendo el reporte en tiempo real como promedio de 5 minutos. Esta información deberá ser reportada por los agentes al CND teniendo en cuenta lo indicado en el numeral 8. Los intervalos de ejecución de estas tareas se encuentran en la tabla 5.

Variable	Intervalo de muestreo	Intervalo de reporte en tiempo real
Velocidad de viento	1 segundo	5 minutos
Dirección de viento	1 segundo	5 minutos
Temperatura	1 minuto	5 minutos
Presión atmosférica	1 minuto	5 minutos
Humedad relativa	1 minuto	5 minutos

Tabla 5: Intervalos de muestreo y reporte en tiempo real de las variables meteorológicas

Debido a la gran cantidad de datos a manejar en el proceso de transmisión de las variables meteorológicas es importante (y conveniente) que no se envíen datos *duplicados*. Para el caso de variables meteorológicas en parques eólicos, donde el requerimiento corresponde a dos instrumentos por variable, donde uno es de control, este último debe servir para la verificación de calidad y respaldo en caso de ser requerido. Solo se transmitirán y reportarán datos tomados por el instrumento principal, a menos que los datos provenientes de este no estén presentes o estén comprometidos de alguna manera. Es decir, se envía un único dato por variable reportada.

6.2. Mantenimiento del sistema de monitoreo

El mantenimiento del sistema de monitoreo debe darse sin que interfiera con el funcionamiento del mismo. De ser posible, las intervenciones a los sensores, *data loggers* y demás componentes del sistema deben realizarse en campo, para rehabilitarlos en el menor tiempo posible. Cuando un sensor u otro componente se retira, la calidad de la medición no se afecta en la medida que los demás sensores y componentes instalados deben respaldar la función de dicho elemento retirado. No obstante, se aconseja tener sensores y demás componentes

almacenados, para usarlos como reemplazo si un componente se retira y no hay facilidad en reemplazar su función con los demás instalados. Los procedimientos de recalibración y mantenimiento deben ajustarse a lo establecido en las fichas técnicas de los fabricantes.

Las normas y estándares aplicables para la calibración incluyen el anexo F del estándar IEC 61400-12-1:2017, las normas ISO 17713-1:2017 y 16622:2002 así como las ASTM D5096-02:2011 y D6011-96:2015.

7. Aseguramiento de la calidad en la información

La calidad de los datos adquiridos por el sistema de monitoreo de las variables meteorológicas se asegura mediante la aplicación de los lineamientos expresados en este protocolo, haciendo énfasis en el posicionamiento correcto de los sensores, en el procedimiento de mantenimiento y calibración de los mismos y demás equipos del sistema, y en que se asegure la redundancia en las mediciones, haciendo chequeos cruzados entre las tomas de varios sensores para la verificación de su correcto funcionamiento.

Los instrumentos de medición deben ir acompañados de sistemas de acondicionamiento de señales que hagan un filtrado de los datos adquiridos. Se debe establecer valores mínimos y máximos razonables para que el sistema deseche los datos atípicos, cuyos valores estén por fuera de este límite, para que no sean tenidos en cuenta para el cálculo del promedio de las variables medidas. El establecimiento de los parámetros de este filtrado está a discreción de cada agente operador de las plantas eólicas de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar de la planta.

Cualquiera que sea el método utilizado, la validación de datos generalmente se realiza en dos fases: detección automatizada y revisión en profundidad. La detección automatizada utiliza una serie de algoritmos para marcar registros de datos sospechosos. Los registros sospechosos contienen valores que se encuentran fuera del rango normal en función del conocimiento previo o la información de otros sensores en la misma torre. Los algoritmos comúnmente incluyen pruebas relacionales, pruebas de rango y pruebas de tendencia.

La segunda fase, a veces llamada verificación, implica una decisión caso por caso sobre qué hacer con los valores sospechosos: retenerlos como válidos o rechazarlos como no válidos. Aquí es donde el juicio de una persona experimentada y familiarizada con el equipo de monitoreo y la meteorología local es más útil.

7.1. Rutinas de validación

Las rutinas de validación están diseñadas para evaluar cada parámetro medido y marcar valores sospechosos para su revisión. Se pueden agrupar en dos categorías principales: veri-

ficaciones generales del sistema y verificaciones de parámetros medidos.

1. **Verificaciones generales del sistema.** Dos pruebas simples que se describen a continuación evalúan la integridad de los datos recopilados:
 - *Registros de datos.* El número de campos de datos debe ser igual al número esperado de parámetros medidos para cada registro.
 - *Secuencia de tiempo.* El sello de fecha y hora de cada registro de datos se examina para ver si faltan datos o están fuera de secuencia.
2. **Verificación de parámetros medidos.** Comúnmente se realizan tres verificaciones de parámetros de medición: pruebas de rango, pruebas relacionales y pruebas de tendencia. Estas pruebas se aplican en secuencia, y los datos deben pasar las tres para que se consideren válidas.
 - *Pruebas de rango.* En las pruebas de rango, los datos medidos se comparan con los valores límite superiores e inferiores permitidos. Este es el tipo de prueba más simple y común. Un rango razonable para velocidades de viento promedio de 5 minutos es desde un mínimo de compensación del anemómetro hasta un máximo de 30 m/s. Cualquier valor que esté por debajo del desplazamiento del anemómetro debe marcarse como perdido o no válido; velocidades superiores a 30 m/s son posibles pero deben verificarse. Los límites de cada prueba de rango deben establecerse de modo que abarquen casi todo el rango de valores plausibles para el sitio. Además, los límites deben ajustarse estacionalmente, cuando corresponda. Por ejemplo, los límites de temperatura del aire y radiación solar deberían ser más bajos en invierno que en verano.
 - *Pruebas relacionales.* Estas pruebas se basan en relaciones entre varios parámetros medidos. Por ejemplo, las velocidades del viento registradas a la misma altura deberían ser similares (excepto cuando un anemómetro está en la sombra de la torre). Estas pruebas deben garantizar que se analicen las situaciones físicamente improbables. Las comparaciones entre sensores emparejados a la misma altura son especialmente valiosas.
 - *Pruebas de tendencia.* Estas verificaciones se basan en la tasa de cambio de un valor a lo largo del tiempo. Los umbrales realmente utilizados deben ajustarse según sea necesario para adaptarse a las condiciones del sitio. Tenga en cuenta que las tendencias de dirección del viento no se consideran porque la dirección puede cambiar abruptamente durante el clima severo o los eventos de paso frontal, entre otras condiciones.

Cada agente operador está en la obligación de comunicar al CND cuando se detecten problemas durante las rutinas de validación, alertando de posibles errores en los datos que fueron transmitidos y emprender acciones de corrección en intervalos de tiempo razonables. Las rutinas de validación aquí presentadas deben ser realizadas por lo menos cada 7 días.

8. Reporte de información meteorológica al CND

El reporte de variables meteorológicas se hará siguiendo los requisitos para supervisión definidos en la resolución CREG 060 de 2019 o aquellas que la modifiquen, pero con la periodicidad establecidas en el presente protocolo. Es decir, el reporte se podrá realizar "... por medio de unidades terminales remotas (RTU) o equivalente, de manera indirecta utilizando los protocolos de comunicación entre centros de control vigentes al momento de la integración o utilizando protocolos de comunicación sobre la red pública de datos internet que sean soportados por el centro de supervisión y control del CND, que hayan sido avalados previamente por el CND y que garanticen los criterios de seguridad y confiabilidad requeridos para la operación del sistema interconectado nacional".

A. Equipos

Las mediciones realizadas con instrumentos meteorológicos instalados en altas torres son la fundación de la evaluación de los recursos eólicos. Cada uno de estos instrumentos están diseñados para registrar un parámetro ambiental específico. De esta manera, es necesario garantizar la mayor calidad posible de los registros tomados por estas estaciones de monitoreo.

B. Velocidad del viento

La velocidad del viento es el indicador más importante del recurso eólico presente. Obtener lecturas precisas de la velocidad del viento de flujo libre (i.e. la velocidad no afectada por la torre, instrumentos y otros componentes del mástil) durante un periodo representativo de tiempo es, por lo tanto, la principal prioridad de cualquier monitoreo. Alcanzar este objetivo requiere especial atención en la selección de instrumentos y configuración de montaje. Múltiples anemómetros redundantes y alturas de medición son altamente recomendadas para maximizar tanto la recuperación de datos, como determinar de manera precisa la cizalladura del viento. Recomendaciones sobre el montaje de instrumentos y posibles configuraciones del mástil meteorológico se encuentran en el capítulo G.

Para realizar la medición de velocidad de viento horizontal se pueden utilizar tres tipos de anemómetros. De estos, el anemómetro de copa es el más popular debido a su bajo costo y buena precisión. Sin embargo, tanto anemómetros sónicos como de hélice son usados en algunas configuraciones.

- *Anemómetro de copa.* Este instrumento consiste de tres o cuatro copas conectadas a un eje vertical. El viento provoca que este montaje gire en una dirección preferida. Un transductor en el anemómetro convierte este movimiento rotacional en una señal eléctrica, la cual es enviada a un registrador de datos que aplica una conversión a velocidad de viento.
- *Anemómetro de hélice.* Este consiste en un anemómetro ubicado sobre un eje horizontal que lo mantiene apuntando en la dirección del viento gracias a una veleta. Al igual que el anemómetro de copa, el anemómetro de hélice genera una señal eléctrica cuya magnitud es proporcional a la velocidad del viento. Este tipo de anemómetro puede registrar velocidades de viento ligeramente menores bajo condiciones turbulentas.
- *Anemómetro sónico.* Este instrumento, el cual no cuenta con partes móviles, mide la dirección y velocidad del viento detectando variaciones en la velocidad de un ultrasonido transmitido entre dos puntos fijos. Algunos anemómetros sónicos miden la velocidad del viento en dos direcciones, mientras otros lo hacen en tres. Debido a la falta de inercia rotacional que otros anemómetros poseen, este instrumento es más sensible a cambios abruptos en la velocidad y fluctuaciones en la dirección del viento.

A la hora de escoger un instrumento, los siguientes factores deben ser considerados:

- *Durabilidad.* Dado que generalmente las campañas de monitoreo de recursos eólicos duran uno o dos años, este es el tiempo que se estima que un anemómetro sea capaz de sobrevivir y mantener su calibración. Sin embargo, para el monitoreo continuo de un parque eólico se recomienda que la selección de instrumentos asegure que los periodos de mantenimiento y recalibración reduzcan costos sin comprometer en ningún momento la resolución o calidad de las mediciones.
- *Condiciones de operación.* Las condiciones de operación son diferentes para cada tipo de anemómetro. Por esta razón es importante que la selección del instrumento sea acorde a las condiciones promedio a las que estará expuesto dicho instrumento. Cabe notar que las condiciones meteorológicas de Colombia son menos extremas a las que se deben cumplir en el estándar internacional, sin embargo, es importante que el rango de operación de sea mayor a las condiciones esperadas para la correcta adquisición de datos en casos atípicos. Los rangos propuestos se muestran en la tabla 6.
- *Umbral de inicio.* Debido a que bajas velocidades de viento no son de gran importancia en la generación de energía eólica, la mayoría de instrumentos en el mercado tienen umbrales aceptables para esta aplicación. Sin embargo, para la recopilación de datos en este tipo de aplicación se recomienda que se cumplan los requerimientos en la tabla 6.
- *Distancia constante.* Esta medición representa qué tanto le toma a un anemómetro para detectar un cambio abrupto en la velocidad de viento. Es definida como la distancia que debe atravesar un volumen cilíndrico de aire a través del anemómetro para que este detecte el 63 % del cambio de velocidad instantáneo. Anemómetros con una distancia constante relativamente larga suelen sobreestimar la velocidad promedio del viento en condiciones turbulentas, respecto a otros instrumentos.
- *Respuesta a viento vertical.* Dependiendo de la condición del terreno, la velocidad vertical puede convertirse en una variable de interés. Sin embargo, como las turbinas eólicas son únicamente sensibles a la velocidad horizontal del viento, la velocidad vertical debe ser idealmente ignorada. Diferentes anemómetros tienen características diferentes respecto a esta velocidad. Los más convenientes son los anemómetros sónicos y de hélice. Es importante seleccionar un anemómetro que no sea sensible a velocidades verticales o que puedan medirla para realizar correcciones respecto a la velocidad medida.

B.1. Medición de velocidad del viento a la altura del cubo

La velocidad del viento medida a la altura del cubo (Hub Height, HH) es la definición estándar para la velocidad del viento y deberá ser siempre utilizada. Existen dos opciones para la medición de velocidad del viento a la altura del cubo como se muestra a continuación:

- a) Donde un mástil meteorológico sea usado, la velocidad de velocidad del viento debe cumplir con los requerimientos expuestos en la sección I. La altura de instalación del anemómetro sobre el nivel del suelo deberá ser verificado por medio de medición; tanto

este como su incertidumbre estándar deben estar completamente documentadas. La incertidumbre estándar de la medición de la altura del sensor de velocidad sobre el nivel del suelo estimado debe ser igual o menor a 0.2 m. Los anemómetros de control deberán ser montados de acuerdo a la sección I.

- b) Un mástil meteorológico con una altura mayor a la altura del cubo de la turbina eólica puede ser usada para capturar de mejor manera la velocidad del viento a través del área del rotor. En este caso, la velocidad del viento a la altura del cubo debe ser medida con sensores montados lateralmente en postes laterales como se especifica en K.

C. Dirección de viento

Las mediciones de la dirección del viento son un elemento necesario para modelar de manera correcta la distribución espacial del recurso eólico. Una veleta de viento es usualmente utilizada para medir la dirección del viento; siempre y cuando no se utilicen anemómetros de hélice o sónicos, sin embargo, más de un instrumento para la medición de la dirección del viento es deseado con fines de redundancia. En el caso más familiar, una cola horizontal es conectada a un eje vertical que rota para alinearse con la dirección del viento. Para definir la dirección del viento con adecuada redundancia, se recomienda que las veletas sean instaladas en por lo menos dos niveles de monitoreo. Idealmente, no deben ser montados en el mismo poste lateral o incluso a las mismas alturas de los anemómetros, ya que podrían interferir con los datos obtenidos de velocidad de viento. Las veletas deben ser instaladas por lo menos 4 metros por debajo del anemómetro, cumpliendo con el requerimiento expuesto en L. Veletas con transductores potenciométricos generalmente no pueden cubrir 360° de dirección debido a la naturaleza con que realizan la medición. El espacio donde comienzan y terminan las mediciones de la veleta se denomina *banda muerta*. Esta zona debe orientarse a direcciones infrecuentes del viento, y se recomienda que enfrente directamente la torre. Adicional a esto, la banda muerta no puede superar los 8°. La resolución del instrumento debe ser mejor o igual a 1°.

D. Temperatura ambiente

La temperatura del aire es una característica importante que debe ser medida. Esta debe ser medida de 2 a 3 metros por encima del suelo o 1.5 metros por debajo del anemómetro principal, cumpliendo además los requerimientos de montaje de la configuración utilizada (capítulo G).

E. Humedad relativa

Dado que la cantidad de vapor de agua en el aire afecta su densidad, el uso de un sensor de humedad relativa puede mejorar la precisión de los estimativos de densidad. Sin embargo,

los efectos de la humedad son usualmente pequeños. Este instrumento debe cumplir con las condiciones expuestas en G.

F. Presión atmosférica

El conocimiento de tanto la temperatura del aire como la presión atmosférica permite mejorar la precisión de los estimados de densidad de aire. Sin embargo, la presión atmosférica es difícil de medir de manera precisa en ambientes ventosos debido a la presión dinámica inducida por el viento pasando a través del instrumento.

Especificación	Anemómetro (Velocidad de viento)	Veleta de viento (Dirección de viento)	Sensor de temperatura	Barómetro (Presión atmosférica)
Rango de medición	0-50 m/s	0° - 360° (banda muerta $\leq 8^\circ$)	-40° a 60°C	94-106 kPa
Umbral de inicio	≤ 1.0 m/s	≤ 1.0 m/s	N/A	N/A
Distancia constante	≤ 3.0 m	N/A	N/A	N/A
Rango de temperatura de funcionamiento, °C	-40 a 60	-40 a 60	-40 a 60	-40 a 60
Rango de humedad relativa de funcionamiento, %	0-100	0-100	0-100	0-100
Error sistemático	$\leq 1\%$ (en 1σ)	5° - 10°	$\leq 1^\circ\text{C}$	≤ 1 kPa
Resolución	≤ 0.1 m/s	$\leq 1^\circ$	$\leq 0.1^\circ\text{C}$	≤ 0.2 kPa
Tiempo de servicio, años	2	2-6	2-6	2

Tabla 6: Especificación de instrumentos de medición

G. Montaje de instrumentos en el mástil meteorológico

H. Generalidades

La disposición adecuada de los instrumentos en el mástil meteorológico es de vital importancia para el correcto reporte de las variables meteorológicas. La disposición de anemómetros en los mástiles debe incluir un anemómetro principal a la altura del centro del rotor de las turbinas, así como un anemómetro de control. El propósito de este último es proporcionar un medio de verificación de consistencia in situ del anemómetro principal. El anemómetro debe ser ubicado de tal manera que se minimice distorsión de flujo, especialmente la generada por el mástil y poste horizontal. Si se requiere la mínima distorsión de flujo para un amplio rango de direcciones de viento, un anemómetro individual dispuesto en la parte superior del mástil es recomendado. Sin embargo, una disposición lado a lado de dos anemómetros en la parte superior del mástil provee redundancia, además de un método robusto de comprobación de consistencia de anemómetros con un aumento marginal en la distorsión de flujo, siempre y cuando se logre una separación horizontal adecuada y una estructura de montaje estable. Cuando los anemómetros son montados en postes laterales a alturas por debajo de la parte superior del mástil meteorológico, la distorsión de flujo tanto del mástil como de los postes laterales debe ser tenida en cuenta. Independientemente del tipo de montaje utilizado, se debe tener cuidado al asegurar que la estructura de los postes laterales es lo suficientemente estable para evitar vibraciones significativas. Otros instrumentos requeridos en los mástiles

meteorológicos (como anemómetro de control, veletas de viento, sensores de presión y temperatura) deben ser ubicados de tal manera que eviten la interferencia con el anemómetro principal.

I. Anemómetro individual montado en la parte superior del mástil

Para lograr mediciones de velocidad del viento con una distorsión de flujo insignificante en un amplio rango de dirección del viento, un anemómetro montado en la parte superior del mástil es la configuración ideal.

El anemómetro se sostendrá de tal manera que las copas del anemómetro estén al menos a 1.5 metros por encima del mástil meteorológico y de cualquier otra fuente de perturbación del flujo, y de manera que ninguna parte de la estructura de soporte o mástil meteorológico se extienda fuera de un medio cono cuya generatriz tiene una pendiente de 11:1 y cuyo vértice es coincidente con las copas de anemómetro. El anemómetro deberá ser montado en un tubo vertical redondo del mismo diámetro exterior ($\pm 0.1\text{mm}$) que el tubo utilizado en calibración, pero no de mayor diámetro que el cuerpo del anemómetro. La longitud combinada del tubo y anemómetro (medido desde las copas del anemómetro) deberá ser de al menos 0.75 m. Además, el anemómetro deberá ser sostenido de manera estable, lo que probablemente hará necesario el montaje del tubo vertical que sostiene al anemómetro de manera concéntrica a otro tubo de mayor diámetro para proveer estabilidad estructural. Este tubo adicional no puede ser de mayor diámetro que el cuerpo del anemómetro por una altura de 1.5 metros por debajo de las copas del anemómetro. El soporte que conecta el anemómetro al tubo vertical debe ser compacto, liso y simétrico. Cuando el anemómetro es diseñado para tendido interno de cableado en el tubo de soporte, este debe realizarse por dentro del tubo vertical. Para otras configuraciones, el cable deberá ser enrollado por fuera del tubo vertical (aproximadamente 3 vueltas/m, o similar a cómo se realizó la calibración). El anemómetro deberá ser calibrado con los mismos accesorios y configuración de tendido de cable que será utilizado en el campo. La inclinación del anemómetro (y tubo de montaje) no debe ser superior a 2° . Se recomienda que esto sea verificado con medición. Ningún otro instrumento de medición debe ser posicionado a menos de 1.5 metros de las copas del anemómetro ni fuera del medio cono 11:1 por una distancia menor a 4 metros por debajo de las copas del anemómetro. En este caso, el anemómetro de control para el anemómetro montado en la parte superior del mástil meteorológico deberá ser un anemómetro ubicado lateralmente al menos a 4 metros y no más de 6 metros por debajo del anemómetro principal y que satisfaga los requerimientos para anemómetros montados lateralmente en la sección K. La figura 3 muestra un ejemplo de esta configuración.

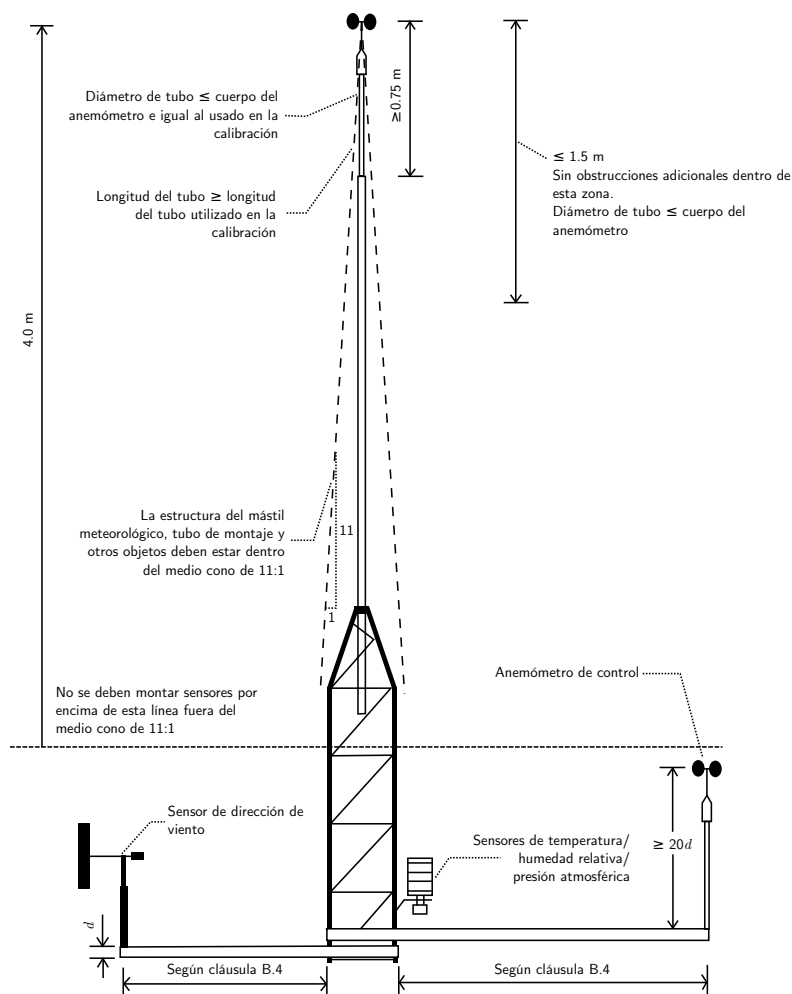


Figura 3: Ejemplo de anemómetro ubicado en la parte superior del mástil meteorológico y requerimientos de montaje. Adaptado de [1].

J. Anemómetros montados lado a lado en la parte superior del mástil

Para la configuración de anemómetros montados lado a lado en la parte superior del mástil meteorológico, todas las condiciones expuestas en la sección I en adición a las expuestas aquí. Las copas de los anemómetros deben estar ubicados por encima del poste lateral a una distancia mayor a 20 veces el diámetro del poste vertical, sin embargo, se recomienda una distancia mayor a 25 veces dicho diámetro. El poste vertical, junto con sus soportes verticales, deben ser de sección transversal redonda. La distancia de separación entre anemómetros no puede superar los 4.0 metros ni ser menor a 2.5 metros. Ninguna parte del mástil meteorológico se puede extender más allá de un medio cono cuya generatriz tiene una pendiente de

11:1 y su vértice coincide con el punto medio de los dos anemómetros montados lado a lado. El poste vertical está excluido de este requerimiento. Ningún otro instrumento de medición debe ser posicionado a menos de 1.5 metros de las copas del anemómetro ni fuera del medio cono 11:1 por una distancia menor a 4 metros por debajo de las copas de los anemómetros. La figura 4 muestra un ejemplo de la configuración de montaje lado a lado. Se recomienda que el poste lateral sea montado de manera concéntrica con el eje del mástil meteorológico o de manera central respecto al lado con mayor influencia del viento.

K. Instrumentos montados lateralmente

K.1. Generalidades

Los instrumentos montados de manera lateral tales como anemómetros y sensores de dirección de viento son influenciados por la distorsión de flujo causada por el mástil meteorológico, postes laterales y cables de alambre. La influencia de un poste lateral tubular redondo es 0.5 % a una distancia de separación de 20 diámetros de poste lateral sobre el poste. Distorsión de flujo en la ubicación de las copas de un anemómetro debido a postes laterales debe ser mantenida por debajo de 0.5 %. El anemómetro deberá ser montado en un tubo vertical redondo del mismo diámetro exterior ($\pm 0.1\text{mm}$) que el tubo utilizado en calibración, pero no de mayor diámetro que el cuerpo del anemómetro. Los sensores de dirección de viento deben ser montados a una distancia del mástil meteorológico no menor a la mitad de la distancia recomendada para los anemómetros. Debe existir por lo menos 20 diámetros del poste lateral de separación entre los instrumentos montados lateralmente y los postes laterales ubicados encima de estos. Este requerimiento de separación aplica cuando dos anemómetros montados lateralmente son usados a diferentes alturas, teniendo uno de estos como anemómetro de control, o para mediciones de cizalladura de viento. En el caso de usar un anemómetro montado lateralmente como anemómetro de control de otro anemómetro montado de esta manera, la separación vertical del instrumento principal debe estar en el rango de 4 a 6 metros, donde los postes laterales están del mismo lado del mástil y apuntan en la misma dirección. De manera alternativa, el poste lateral del anemómetro de control puede ser instalado a la misma altura que el poste lateral del anemómetro principal pero apuntando en otra dirección, de tal manera que los requerimientos de distorsión de flujo en ambas ubicaciones de los anemómetros se satisfagan.

Un anemómetro operando en la estela del mástil meteorológico es altamente perturbado. Mediciones obtenidas en esta condición no deben ser usado para el análisis de desempeño de las turbinas. La distorsión del flujo aguas arriba del mástil meteorológico puede ser significativa. Una separación adecuada entre el mástil meteorológico y el anemómetro debe ser alcanzada de tal manera que la distorsión de flujo sea menor a 1 %. Recomendaciones para la separación apropiada del mástil meteorológico y el anemómetro son dadas en K.2 y K.3.

La estela de los cables de alambre del mástil meteorológico pueden tener una fuerte in-

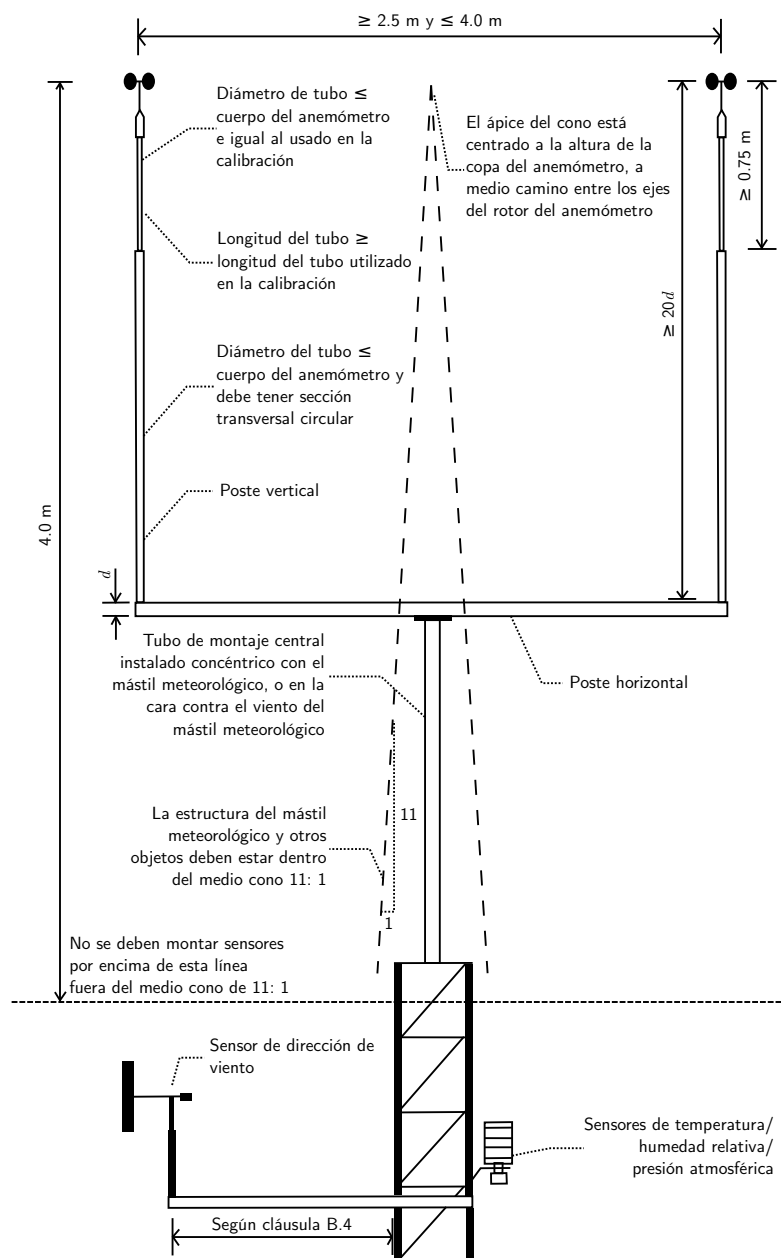


Figura 4: Ejemplo de anemómetros ubicados lado a lado en la parte superior del mástil meteorológico y requerimientos de montaje. Adaptado de [1].

fluencia en los anemómetros sobre distancias sorpresivamente amplias. Se debe evitar ubicar anemómetros aguas abajo de los cables de alambre de los mástiles meteorológicos.

Depende en gran medida del usuario determinar qué grado de perturbación, y por ende de incertidumbre, es aceptable. Sin embargo, un objetivo adecuado debería ser evitar pertur-

baciones de flujo debido al mástil meteorológico y postes laterales mayores a 1 % y 0.5 %, respectivamente. De esta manera, el requerimiento mínimo de separación corresponde a 20 diámetros de poste lateral sobre el poste.

Los mástiles meteorológicos pueden ser de construcción tanto cilíndrica tubular como reticulado. La separación requerida entre el anemómetro y el mástil meteorológico depende del tipo de mástil y solidez.

K.2. Mástiles meteorológicos tubulares

Una aproximación de la perturbación de flujo en la vecindad de un mástil meteorológico tubular se puede observar en la figura 5. Esta figura, tomada de [1], muestra isolíneas de velocidad del flujo alrededor de un mástil meteorológico luego de un análisis de Navier-Stokes. Se puede observar que la menor alteración ocurre enfrentando al viento a 45° . De manera más general, se puede observar que existe un retraso del flujo aguas arriba del mástil, aceleración alrededor de este, y una estela detrás. Dado la complejidad del flujo en la región influenciada por la estela del mástil, esta figura es considerada precisa únicamente para la zona aguas arriba del mástil.

Es evidente de la figura 5 que para un anemómetro ubicado dentro del sector de $\pm 45^\circ$ relativo a la dirección del viento en la zona aguas arriba del mástil meteorológico, la mayor perturbación del flujo relativo a la velocidad de campo libre ocurrirá cuando el anemómetro se encuentre directamente aguas arriba del mástil meteorológico.

La figura 6 muestra la velocidad relativa del viento como función de la distancia aguas arriba del mástil meteorológico. Una velocidad relativa de viento de 99.5 % se observa que ocurre en $R_d/d = 8.2$. El valor correspondiente para una velocidad relativa de 99 % es de 6.1. De esta manera, las distancias radiales para cumplir los requerimientos de distorsión de flujo menor a 1 % deben cumplir la relación con el diámetro del mástil tubular de 6.1. Cualquier relación que sea mejor también puede ser utilizada.

K.3. Mástiles meteorológicos reticulados

El análisis del flujo alrededor de una estructura reticulada puede ser basada sobre una combinación de un disco actuador (o teoría de cantidad de movimiento) y un análisis de la teoría de Navier-Stokes. El grado con el cual el flujo es perturbado por el mástil meteorológico es una función de la solidez del mástil meteorológico, el arrastre de cada miembro individual de la estructura, la orientación del viento y la separación del punto de medición al mástil meteorológico. En la figura 7 se observa las dimensiones de interés en una vista superior de un mástil meteorológico triangular, donde se muestra el déficit de velocidad de viento en la

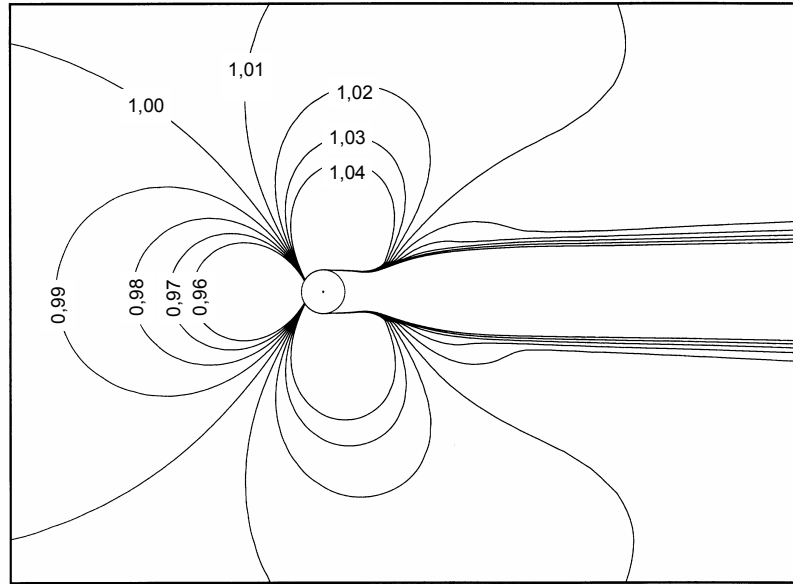


Figura 5: Isolneas de velocidad de flujo local alrededor de un mástil meteorológico tubular cilíndrico. Normalizado por la velocidad de flujo de campo libre. Tomado de [1].

línea central del mástil, el disco actuador con distancia entre patas L_m y una distancia radial R_d desde el centro del mástil hasta el punto de observación.

La perturbación de flujo es función del coeficiente de empuje asumido, C_m , proveniente de la teoría de disco actuador, el cual depende de la solidez del mástil meteorológico y el arrastre de cada miembro individual del mismo. C_m puede ser considerado como la fuerza de arrastre total por unidad de longitud de mástil, dividido por la presión dinámica y la distancia entre patas L_m .

La figura 8 muestra el flujo calculado alrededor de un mástil meteorológico reticulado con un C_T de 0.5. A una distancia dos veces mayor a la distancia entre patas del mástil meteorológico, el flujo se ve muy poco afectado por la orientación del mástil meteorológico (si una cara o una esquina de la torre está orientada hacia el viento), y se puede asumir que es igual. Sin embargo, la figura 8 se considera correcta únicamente para la zona aguas arriba del mástil meteorológico.

Cuando la dirección del flujo es perpendicular a la cara del mástil meteorológico, se obtiene la menor perturbación cuando el anemómetro es ubicado a un ángulo de 90° de la dirección del viento. Por otra parte, la perturbación de flujo puede ser determinada considerando el déficit aguas arriba como función de la distancia. La figura 9 muestra las velocidades de viento calculadas en la línea central relativas para torres reticuladas para varios valores de C_T . Los valores mostrados en la gráfica 9 dejan de ser válidos si el viento se aproxima desde ángulos mayores a 100° desde la alineación del poste lateral del anemómetro.

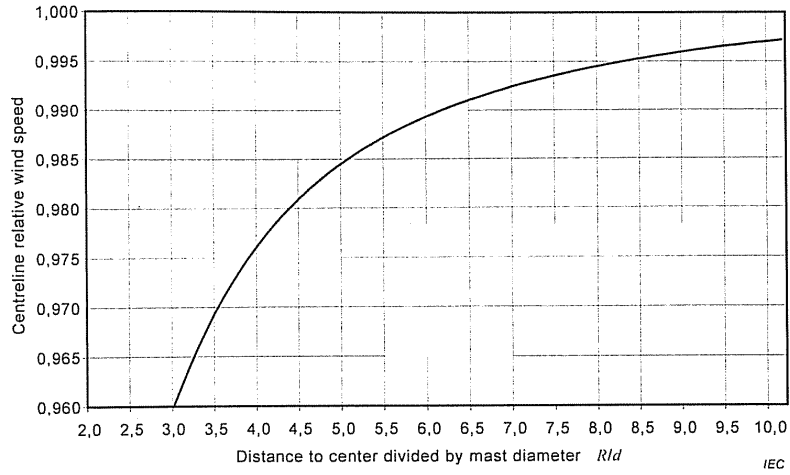


Figura 6: Velocidad relativa del viento en la línea central en función de la distancia R_d desde el centro de un mástil meteorológico tubular y el diámetro del mástil meteorológico d . Tomado de [1].

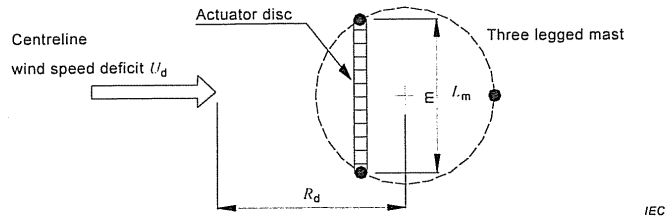


Figura 7: Representación de un mástil meteorológico reticulado de tres patas. Tomado de [1].

C_T puede ser estimado, dentro de los rangos especificados, de la tabla 7. En esta tabla, la solidez S se define como la razón entre el área proyectada lateralmente de todos los miembros estructurales del mástil meteorológico y el área total expuesta.

La ecuación para el cálculo de la distancia de observación R_d dado un déficit de velocidad es la siguiente:

$$R_d = \frac{L_m}{\frac{1-U_d}{0.062C_T^2 + 0.076C_T} + 0.082}. \quad (1)$$

Para encontrar la distancia radial R_d , C_T debe estar correctamente calculado para el tipo de mástil utilizado y U_d debe tomar el valor de 0.99. Por ejemplo, para un mástil meteorológico con un C_T de 0.5, debe tener un R_d igual a 3.7 veces la distancia entre patas del mástil.

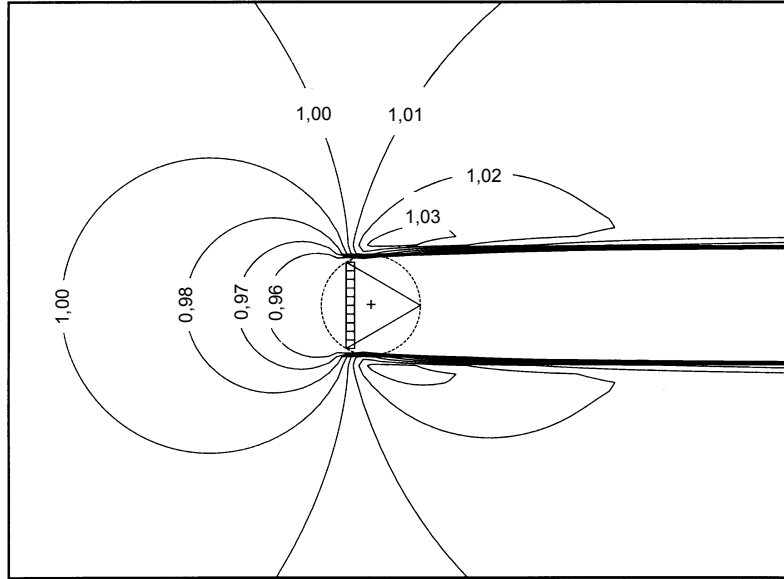


Figura 8: Isolíneas de velocidad de flujo local alrededor de un mástil meteorológico reticulado triangular con C_T de 0.5. Normalizado por la velocidad de flujo de campo libre. Tomado de [1].

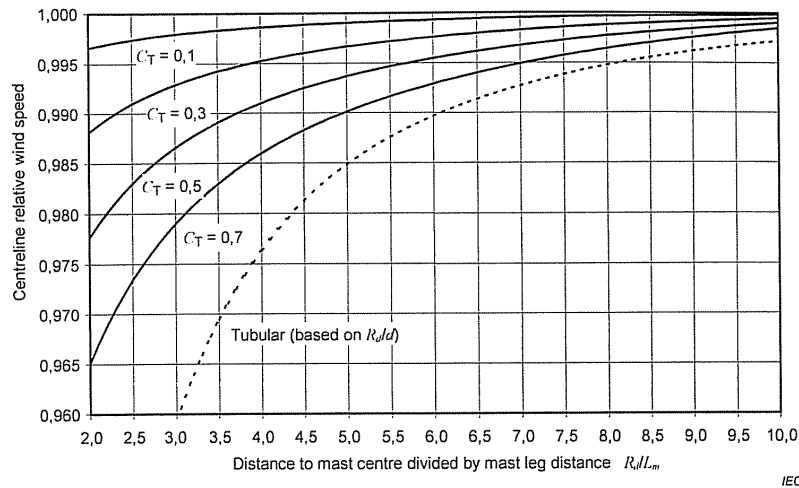


Figura 9: Velocidad relativa del viento en la línea central en función de la distancia R_d desde el centro de un mástil meteorológico reticulado con distancia entre patas L_m para varios valores de C_T . Tomado de [1].

En caso de no conocer la solidez de la torre, se debe utilizar la misma configuración de ángulos para el mástil reticulado y como mínimo una distancia radial igual a la de un mástil tubular; esta sería 6.1 veces la distancia entre patas del mástil. Esto implica un sobre-dimensionamiento del tamaño de los postes laterales que deben ser instalados sobre la torre.

Tipo de mástil	Sección planar	Expresión para C_T	Rango válido
Sección cuadrada, miembros con bordes afilados		$4.4(1 - S)S$	$0.1 < S < 0.5$
Sección cuadrada, miembros con bordes tubulares		$2.6(1 - S)S$	$0.1 < S < 0.3$
Sección triangular, miembros tubulares		$2.1(1 - S)S$	$0.1 < S < 0.3$

Tabla 7: Método de estimación de C_T para varios tipos de mástiles reticulados

Se recomienda realizar el cálculo de solidez para no utilizar el caso de mástil tubular.

L. Montaje de otros instrumentos meteorológicos

El anemómetro de control debe estar ubicado tan cerca al anemómetro principal como sea posible, mientras se mantienen los requerimientos mínimos de separación descritos en I y K, a fin de proveer una buena correlación entre los dos instrumentos. El anemómetro de control debe no interferir con el correcto funcionamiento del anemómetro principal.

El sensor de dirección de viento debe estar montado de 4 a 10 metros por debajo del anemómetro principal. Este debe estar montado de tal manera que se minimicen los efectos de perturbación de flujo respecto al sector de medición. La separación horizontal entre el sensor de dirección de viento y el mástil meteorológico debe ser por lo menos la mitad de lo requerido para un anemómetro.

Excepto en el caso donde la altura de un mástil meteorológico sea menor a la altura del cubo, los sensores de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica deben estar ubicados a menos de 10 metros de la altura del cubo en el mástil meteorológico y mínimo 1.5 metros por debajo del anemómetro principal mientras se cumplen todos los requerimientos definidos en I y K. Los sensores de temperatura deben estar montados un escudo de radiación. El sensor de presión debe estar montado en una caja resistente a la intemperie. Sin embargo, se debe tener cuidado en asegurar que la caja está ventilada de manera apropiada de tal manera que las lecturas no están siendo afectadas por la distribución de presión alrededor de la caja.

Si la altura del mástil meteorológico disponible para la instalación de instrumentos de medición es menor a la altura de cubo, los sensores de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica deben estar ubicados entre 1.5 y 10 metros del anemómetro principal. La presión atmosférica debe ser ajustada a la altura de cubo siguiendo las el estándar IEC 61400-12-1:2017 [1]. Además, la temperatura del aire debe ser ajustada a la altura de cubo asumiendo que la atmósfera varía de acuerdo a ISO 2533:1975. De manera alterna, el sensor de temperatura puede ser instalado en la góndola de la turbina eólica. El sensor debe estar instalado por lo menos 1 metro por encima de la góndola y aguas arriba de cualquier sistema de ventilación existente. Ejemplos de configuraciones adecuadas se encuentran en las secciones I y

K.

M. Dispositivos de medición remotos

Los dispositivos de detección remota que asumen una uniformidad de flujo horizontal a través del volumen escaneado limitan la aplicación de estas tecnologías a condiciones de terreno no complejas. El dispositivo de detección remota se puede usar para medir la velocidad del viento en la altura del cubo, el perfil de cizalladura del viento, el viraje del viento y/o la velocidad del viento equivalente del rotor en base a mediciones a más de una altura. En cualquier caso, el dispositivo de detección remota debe compararse simultáneamente con un anemómetro montado en la parte superior en un mástil meteorológico a una altura no menor al mínimo de la altura de la punta más baja de la turbina eólica o 40 metros.

Referencias

- [1] IEC 61400-12-1:2017. “IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation systems – Power performance measurements of electricity producing wind turbines”. En: *International Standard* (2017).
- [2] Michael C. Brower. *Wind Resource Assessment*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., jun. de 2012. ISBN: 9781118249864. DOI: 10.1002/9781118249864. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118249864>.
- [3] MEASNET. *MEASNET Procedure: Evaluation of Site-Specific Wind Conditions - Version 2*. Inf. téc. 2016, págs. 1-53.