

Guía de Requerimientos Mínimos para la Medición, Buenas Prácticas y Verificación de Datos en Sitio de Velocidad y Dirección de viento, Temperatura Ambiente y Presión Atmosférica para Plantas Eólicas

Julio 11, 2023

Autores

María Alejandra Vargas Torres.

Camilo Andrés Sedano Quiroz, M.Sc.

Nelson Andrés Salazar Peña, M.Sc.

Oscar David Salamanca Gómez, M.Sc.

Andrés Leonardo González Mancera, Ph.D.

Revisión Revisión	Fecha Fecha	Descripción Descripción
0	2023-06-09	
1	2023-07-11	Se revisó de acuerdo a los comentarios públicos y acuerdos al interior del grupo de trabajo.

Índice

1. Objetivo.....	3
2. Ámbito De Aplicación	3
3. Definiciones.....	3
“Sitio de la Planta”	3
“Área del Proyecto”	3
4. Requerimientos mínimos para la medición, buenas prácticas y verificación de datos en sitio	3
4.1. Etapa 1 – Selección de Zona de Instalación	5
4.2. Etapa 2 – Selección de Instrumentos de Medición.....	8
4.2.1. Sub-Etapa 2.1: Medición de Velocidad Horizontal (Anemometría)	8
4.2.2. Sub-Etapa 2.2: Medición de Dirección de Viento (Veleta)	10
4.2.3. Sub-Etapa 2.3: Medición de Temperatura	11
4.2.4. Sub-Etapa 2.4: Medición de Presión Atmosférica y Humedad	12
4.3. Etapa 3 – Instalación de Torres e Instrumentos.....	13
4.4. Etapa 4 – Calibración y Verificación.....	16
4.5. Etapa 5 – Preprocesamiento de Datos Inválidos y Ausentes.....	18
4.6. Etapa 6 – Operación y Mantenimiento.....	19
5. Medición con Dispositivos Remotos (LIDAR o SODAR)	22
6. Bibliografía	24

1. Objetivo

Establecer los requerimientos mínimos para la medición, buenas prácticas y verificación de datos en sitio de velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente y presión atmosférica para la construcción de las series históricas utilizadas en la aplicación de la metodología de cálculo de la ENFICC.

2. Ámbito De Aplicación

Esta guía aplica a todas las plantas de generación eólica que participaron o pretenden participar en algún mecanismo de asignación de obligaciones del cargo por confiabilidad de que trata la Resolución CREG 071 de 2006 (o aquellas que la modifiquen, adicionen o sustituyan).

3. Definiciones

“Sitio de la Planta”

Se entiende como “*sitio de la planta*”, el círculo centrado en el polígono cubierto por las unidades de generación con radio igual al *radio de representatividad* definido según se indica en la Tarea 3 de la Etapa 1 – Selección de Zona de Instalación en la Sección 4.1 de este documento.

“Área del Proyecto”

Se entiende como “área del proyecto” el área cubierta por el círculo de hasta 30 km de radio, centrado en el polígono cubierto por las unidades de generación.

4. Requerimientos mínimos para la medición, buenas prácticas y verificación de datos en sitio

Según la resolución 101 006 de 2023 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual determina la metodología para el cálculo de energía firme de plantas eólicas, se exige el suministro de información de largo plazo (10 años o superior), para el cual debe existir por lo menos un (1) año de mediciones in situ [1].

Se estima que errores de exactitud del $\pm 5\%$ en mediciones de velocidad de viento pueden llevar a imprecisiones del $\pm 10\%$ en la energía producida por las plantas eólicas [2], lo cual afecta fuertemente las estimaciones de la ENFICC y tiene repercusiones directas en la confiabilidad del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Por lo tanto, es importante hacer énfasis en la calidad de la información recopilada y en los estándares

que deben cumplir las campañas de medición en términos de calibración, 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 viento, entre las que destacan y se usan principalmente en la industria:

- La **Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación** (Edición de 2021) de la Organización Meteorológica Mundial (WMO [3]), cuya descripción de instrumentos y sistemas de medición más usados lo convierte en el recurso principal para la correcta selección, calibración, instalación y operación de instrumentos meteorológicos apropiados.
- El **estándar 61400-50 de 2022** de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) es uno de los referentes más utilizados en la industria eólica para la medición de velocidad de viento. Este estándar describe, entre otras cosas, la calidad de los sensores en términos de precisión y confiabilidad y define un conjunto de criterios con respecto a la cantidad y calidad de los datos [4].
- La **Guía para la Evaluación de Condiciones Específicas de Viento en Sitio** de la Red de Medición de Institutos de Energía Eólica (MEASNET) versión 3 de 2022 describe el proceso de evaluación de una ubicación, incluida la recopilación, evaluación e interpretación de datos meteorológicos [5].
- El documento **Manual de Evaluación de Recurso Eólico** reúne las guías de buenas prácticas aceptadas en la industria para la planeación y ejecución de campañas de medición [6]. Este es un reporte desarrollado por AWS Truepower como actualización del *Manual de Evaluación de Recurso Eólico: Fundamentos para Dirigir un Programa de Monitorización Exitoso del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL)* [6].

En particular, se debe tener en cuenta que los datos de velocidad de viento, dirección de viento, temperatura ambiente y presión atmosférica, se deben presentar en resolución diezminutal. Para la generación de los datos en la resolución especificada anteriormente, se deben construir las series calculando el promedio simple de los datos obtenidos en un periodo de 10 minutos, a excepción de la dirección del viento cuyo promedio debe ser vectorial, tomando los datos con una frecuencia de muestreo de 1 Hz o superior [4].

Esta guía plantea los requerimientos mínimos para realizar una campaña de medición de viento (velocidad horizontal, dirección, temperatura y presión atmosférica)¹.

¹ El sustento de los siguientes lineamientos puede ser revisado en las secciones 2 a 7 del Anexo 1 del protocolo correspondiente a la resolución 167 de 2017 [14]. Cabe resaltar que algunas de las normas referenciadas en dicho protocolo, han sido actualizadas.

4.1. Etapa 1 – Selección de Zona de Instalación

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades
1	Definir la clase de rugosidad de las zonas presentes en el área del proyecto.	Determinar la rugosidad aerodinámica en función de la rugosidad de las zonas características visuales del terreno (orografía, vegetación, presentes en el área del obstáculo) siguiendo las clasificaciones presentadas en la Tabla 1.
2	Definir la clase del sitio para diferentes sectores del área del proyecto.	Usar la información de la Tabla 2 en conjunción a lo establecido en el estándar ISO 19289:2014 para definir la clase del sitio y seleccionar la mejor zona de instalación de las torres. Se recomienda que el sitio donde se instale la torre se clasifique como Clase 2 (ver tabla 1) como mínimo, cuyos requerimientos relacionados a los obstáculos presentes se especifican en la Tabla 2 y la Figura 1.
3	Establecer el radio de representatividad de las potenciales ubicaciones de las torres	Analizar características del terreno (orografía, elevación, vegetación, obstáculos) del área del proyecto para establecer su complejidad. Definir el radio de representatividad según complejidad del terreno. El radio máximo permitido en terreno plano y homogéneo es de 10 km. Para terrenos más complejos, la campaña puede seguir guías de buenas prácticas como la disponible en MEASNET [5]: Para terrenos complejos presentan radios máximos recomendados de 2 km.
4	Definir el número de torres meteorológicas.	Usar los resultados de las tareas 1 a 3 para la identificación de sitios potenciales y definir el número necesario según el número de turbinas a instalar y el área del proyecto.
5	Definir la altura de las torres meteorológicas.	Dependiendo del uso o no de sistemas de medición remota se tienen los siguientes escenarios para definir la altura de la torre meteorológica: Si la campaña de viento sólo utilizará mediciones con torres meteorológicas, es de obligatorio cumplimiento que la altura corresponda por lo menos a 2/3 de la altura del cubo de las turbinas.

		Si la campaña combina mediciones de torres meteorológicas con sistemas de medición remota y el uso de estas es válida para el tipo del terreno del proyecto, la altura mínima de la torre debe ser de 40 metros. En este caso, instalar una torre de $\frac{2}{3}$ de la altura del cubo (mientras la altura resultante sea superior a 40 metros) es altamente recomendable pero su cumplimiento estricto no es obligatorio. Para revisar requerimientos adicionales de tecnologías Sodar o Lidar, referirse a la sección 5 del presente documento.
--	--	---

Tabla 7. Clasificación del terreno en términos de la rugosidad aerodinámica (z_0) desarrollada y actualizada por Davenport et al [7]. Aquí x hace referencia a la distancia de un obstáculo con el sitio de evaluación y H es la altura del obstáculo.

Clase de rugosidad	Breve Descripción del Terreno	z_0 [m]
1	Mar o lago abierto, planicies cubiertas de nieve, desierto sin obstáculos, desierto sin rasgos distintivos, superficies de asfalto y concreto con camino libre de al menos 5 km	0.0002
2	Terrenos sin rasgos distintivos ni obstáculos notables y con vegetación rechazable; playas, pantanos, regiones cubiertas de nieve y cultivos en barbecho	0.005
3	Terreno plano abierto; césped y pocos obstáculos aislados. Aplicable en tierras de pastoreo sin cortinas rompe-viento, campos de brezos, páramos, tundra, pistas de aeropuerto. $x/H > 50$	0.03
4	Cultivos bajos; obstáculos grandes ocasionales, $x/H > 20$	0.10
5	Cultivos altos; obstáculos dispersos a distancias relativas de $15 < x/H < 20$ para objetos porosos (cortinas rompe-viento) y $8 < x/H < 12$ para objetos sólidos (edificios bajos)	0.25
6	Grupos de árboles dispersos, arbustos y paisajes intensamente cultivados; numerosos obstáculos, x/H 7 10. Incluye áreas moderadamente cubiertas por edificios bajos con separaciones de $3 < x/H < 7$	0.5

7	Cubrimiento regular de grandes obstáculos en áreas como suburbios, bosques y áreas construidas densas con poca variación de altura.	1.0
8	Centro de ciudad con edificios de baja y gran altura, o bosques grandes con terreno irregular y claros numerosos y dispersos	≥ 2

The figure contains three diagrams labeled a), b), and c).
 Diagram a) shows a vertical tower on the left and a rectangular obstacle on the right. A dashed line from the top of the tower to the top of the obstacle forms an angle β with the horizontal. The height of the obstacle is labeled H .
 Diagram b) shows a similar setup but with a 3D rectangular obstacle. The angle ϕ is shown between the horizontal and the line of sight from the tower to the top edge of the obstacle.
 Diagram c) shows a thin rectangular obstacle. The width of the obstacle is labeled w .

Figura 1. Definición de variables para la clasificación de reglas de medición de viento: a) Ángulo de sitio y altura del obstáculo, b) ancho angular efectivo y c) ancho de obstáculo delgado. Adaptada de [3].

Tabla 2. Requerimientos de la zona de instalación según la Clase del sitio para la medición de velocidades de viento según el estándar ISO 19289:2014 elaborado por [3].

Clase del sitio	Breve Descripción de la Clase	Restricciones y Consideraciones
1	Condición de medición ideal y con el nivel de incertidumbre reducido y controlado	- La torre debe ser ubicada a una distancia igual o superior a $30H$ de los obstáculos circundantes, lo que equivale a $\beta \leq 1.9^\circ$. Se considera un obstáculo ancho si $\phi \geq 10^\circ$. - La torre debe ubicarse a una distancia de por lo menos $15w$ de cualquier obstáculo delgado. - Obstáculos simples más pequeños de 4 m pueden ser ignorados. - La clase de rugosidad de ser menor o igual a 4.
2	Presenta una incertidumbre adicional estimada del 30% con posibilidad de corrección.	- La torre debe ser ubicada a una distancia igual o superior a $10H$ de los obstáculos circundantes, lo que equivale a $\beta \leq 5.7^\circ$. Se considera un obstáculo ancho si $\phi \geq 10^\circ$. - La clase de rugosidad de ser menor o igual a 5. - Demás características son iguales a la Clase 1.
3	Presenta una incertidumbre adicional estimada del 50% con	La torre debe ser ubicada a una distancia igual o superior a $5H$ de los obstáculos circundantes, lo que equivale a $\beta \leq 11.3^\circ$. Se considera un obstáculo ancho si $\phi \geq 10^\circ$.

	posibilidad de corrección.	- La torre debe ubicarse a una distancia de por lo menos 10 w de cualquier obstáculo delgado. - Obstáculos simples más pequeños de 5 m pueden ser ignorados si la medición se realiza por encima de 8m. - La clase de rugosidad de ser menor o igual a 5.
4	Presenta una incertidumbre adicional estimada más grande del 50%	- La torre debe ser ubicada a una distancia igual o superior a $2.5H$ de los obstáculos circundantes, lo que equivale a $\beta \leq 21.8^\circ$. - Ningún obstáculo con un $\phi \geq 60^\circ$ y una altura mayor a 10 m debe estar ubicado dentro de un radio de 40 m. - Obstáculos simples más pequeños de 6 m pueden ser ignorados si la medición se realiza por encima de 10 m. - La clase de rugosidad de ser menor o igual a 5.
5	El nivel de incertidumbre es muy alto y difícil de estimar.	El sitio no sigue los requerimientos de la Clase 4.

4.2. Etapa 2 – Selección de Instrumentos de Medición

4.2.1. Sub-Etapa 2.1: Medición de Velocidad Horizontal (Anemometría)

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades
1	Determinar el número de anemómetros	Definir el número requerido a partir del número de torres, redundancia y alturas de medición de cada torre. Requerimientos mínimos [8]: - Si la torre tiene menos de 40 metros de altura: se requieren 2 (dos) alturas de medición y 1 (un) anemómetro por nivel. - Si la torre tiene igual o más de 40 metros de altura: se requieren 3 (tres) alturas de medición y 1 (un) anemómetro por nivel. Si el terreno es altamente complejo (ver Tabla 1), se exige un anemómetro redundante en la altura superior. En todos los casos es recomendada, pero no de obligatorio cumplimiento, la

		redundancia de anemómetros en cada nivel. ▪ En cualquier caso, el anemómetro principal debe estar ubicado por lo menos a 2/3 de la altura de buje existente o planeado [4]. ▪ Se debe colocar un anemómetro secundario, a una distancia mínima de 20 m del principal. Esto se hace con el fin de tener redundancia en las mediciones y poder evaluar el cortante de viento [5]. ▪ Cabe resaltar que los datos obtenidos con el sensor secundario se pueden utilizar para el llenado de datos faltantes del sensor principal, los datos llenados de tal manera no constituyen datos faltantes de la serie. La distinción de datos faltantes se puede encontrar en la Sección 4.5 del presente documento.
2	Determinar el tipo de anemómetro.	Especificar si los anemómetros utilizados serán de cazoletas y/o anemómetro. sónicos. Requerimientos mínimos: Cada altura de medición debe tener por lo menos un anemómetro de cazoletas. [8]
3	Selección del modelo de anemómetro.	Escoger el modelo apropiado según los requerimientos establecidos en la Tabla 3 y asegurándose que el nivel de incertidumbre sea por lo menos de Clase 1.7. [3]
4	Confirmar cumplimiento de normas aplicables de los instrumentos con el fabricante.	Solicitar información de cumplimiento de normas de calibración internacionales, tales como normas IEC, ISO, ASTM, entre otros. De esta manera se pretende cumplir con el estándar de trazabilidad ISO 17025 [3]
5	Evaluar el uso de sistemas de medición remota.	De acuerdo con la MEASNET [5], los dispositivos de medición remota (RSD por sus siglas en inglés), pueden reemplazar o complementar las mediciones realizadas con anemómetros. Las condiciones para esto se pueden consultar en la sección 5 del presente documento.

Tabla 3. Características técnicas exigidas para anemómetros según norma ISO 17713-1:2007 y la WMO [3] y NREL [6]. Los rangos de temperatura se adaptaron al caso colombiano, de acuerdo a [9] y [10].

Especificaciones	Anemómetro
Rango de Medición	0 a 75 m/s
Umbral de Inicio	≤ 1.0 m/s
Constantes de Distancia	2 a 5m
Rango de Temperatura Operacional	-10 a 50 °C
Rango de Humedad Operacional	0% a 100%
Resolución	≤ 0.5 m/s
Incertidumbre	0.5 m/s si ≤ 5 m/s 10% si > 5 m/s

4.2.2. Sub-Etapa 2.2: Medición de Dirección de Viento (Veleta)

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades
1	Determinar el número de instrumentos	Definir el número requerido a partir del número de torres y alturas de medición de cada torre. Requerimientos mínimos: Dos alturas de medición por torre. Por lo menos una de las alturas debe estar a la altura del área cubierta por el rotor de la turbina [5]. ▪ Cabe resaltar que los datos obtenidos con el sensor secundario se pueden utilizar para el llenado de datos faltantes del sensor principal, los datos llenados de tal manera no constituyen datos faltantes de la serie. La distinción de datos faltantes se puede encontrar en la Sección 4.5 del presente documento.
2	Selección del modelo de veleta.	Escoger el modelo apropiado según los requerimientos establecidos en la Tabla 4 y asegurándose que la región muerta tenga un valor máximo de 8° [6].
3	Confirmar cumplimiento de normas aplicables de los instrumentos con el fabricante.	Solicitar información de cumplimiento del estándar de calibración ASTM D5366-96:2017. Se recomienda revisar los estándares de protección de condiciones climáticas mencionados en la Sub-Etapa 2.1 si es el caso.

4 Evaluar el uso de sistemas de medición remota.

De acuerdo con la MEASNET [5], los dispositivos de medición remota (RSD por sus siglas en inglés), pueden reemplazar o complementar las mediciones realizadas con veletas de viento. Las condiciones para esto se pueden consultar en la sección 5 del presente documento.

Tabla 4. Características técnicas para veletas de viento acordes a la WMO [3] y NREL [6]. Los rangos de temperatura se adaptaron al caso colombiano, de acuerdo a [9] y [10].

Especificaciones	Veleta de Viento
Rango de Medición	0° a 360° (región muerta $\leq 8^\circ$)
Umbral de Inicio	≤ 1.0 m/s
Constantes de Respuesta	No Aplica
Rango de Temperatura Operacional	-10 a 50 °C
Rango de Humedad Operacional	0% a 100%
Resolución	$\leq 1^\circ$
Incertidumbre	$\leq 5^\circ$

4.2.3. Sub-Etapa 2.3: Medición de Temperatura

Tarea	Descripción	Recomendaciones y Actividades
1	Determinar el número de instrumentos.	Definir el número requerido de torres y alturas de medición de cada torre. En caso tal que se quiera realizar medición de temperatura se cuenta con las siguientes recomendaciones : Instalar el sensor en los 10 metros superiores de la torre (como mínimo un termómetro). Si se analiza estabilidad atmosférica, instalar otro termómetro a una altura diferente de la torre meteorológica. [5]
2	Determinar el tipo de sensor de temperatura.	Escoger el tipo de sensor: termómetros de resistencia de platino (PT100), termistores (mezclas de óxidos metálicos sinterizados) o termopares. Se sugieren los termómetros PT100 por su amplio uso en la industria eólica.
3	Selección del modelo del sensor de temperatura	Escoger el modelo apropiado según los requerimientos establecidos en la Tabla 5, asegurándose que el nivel de incertidumbre sea de Clase AA o B 1/3, según la normativa IEC 60751:2022 [11]

4	Confirmar cumplimiento de las normas aplicables de los instrumentos con el fabricante	Solicitar información de cumplimiento de normas internacionales, tales como normas IEC, ISO, ASTM, entre otros. De esta manera se pretende cumplir con el estándar de trazabilidad ISO 17025 [3] Se recomienda revisar los estándares de protección de condiciones climáticas mencionados en la Sub-Etapa 2.1 si es el caso.
---	---	--

Tabla 5. Características técnicas para termómetros acordes a la WMO [3]. Los rangos de temperatura se adaptaron al caso colombiano, de acuerdo a [9] y [10].

Especificaciones	Sensor de Temperatura
Rango de Medición	-10 a 50°C
Constantes de Respuesta	Constante de Tiempo ≤ 20 s
Rango de Temperatura Operacional	-10 a 50 °C
Rango de Humedad Operacional	0% a 100%
Resolución	≤ 0.1 °C
Incertidumbre	≤ 0.1 °C para $T < 40$ °C ≤ 0.3 °C para $T \geq 40$ °C

4.2.4. Sub-Etapa 2.4: Medición de Presión Atmosférica y Humedad

Tarea	Descripción	Recomendaciones y Actividades
1	Determinar el número de barómetros e higrómetros.	Definir el número requerido a partir del número de torres y alturas de medición de cada torre. En caso tal que se quiera realizar medición de presión y/o humedad, se cuenta con las siguientes recomendaciones : Instalar cada sensor en los 10 metros superiores a la torre (mínimo un barómetro y un higrómetro). [5]
2	Determinar el tipo de barómetro e higrómetro.	El barómetro escogido puede ser del tipo capacitivo o piezoeléctrico [3], mientras el higrómetro debe ser del tipo capacitivo .
3	Selección del modelo de los sensores.	Escoger el modelo apropiado según los requerimientos establecidos en la Tabla 6.
4	Confirmar cumplimiento de las normas aplicables de los instrumentos con el fabricante.	Solicitar información de cumplimiento de las guías de las buenas prácticas de la WMO, en específico la sección 3 para barómetros y la sección 4 para higrómetros [3]. Se recomienda

revisar los estándares de protección de condiciones climáticas mencionados en la Sub-Etapa 2.1 si es el caso.

Tabla 6. Características técnicas de barómetros e higrómetros acordes a la WMO [3]. Los rangos de temperatura se adaptaron al caso colombiano, de acuerdo a [9] y [10].

Especificaciones	Presión Barométrica	Humedad Relativa
Rango de Medición	500 a 1080 hPa	0 a 100%
Rango de Temperatura Operacional	-10 a 50 °C	-10 a 50 °C
Rango de Humedad Operacional	0% a 100%	0% a 100%
Resolución	0.1 hPa	1%
Incertidumbre	0.1 hPa	1%

4.3. Etapa 3 – Instalación de Torres e Instrumentos

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades
1	Selección de la Torre	Establecer si se usa torre tubular o de celosía. Si la torre tendrá una altura superior a 80 m, debe ser de celosía. Definir sistema de instalación de la torre (de levante, telescópicas o fijas). Si se utilizan torres preexistentes (por ej. torres de comunicaciones), tener en cuenta la influencia de los equipos previos en la instalación de los sensores. [6]

El anemómetro superior debe ser montado de acuerdo al estándar IEC-61400-50 [4].

Para instalación de soportes horizontales laterales [8]:

- | | | |
|---|-------------------------------------|--|
| 2 | Configuración y Montaje de Sensores | <ul style="list-style-type: none"> ✓ El nivel superior debe estar a por los menos 10 diámetros de la torre, debajo de la punta de esta. ✓ La distancia horizontal de los anemómetros respecto a la torre debe ser de por lo menos 3.75 anchos de una torre de celosía y 7 diámetros de una torre tubular, medida desde la cara más cercana. ✓ Debe asegurarse de que los soportes tengan la resistencia adecuada y soporten las oscilaciones generadas por vientos fuertes. ✓ En torres tubulares, localizar el par de soportes con un ángulo de 90° entre sí y cada uno a 45° hacia la dirección predominante del viento. Para torres de |
|---|-------------------------------------|--|

celosía triangulares, los soportes son montados en dos caras con una **separación de 180° entre ellos y cada uno a 90° hacia la dirección predominante del viento.**

Ubicación y montaje específico de sensores [8]:

- ✓ Se recomienda que las veletas estén orientadas **al menos 10°** lejos de cualquier cable de sujeción para evitar la interferencia con la rotación de la veleta.
- ✓ Se recomienda que los sensores sean desplazados hacia arriba una distancia de **entre 12 y 15 diámetros** del soporte (para secciones cuadradas, el diámetro equivale a la longitud del lado vertical).
- ✓ Es importante conocer el norte (geográfico) de referencia para la dirección de las veletas y la orientación de la región muerta, la cual debe ser documentada e ingresada en el sistema de registro de datos.
- ✓ Se recomienda que el sensor de temperatura esté protegido y ubicado sobre un soporte horizontal a una distancia respecto a la cara de la torre de un diámetro de torre. Debe estar bien expuesto a los vientos predominantes para asegurar una adecuada ventilación, así como ubicado en el lado norte de la torre para limitar el calentamiento debida a la luz solar directa y la radiación térmica de la superficie de la torre. Cuando se establece un par de sensores deben orientarse de la misma manera a diferentes alturas para asegurar que estén expuestos a condiciones similares.

3	Selección del Sistema de Registro de Datos	Los requerimientos mínimos a cumplir para la selección incluyen [8]: ✓ El sistema debe ser capaz de almacenar los valores de los datos en de un formato secuencial con los registros correspondientes de fecha y hora, así como tener conectado un reloj a tiempo real con reserva de baterías. ✓ Tener una capacidad de almacenamiento suficiente. ✓ Debe ser capaz de operar en los mismos extremos ambientales especificados para los sensores, lo cual
---	--	--

		incluye los rangos operacionales de temperatura y humedad. Se sugiere tener en cuenta condiciones climáticas adversas de zonas costeras y fuera de costa como daños físicos y corrosión. ✓ La batería debe ofrecer suficiente potencia para el funcionamiento del sistema, el cual puede estar complementado con el uso de fuentes como paneles solares. ✓ Se debe verificar con el fabricante que el sistema de registro sea compatible con el número y tipos de sensores montados en la torre. ✓ El sistema de adquisición debe estar configurado para almacenar información como mínimo cada diez (10) minutos. La información registrada debe incluir datos estadísticos típicos como la media, desviación estándar y en algunos casos máximos y mínimos. Definir si el sistema de transmisión de datos es remota o manual. La selección de uno u otro método de recolección es libre mientras se garantice la cantidad mínima de datos exigidos para el cálculo de la energía en firme. Establecer el acceso y fortaleza de la señal de medios de comunicación, así como disponer de diversas opciones de recolección de datos remota. Escoger los dispositivos de almacenamiento apropiados para los anteriores requerimientos. Determinar el norte magnético y el norte verdadero del sitio. Realizar Torre. la verificación de los siguientes requerimientos mínimos para la preparación del terreno y el levantamiento de la torre [8]:
4	Montaje de la Torre	✓ Revisar el desempeño del sistema de registro de datos mediante las guías del fabricante. ✓ Establecer métodos de anclaje y adherirse a las normas y protocolos de seguridad relacionados. ✓ Inspeccionar el estado de anemómetros y veletas, lo que incluye la revisión de los certificados de calibración. Se recomienda que los sensores de temperatura sean sometidos a una prueba de calibración previa. Si se utilizan sistemas de medición remota, se deben

- realizar pruebas de funcionamiento en sitio varios días antes de su puesta en marcha.
- ✓ Probar el desempeño de la fuente de alimentación de potencia. Revisar las herramientas, mecanismos y dispositivos de montaje.
 - ✓ Desarrollar una lista de procedimientos de la preparación del equipo en campo, seleccionar el personal de instalación calificado y experimentado en este tipo de montajes, así como recopilar y cumplir todos los protocolos de seguridad aplicables a trabajos en altura, riesgo eléctrico, restricciones aeronáuticas, entre otros

5	Montaje de Sistema de Datos, Cableado y Protección contra Rayos	Los sistemas de registro de datos deben ser alojados junto con sus conexiones y cables, equipo de telecomunicaciones y otros componentes sensibles en un recinto seguro y resistente al clima. Todo el cableado que entra al equipamiento debe tener líneas de goteo para evitar que el agua de lluvia fluya hacia las conexiones del terminal. Si se utiliza un panel solar para el suministro de energía, debe ser ubicado sobre el recinto del sistema de registro de datos. Respecto a las configuraciones del cableado de los sensores y el sistema de registro de datos, las instrucciones del fabricante deben ser seguidas como primera medida. Establecer medidas de protección eléctrica, protección contra rayos y condiciones climáticas como sea requerido.
---	---	--

4.4. Etapa 4 – Calibración y Verificación

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades
1	Verificación de funcionamiento de la campaña.	Se requiere realizar una inspección por lo menos una vez cada año o funcionamiento cada seis meses según lo amerite la intensidad de las condiciones de la campaña. La inspección consistirá en un control de calidad de datos medidos y la detección de daños físicos en los instrumentos, revisión del cero del anemómetro y de la orientación de la veleta con respecto al norte geográfico. Revisiones a los componentes eléctricos y electrónicos del sistema de registro de datos deben ser realizados regularmente. [5]

2	Calibración de anemómetros.	Las normas y estándares aplicables corresponden a las implementas por la MEASNET [5]. Para el caso de los anemómetros , como parte de la inspección anual (o semestral, consultar Tabla 7) se debe entregar un informe con una comparación de las mediciones del equipo a evaluar con respecto a un instrumento de control , que especifique si existen cambios en la tendencia de medición. El instrumento de control puede ser otro de los anemómetros ubicados en la misma torre meteorológica, que debe conservar su tendencia de medición respecto a su calibración original.
3	Calibración de termómetros, barómetros e higrómetros.	- Los termómetros están estandarizados por la IEC, ISO, ASTM, entre otros. De esta manera se pretende cumplir con el estándar de trazabilidad ISO 17025 [3]. - Los instrumentos relacionados con la medición de presión y humedad relativa tienen procesos de calibración que pueden ser consultados con detalle en las guías de la WMO [3], en específico, la sección 3.6 para barómetros y la sección 4.7 para higrómetros.
4	Resultado de inspección de instrumentos.	Si en la inspección anual (o semestral) se detecta un cambio en la de tendencia de medición o daños físicos en el instrumento, se debe considerar la posibilidad del reemplazo del equipo como primera medida o la recalibración de los anemómetros en túneles de viento acreditados por la MEASNET [5]. Si dicha recalibración no es realizada, se debe realizar una calibración en sitio y se requiere documentar que el anemómetro mantiene su calibración para la duración del período de medición.

Tabla 7. Regularidad exigida de los informes de tendencia de medición.

Regularidad exigida de informes de comparación	Características del terreno
Informes semestrales	Terrenos con presencia de partículas en el aire, como terrenos con salinidad elevada (típicamente cerca de la costa) o terrenos con alta aridez y vientos (zonas desérticas como la Guajira). Se incluyen también terrenos con presencia de heladas.
Informes anuales	Todos los terrenos no considerados anteriormente.

4.5. Etapa 5 – Preprocesamiento de Datos Inválidos y Ausentes

Los datos inválidos y/o ausentes deben detectarse a partir de rutinas de validación para su posterior revisión. Dichas rutinas de validación son:

1. Verificaciones generales del sistema.
 - a. **Registros de datos.** El número de campos de datos debe ser igual al número esperado de parámetros medidos para cada registro.
 - b. **Secuencia de tiempo.** La estampa 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. Estas pruebas se aplican en secuencia, y los datos deben pasar las tres para que se consideren válidos.
 - a. **Pruebas de rango.** Los datos medidos se comparan con valores límite superiores e inferiores permitidos. Los límites deben ajustarse estacionalmente, cuando corresponda, de modo que abarquen casi todo el rango de valores plausibles para el sitio.
 - b. **Pruebas relacionales.** Consiste en relaciones de los parámetros medidos entre los sensores. Las comparaciones entre sensores emparejados a la misma altura son especialmente valiosas.
 - c. **Pruebas de tendencia.** 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. Las tendencias de la dirección del viento no se consideran.

Se recomienda realizar las rutinas de validación por lo menos cada siete (7) días.

En caso de detectar datos inválidos y/o ausentes durante la campaña de medición con el sensor primario, el llenado de dichos datos puede realizarse haciendo uso de mediciones de sensores redundantes, siempre y cuando:

1. Si el sensor redundante se encuentra a una altura diferente al sensor primario, deben emplearse las técnicas de extrapolación por altura establecida en el ***Acuerdo CNO Por el cual se aprueba el Protocolo para la Extrapolación de Velocidad del Viento, Dirección del Viento, Temperatura Ambiente y Presión Atmosférica a la Altura de Buje.***
 - a. Si el sensor primario y redundante se encuentren a la misma altura, se toman directamente los datos del sensor redundante.
2. Las mediciones del sensor redundante hayan sido adquiridas conforme con lo dispuesto en este Acuerdo o aquellos que lo modifiquen o sustituyan.

4.6. Etapa 6 – Operación y Mantenimiento

Procedimiento	Actividades [8]
Descripción de los Componentes del Sistema	Recopilar información fundamental de todos los instrumentos (anemómetros, veletas de viento, sensores de temperatura, humedad y presión barométrica, sistema de registro de datos, entre otros). Incluir información detallada del componente, como manuales del fabricante.
Instrucciones Rutinarias para el Cuidado de Instrumentos	<u>Aspectos Estructurales:</u> ✓ Condición de Anclaje: • Revisar si hay señales de daño o corrosión. • Evaluar el movimiento de los anclajes en el tiempo en referencia a la orientación (°N,S / E,W). • Verificar la integridad de las conexiones de los anclajes. ✓ Condición de los Cables de Sujeción: • Revisar si los cables están tensados apropiadamente en acorde a las guías del fabricante. Tensionar el cable si es necesario. • Inspeccionar los cables y puntos de conexión por señales de daño o corrosión. • Asegurarse de que se usaron el número apropiado y la buena condición de pinzas de alambre para asegurar los cables de sujeción. ✓ Condición de la Torre: • Revisar si hay señales de daño o corrosión. • Confirmar que la torre está correctamente erguida. • Inspeccionar la placa base o fundación para asegurar que no se está hundiendo, distorsionando o está libre de daños. ✓ Sistema de Puesta en Tierra: Verificar que está conectado apropiadamente y los contactos eléctricos están en buenas condiciones. <u>Instrumentos:</u> ✓ Sensores: • Inspeccionar los soportes y mástiles para su condición y nivelación. • Confirmar que los sensores están en las alturas y orientaciones de monitoreo. • Reemplazar cualquier sensor que haya mostrado señales de falla a partir de análisis de datos.

	• Anemómetros y veletas de viento deben ser reemplazados regularmente como parte de un plan de mantenimiento preventivo. • Algunos anemómetros requieren reacondicionamientos periódicos tales como recalibraciones y reemplazo de rodamientos. ✓ Sistema de Adquisición de Datos: • Inspeccionar el sistema y su recinto por señales de corrosión, daño, humedad o la presencia de roedores e insectos. • Revisar el cableado regularmente para prevenir la pérdida de conexiones a los sensores. • Revisar el voltaje de la batería y reemplazarlas si es necesario. • Las baterías son cargadas generalmente con un sistema solar fotovoltaico, el cual requiere un mantenimiento que consiste en la limpieza y realineación de los paneles. Se debe revisar la rotura y la resistencia contra agua de los paneles y las conexiones eléctricas.
Procedimientos de Visita al Sitio	<u>Preparación para la Visita:</u> ✓ Confirmar la razón de una visita determinada y las necesidades específicas del personal técnico. Determinar si es una inspección de rutina o se ejecuta en respuesta a un problema potencial. Establecer si el problema puede ser solucionado con la torre sin cambios o si se requiere inclinar o desinstalar la torre como últimas medidas. ✓ Asegurarse que el personal tiene un conjunto completo de herramientas, suministros y manuales del equipo. Si la campaña adquiere los datos de forma manual, se requiere el equipo apropiado para la descarga de datos en el sitio. ✓ Una tarjeta de memoria adicional debe ser preparada y equipada. Se debe probar su funcionamiento antes de partir al sitio de medición, lo cual es esencial si las tarjetas de memoria son el método de obtención de datos. ✓ Determinar el número de personas requeridas para la visita en sitio. Por seguridad, trabajos en altura en la torre requieren de por lo menos dos personas; la desinstalación o levantamiento de la torre exige por lo menos cinco personas. <u>Procedimientos en Sitio:</u>

- ✓ Revisión de los planes del día en operación y mantenimiento; verificación del cumplimiento de los requerimientos y procedimientos de seguridad del personal.
- ✓ Si los datos van a ser recolectados durante la visita, se debe realizar primero la transferencia de datos al dispositivo de almacenamiento para minimizar los riesgos de pérdida de datos por errores de operación, descargas estáticas o sobretensiones eléctricas durante el manejo o revisión de otros componentes.
- ✓ Sin importar el propósito de la visita, se debe incluir una inspección visual completa (con binoculares o cámara digital), así como pruebas necesarias para detectar daños o fallas en los componentes. Entre los componentes revisados deben incluirse: sistema de registro de datos, sensores, sistema de comunicación, sistema de puesta en tierra, conexiones y cableado, fuente de potencia, soportes de montaje y componentes de la torre.
- ✓ Realizar las recalibraciones y reemplazos de componentes pertinentes, revisiones operacionales y soluciones de problemas en general en el sitio.
- ✓ Se debe examinar y verificar que las lecturas instantáneas del sistema de registro de datos están reportando mediciones razonables.

Procedimientos de Partida del Sitio:

- ✓ El proceso de recolección de datos debe ser confirmado antes de dejar el sitio. Esto involucra la transferencia de información exitosa con el computador de la central (recolección remota) o con el dispositivo de almacenamiento en sitio (manual).
- ✓ Para recolección remota, la transferencia de datos puede ser verificada guardando información de forma redundante y en la nube. Se debe asegurar que el sistema de comunicación no fue alterado en la visita y está funcionando.
- ✓ Asegurar que el sistema de registro de datos ha sido configurado en el modo de sistema de potencia a largo plazo. Esto es importante para conservar la vida de la batería y evitar pérdida de información. Finalmente, se debe asegurar y proteger el recinto del sistema de registro para evitar daños o vandalismo.

5. Medición con Dispositivos Remotos (LIDAR o SODAR)

El uso de instrumentos y técnica por medio de sistemas de medición remota (RSD por sus siglas en inglés) es frecuente en la industria eólica hoy en día y cada vez se desarrolla más normativas con el fin de estandarizar su uso. Tal es el caso de los estándares IEC 61400-50-2:2022 [12]; MEASNET para la evaluación de condiciones de viento in-situ [5]; o la IEA Rp.15 [13].

El procedimiento a presentar a continuación se debe realizar tanto para la componente horizontal de la velocidad de viento, como para la dirección de viento [5].

Tarea	Descripción	Requerimientos y Actividades [5]
1	Reportes de ensayos de RSD.	Se deben incluir dos tipos de reportes: ✓ Reporte de ensayo de verificación, acorde con IEC 61400-50-2:2022 [12] o con IEA Rp.15 [13]. Éste busca realizar una comparación entre el RSD y otro sensor calibrado, que este ubicado en la torre de medición. Se debe basar en el promedio diezminutal de la velocidad horizontal. • Si el ensayo de verificación se va a realizar in-situ, la torre de medición contra la que hará la comparación debe cumplir con las normas establecidas para torres de medición según IEC 61400-12-1:2022. • Si la campaña de medición se realiza en terreno sencillo (tal que no requiera de torre de medición de control), se debe realizar un análisis de verificación máximo cada 2.5 años. ✓ Reporte de clasificación acorde con IEA Rp.15 [13], con el fin de validar la sensibilidad del dispositivo RSD. Se debe basar en el promedio diezminutal de la velocidad horizontal. Adicionalmente, de acuerdo a la IEC 61400-12-1 [4] se requiere un dispositivo de monitoreo, que funcione como dispositivo

		de control, con una altura mínima de 40 m, o a la menor altura de radio de punta de la turbina para así poder revisar la consistencia en las mediciones.
--	--	--

La MEASNET recomienda que el uso de sistemas RSD sea exclusivamente en terreno sencillo (según IEC-61400-12-1). Sin embargo, esto no es de obligatorio cumplimiento. En caso de contar con terreno complejo se tienen 3 posibilidades:

- Se puede recurrir a los procedimientos establecidos en IEC-61400-50-2:2022 para cálculo del error en las mediciones, tal que, si ésta es mínima, se puede usar el RSD.
- Se puede hacer uso de un modelo de flujo tridimensional para evaluar el error en la medición.
- Utilizar un RSD que pueda realizar correcciones internas en los errores de medición.

2 Condición de superficie

El uso de RSD es aceptable en una campaña de medición, en un terreno complejo, siempre y cuando se cuente por lo menos con 1 torre de medición que cumpla los requerimientos establecidos en el presente protocolo. De esta forma, se puede usar la información de la torre para realizar las correcciones correspondientes, utilizando un modelo tridimensional:

- ✓ Si no hace corrección de las mediciones, se debe asumir que el error obtenido por medio de la modelación, se debe agregar a las incertidumbres de la medición.
- ✓ Si se hace una corrección basada en el modelo tridimensional, por lo menos la mitad de la corrección obtenida se debe incluir como incertidumbre.

			• El modelo utilizado debe tener una resolución $\leq 10^\circ$ en cuanto a dirección de viento. • La resolución de la malla debe ser del orden de 10 m en la coordenada horizontal. ✓ Ambas series de tiempos (corregida y sin corrección) deben estar disponibles.
3	Determinación de incertidumbres.		El cálculo de incertidumbres se debe basar en el promedio diezminutal de la velocidad horizontal. Entre las fuentes de incertidumbre se deben incluir: ✓ Incertidumbre resultante según reporte de verificación (Tarea 3). ✓ Incertidumbre de sensibilidad respecto a condiciones ambientales. ✓ Incertidumbre asociada a la suposición de “mismas condiciones de viento” para cada una de las probetas utilizadas. • Si la medición es corregida, se aplica la incertidumbre de la medición. • Si no se corrige, el error total de la medición se aplica como incertidumbre. ✓ Incertidumbre debida a la alineación del RSD. ✓ Incertidumbre resultante a una anomalía al comparar con la torre que funciona de control.
4	Operación y Mantenimiento		Se debe realizar acorde con las recomendaciones establecidas por el fabricante. [13]

Referencias

- [1] CREG, *Resolución 101 006 de 2023*, Bogotá, 2023.
- Asian Development Bank, *Guidelines for Wind Resource Assessment*:
- [2] *Best Practices for Countries Initiating Wind Development*, Manila, Filipinas: Asian Development Bank, 2014.

- [3] W. M. O. *Guide to Instruments and Methods of Observation - Vol. I*, Ginebra, Suiza: World Meteorological Organization (WMO), 2021.
- [4] International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-50-1:2022 - Wind energy generation systems - Part 50-1: Wind measurement - Application of meteorological mast, nacelle and spinner mounted instruments.*, Ginebra, Suiza: IEC, 2022.
- [5] MEASNET, *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions - V3*, 2022.
- [6] AWS TruePower, *Wind Resource Assesment Handbook*, Albany, New York: NREL, 1997.
- [7] A. G. Davenport, C. S. Grimmond, T. R. Oke y J. Wieringa, «Estimating the roughness of cities and sheltered country,» de *AMS 12th Conference on Applied Climatology*, 2000.
- [8] M. C. Brower, B. H. Bailey, P. Beaucage y D. W. Bernadett, *Wind resource assessment: a practical guide to developing a wind project*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [9] IDEAM, «Cracterísticas Climatológicos 1981-2010,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Promedios+Climatol%C3%B3gicos++1981+-+2010.xlsx/f28d0b07-1208-4a46-8ccf-bddd70fb4128>. [Último acceso: 02 06 2023].
- [10] IDEAM, «IDEAM - PREDICCIÓN CLIMÁTICA A CORTO, MEDIANO Y LARGO PLAZO SOBRE EL TERRITORIO NACIONAL/2023,» 2023. [En línea]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/prediccion-climatica-a-corto-mediano-y-largo-plazo-sobre-el-territorio-nacional/-/document_library_display/4VxHJWLWDhGo/view/125356886?_110_INSTANCE_4VxHJWLWDhGo_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Ftie. [Último acceso: 01 06 2023].
- [11] International Electrotechnical Commission, *IEC 60751:2022 - Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*, Ginebra, Suiza: IEC, 2022.
- [12] International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-50-2:2022 - Wind measurement - Application of ground-mounted remote sensing technology*, Ginebra, Suiza: IEC, 2022.
- [13] International Energy Agency, *IEA-Wind - 15. Groun-Based Vertically Profiling Remote Sensing For Wind Resource Assessment*, Golden, Colorado: IEA-Wind, 2013.
- [14] Universidad de los Andes y Consejo Nacional de Operación (CNO), *Protocolos correspondientes a la resolución 167 de 2017*, Bogotá, Colombia: CNO, 2018.