

Protocolo para la Medición de Velocidad del Viento con LIDAR Ubicado en Góndola

Febrero 8, 2024

Autores

María Alejandra Vargas Torres

Andrés Felipe Gallo Campos, Ing.

Nelson Andrés Salazar Peña, M.Sc.

Andrés Leonardo González Mancera, Ph.D.



Universidad de
los Andes
Facultad de Ingeniería



Revisión Revisión	Fecha Fecha	Descripción Descripción
0	2023-05-08	
1	2023-07-27	Se revisó según los Acuerdos CNO correspondientes a las Resoluciones CREG 101 006 y 007 de 2023.
2	2023-12-12	Actualización según los comentarios de revisión y aprobada por el grupo de trabajo.
3	2024-02-08	Actualización según comentarios de revisión de AES.

1. Objetivo

El presente documento describe la metodología para la medición de la velocidad del viento incidente en un parque eólico mediante LIDAR ubicado en la góndola de uno de los aerogeneradores del parque eólico, conforme con el estándar IEC 61400-50-3:2022.

2. Alcance

El presente documento se basa en el estándar IEC 61400-50-3:2022, el cual describe los procedimientos y métodos que aseguran que las mediciones de velocidad del viento utilizando LIDAR montados en las góndolas de los aerogeneradores se lleven a cabo y se reporten de manera consistente y de acuerdo con las mejores prácticas.

Las mediciones de velocidad del viento obtenidas siguiendo los procedimientos del presente documento garantizan la calidad de los datos de acuerdo con las mejores prácticas de la industria para evaluación del recurso eólico.

El alcance de este documento se limita a LIDAR montados en la góndola con visión hacia adelante; es decir, el volumen de medición se encuentra a barlovento del rotor del aerogenerador. Adicionalmente, solo aplica para mediciones en terrenos catalogados como simples y en alta mar. Por último, las correcciones por zona de inducción o efectos de bloqueo no están incluidas en el alcance del presente documento.

Este documento es aplicable a cualquier tipo y marca de LIDAR montado en la góndola, independientemente del modelo y tipo de instrumento, y también del principio de medición. Adicionalmente, permite la aplicación a nuevos tipos de LIDAR montados en góndola. En cualquier caso, es indispensable que se sigan los procedimientos y recomendaciones establecidas por los fabricantes de los equipos.

3. Términos y definiciones

- **Ángulo de balanceo/guiñada:** Ángulo de rotación del LIDAR sobre el eje de balanceo, con respecto a la orientación de diseño del LIDAR definida como horizontal.

- El eje de balanceo pasa por el origen del sistema de coordenadas del LIDAR en una dirección representativa de la dirección de medición promedio. La definición exacta del eje de balanceo debe ser documentada por el fabricante. Para un LIDAR de escaneo, se sugiere que el eje de balanceo se defina como el vector unitario con la misma dirección que el promedio de los vectores unitarios que describen la trayectoria del haz. Para un LIDAR de haz fijo, se sugiere que el eje de balanceo se defina como el vector unitario con la misma dirección que el promedio de los vectores unitarios que describen los haces fijos del LIDAR.
- **Ángulo de inclinación/cabecceo:** Ángulo de rotación del LIDAR sobre el eje de inclinación, con respecto a la orientación de diseño del LIDAR definida como horizontal.
 - El eje de inclinación pasa por el origen del sistema de coordenadas del LIDAR, es perpendicular al eje de balanceo y es horizontal cuando el LIDAR está en la orientación de diseño definida como horizontal.
- **Cortante del viento (α):** Cambio de la velocidad del viento horizontal con la altura. Se expresa mediante un exponente del modelo de ley de potencia de la variación de la velocidad del viento horizontal con la altura sobre el suelo (ver Ecuación 1, donde v_{zi} es la velocidad del viento horizontal a la altura z_i).

$$v_{z_2} = v_{z_1} \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

- **Desalineación del eje del rotor (*yaw misalignment*):** Ángulo resultante de la desviación horizontal del eje del rotor del aerogenerador con respecto a la dirección del viento.
- **Detección homodina:** Técnica de medición en la que la señal recibida se mezcla con una señal de la misma frecuencia que la señal transmitida. El producto de mezcla en la diferencia de frecuencia contiene información sobre la magnitud del desplazamiento Doppler inducido en la señal recibida, pero no si ese desplazamiento Doppler es positivo o negativo.
- **Detección heterodina:** Técnica de medición en la que la señal recibida se mezcla con una señal de una frecuencia diferente a la de la señal transmitida. El producto de mezcla en la diferencia de frecuencia contiene información tanto sobre la magnitud como sobre el signo del desplazamiento Doppler inducido en la señal recibida.
- **Dirección del viento:** Dirección de la componente horizontal de la velocidad del viento.

- **Incertidumbre:** Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores de cantidad que se atribuyen a un mensurando, con base en la información utilizada.
- **Intensidad de la turbulencia:** Relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad del viento promedio, determinada a partir del mismo conjunto de muestras de datos medidos de la velocidad del viento, y tomada durante un periodo de tiempo específico.
- **LIDAR:** Dispositivo de detección remota que transmite energía desde una fuente láser a la atmósfera y analiza la señal reflejada por las partículas transportadas por el viento para medir las características del viento.
- **LIDAR de escaneo:** LIDAR en el que se escanea la dirección de un solo haz transmitido.
 - **LIDAR de escaneo de patrón fijo:** El haz se escanea siguiendo una trayectoria fija predefinida (esta trayectoria suele ser plana o cónica).
 - **LIDAR de escaneo programable:** El haz se escanea de manera programable.
- **LIDAR de geometría de haz fijo:** EL haz se transmite en varias direcciones diferentes, pero fijas, que se abordan de forma secuencial o simultánea.
- **LIDAR de onda continua:** Se transmite un haz de amplitud y frecuencia constantes, y se recibe luz retro dispersada al mismo tiempo.
- **LIDAR pulsado:** Se transmite un haz durante un periodo de tiempo corto (el pulso) a intervalos regulares y se recibe luz retro dispersada entre los pulsos.
- **Línea de visión (LOS):** Dirección que se origina en la fuente del haz y se orienta a lo largo del eje del haz de luz transmitido, correspondiente a la ruta de propagación del haz.
- **Longitud de sondeo (L_{probe}):** Medida de la extensión radial del volumen de sondeo del LIDAR que se puede definir en términos de la distancia entre los dos puntos en los que la sensibilidad radial del LIDAR es la mitad de su valor máximo; i.e., sensibilidad del ancho total a la mitad del máximo (FWHM, por sus siglas en inglés).
 - Para **LIDAR coherente pulsado**, L_{probe} es la distancia entre los niveles FWHM de la función de ponderación del rango de velocidad (VRWF, por sus siglas en inglés).
 - Para **LIDAR incoherente pulsado** (i.e., de detección directa), L_{probe} es la distancia entre los niveles FWHM del pulso láser (asumiendo que no hay promedio de rango).
 - Para **LIDAR coherente de onda continua**, L_{probe} es la distancia entre los niveles FWHM de la función de ponderación de Lorentz.

Nota: VRWF describe la eficiencia relativa de recopilar información de velocidad del viento en función de la distancia alrededor del rango

nominal. Una función de ponderación ideal sería una función de Dirac en 0 (la velocidad del viento se mide en un punto). La integral de la función de ponderación (de $-\infty$ a $+\infty$) es igual a 1. El VRWF es la convolución normalizada del perfil del rango con el perfil de amplitud del pulso.

- **Valores finales:** Valores proporcionados por el LIDAR en la góndola para su uso en aplicaciones de evaluación del recurso eólico (e.g., velocidad del viento horizontal y dirección del viento).
- **Valores intermedios:** Entradas al modelo o algoritmo de reconstrucción del campo eólico (WFR, por sus siglas en inglés), que entrega valores finales como salida (e.g., V_{LOS}).
- **Velocidad del viento:** Vector que apunta en la dirección de movimiento de un volumen infinitesimal de aire que rodea el punto de consideración, siendo la magnitud del vector igual a la velocidad de movimiento de esta región de aire (es decir, la velocidad del viento local).
- **Velocidad del viento horizontal:** La velocidad del viento horizontal es la magnitud de la proyección de la velocidad del viento en el plano horizontal.
- **Velocidad del viento libre:** Velocidad del viento que estaría presente en la ubicación del aerogenerador si el aerogenerador no estuviera allí.
- **Velocidad en la línea de visión (V_{LOS}):** Magnitud de la componente de la velocidad del viento en la LOS.
- **Viraje del viento:** Cambio de dirección del viento con la altura a través del rotor del aerogenerador.
- **Volumen de sondeo:** Volumen ubicado a lo largo de la ruta de propagación del haz de luz en el que las partículas que devuelven la luz al sistema del LIDAR contribuyen significativamente a la señal recibida.

4. Resumen de la metodología

El presente documento es aplicable a los LIDAR montados en la góndola (*Nacelle Mounted Lidar* - NML) que utilizan el siguiente principio de medición: el mesurando fundamental del LIDAR es la velocidad en la línea de visión (V_{LOS}). Los medidos requeridos (i.e., la velocidad del viento horizontal y dirección del viento) se derivan de múltiples mediciones de V_{LOS} junto con parámetros del LIDAR (e.g., ángulos de inclinación y balanceo), el ángulo entre cada LOS y el eje óptico del LIDAR que define la dirección de LOS y el rango de medición.

El algoritmo utilizado para derivar los medidos requeridos se conoce como reconstrucción del campo de viento (WFR, por sus siglas en inglés). Las entradas al algoritmo WFR se denominan valores intermedios (e.g., V_{LOS} , ángulos de inclinación y balanceo del LIDAR). Los resultados del algoritmo WFR se denominan valores finales (i.e., velocidad del viento horizontal y dirección del viento).

4.1. Descripción de la metodología de medición

La metodología de medición específica (SMM, por sus siglas en inglés) incluye dos fases: calibración del LIDAR y ejecución de la medición.

4.1.1. Fase 1: Calibración del LIDAR y sensibilidad a las variables ambientales

La contribución resultante a la incertidumbre de la medición se evalúa analizando la precisión de cada valor intermedio. La calibración y el análisis de sensibilidad de los valores intermedios proporcionan los componentes de la incertidumbre que deben propagarse a los valores finales de las variables a medir. La calibración de la unidad LIDAR y el análisis de las incertidumbres se debe realizar antes del inicio de la SMM siguiendo lo definido en la Sección 6 del presente documento.

4.1.2. Fase 2: Ejecución de metodología de medición específica

La ejecución de la metodología de medición utilizando un NML sigue cuatro pasos:

1. Preparación, incluida la evaluación del sitio, el sector de medición y la preparación del montaje del LIDAR en la góndola.
2. Mediciones.
3. Evaluación de la incertidumbre de la medición.
4. Informes.

5. Requisitos del LIDAR

5.1. Requerimientos funcionales

Para la compatibilidad con este documento, el LIDAR montado en la góndola debe cumplir con los requisitos funcionales definidos en la cláusula 6.1 del estándar IEC 61400-50-3:2022. El cumplimiento de dichos requisitos se puede verificar mediante certificación por el fabricante o entidad competente.

5.2. Requisitos de documentación técnica, de instalación y de funcionamiento

La información de comisionamiento, tanto técnica (requerida para respaldar la calibración, la sensibilidad de las incertidumbres y el funcionamiento del LIDAR) como

de instalación y operación del LIDAR en la góndola de un aerogenerador, debe cumplir con los requisitos definidos por los fabricantes del LIDAR y del aerogenerador, así como con lo estipulado en la cláusula 6.2 del estándar IEC 61400-50-3:2022. El cumplimiento de dichos requisitos se puede verificar mediante certificación por el fabricante o entidad competente.

6. Calibración del LIDAR

El LIDAR debe ser calibrado siguiendo los procedimientos y requerimientos estipulados en la cláusula 7 del estándar IEC 61400-50-3:2022. Dicha calibración debe ser certificada por el fabricante o entidad competente.

Asimismo, se debe tener en cuenta la evaluación de la sensibilidad de los valores intermedios con respecto a las condiciones ambientales cambiantes a partir de lo estipulado en la cláusula 8 del estándar IEC 61400-50-3:2022.

Por último, siguiendo la cláusula 9 del estándar IEC 61400-50-3:2022 se deben propagar las incertidumbres de los valores intermedios a los valores finales a través del algoritmo WFR.

7. Procedimiento de medición

El objetivo del procedimiento de medición es definir un conjunto de criterios para garantizar que los datos de medición recopilados por un LIDAR ubicado en la góndola de un aerogenerador son precisos, repetibles y reproducibles.

7.1. Verificaciones preliminares

Para iniciar el proceso de medición, se debe cumplir con las pautas del fabricante del LIDAR y del fabricante del aerogenerador, además de lo estipulado en las cláusulas 10, 11.2 y 11.3 del estándar IEC 61400-12-1:2022.

Adicionalmente, el LIDAR debe haber sido calibrado conforme a la Sección 6 del presente documento.

7.2. Recopilación de datos

Los datos se deben recopilar continuamente a la tasa de muestreo siguiendo las instrucciones del fabricante del LIDAR. El paso de las palas del aerogenerador tiene un impacto en el rango de las mediciones válidas, el cual debe establecerse siguiendo las

instrucciones del fabricante del instrumento. En cualquier caso, se requiere documentar cómo se distribuye el número de puntos de medición válidos en el tiempo para cada valor estadístico diezminutal.

El sistema de adquisición de datos LIDAR en la góndola del aerogenerador debe almacenar al menos:

- Todos los datos muestreados.
- Estadísticas diezminutales (promedio, desviación estándar, máximo y mínimo) de los datos válidos y recuperación de datos o indicador de datos válidos.

Por lo general, es necesario integrar datos de sistemas de adquisición de datos separados (e.g., la señal de la dirección del viento o la dirección del eje del rotor del aerogenerador (*yaw*) suelen ser necesarias y puede no estar disponible directamente). En estos casos, el reloj del sistema de adquisición de datos del LIDAR en la góndola del aerogenerador se debe sincronizar con el resto de los sistemas de adquisición de datos en un 1%, o 6 segundos, siempre que se recopilen datos en periodos de 10 minutos. Esta sincronización se debe comprobar y mantener durante toda la medición. **Los conjuntos de datos seleccionados de velocidad del viento horizontal y dirección del viento se deben basar en periodos de 10 minutos.**

7.3. Rechazo de datos

Adicional a las pautas del fabricante y a lo estipulado en el Acuerdo CNO 1715 de 2023, el principio general es que los datos deben excluirse de la base de datos en las siguientes circunstancias:

- El aerogenerador no está en el modo de operación deseado para el SMM.
- Falla o degradación del equipo de medición según las especificaciones suministradas por el fabricante del equipo. Los parámetros internos especificados deben ser medibles y trazables en los registros del equipo.
- Dirección del viento fuera del(los) sector(es) de medición definidos según la cláusula 10.4 del estándar IEC 61400-50-3:2022.
- La disponibilidad de datos del LIDAR está por debajo de un umbral (e.g., debido al paso de la pala o a las condiciones atmosféricas) para una caracterización suficiente del periodo de 10 minutos. Dicho umbral debe ser definido por el agente, siguiendo las pautas del fabricante según las condiciones ambientales y operativas, para garantizar suficiente disponibilidad de datos.

7.4. Aplicación del algoritmo WFR

El algoritmo de reconstrucción debe aplicarse al promedio de 10 minutos de V_{LOS} .

En ciertas configuraciones de LIDAR ubicados en la góndola (e.g., LIDAR de dos haces), intentar calcular una velocidad promedio a partir de las velocidades del viento reconstruidas instantáneamente (i.e., un promedio escalar) resulta en un error ya que cualquier diferencia de velocidad entre las posiciones de escaneo deriva en un aparente exceso de velocidad del LIDAR. A la tasa de muestreo del LIDAR, en cualquier flujo turbulento hay diferencias de velocidad significativas entre las posiciones de muestreo. A medida que aumenta la intensidad de la turbulencia, la magnitud del error debido a este efecto puede volverse significativo. En su lugar, se recomienda reconstruir la velocidad del viento horizontal con base en los valores medios de 10 minutos de V_{LOS} . Al promediar durante este período de tiempo, las velocidades del viento promedio detectadas son más próximas y no se incurre en un exceso de velocidad inherente.

Adicionalmente, se recomienda registrar la mayor cantidad de información posible sobre la dirección del eje del rotor del aerogenerador (*yaw*). Esta información puede incluir el promedio diezminutal, la desviación estándar y la actividad motora de la dirección del eje del rotor del aerogenerador.

Para un LIDAR ubicado en la góndola que registra un promedio vectorial, una desalineación del eje del rotor constante dentro del período donde se estima el promedio no afecta la velocidad del viento promedio. De la misma manera, la desalineación del eje del rotor promedio no afecta la velocidad del viento promedio del vector. Sin embargo, suponiendo una velocidad del viento de magnitud constante, las fluctuaciones de la dirección del viento alrededor del valor medio dan lugar a una subestimación del promedio del vector. La magnitud del error depende de la amplitud de las fluctuaciones y de su duración. El peor escenario es un cambio significativo en la desalineación del eje del rotor a mitad del período donde se estima el promedio (e.g., cambio en la dirección del viento, pero retraso en la orientación del eje del rotor). Se ha demostrado que para un cambio de 10° en la dirección del eje del rotor que se produce a mitad del período donde se estima el promedio de 10 minutos, el promedio del vector informado es 0.4% menor que el valor correcto [1]. Por lo tanto, se recomienda registrar la mayor cantidad de información posible sobre la orientación del eje del rotor.

7.5. Variaciones de altura de medición

Es necesario considerar las variaciones en la elevación de los haces/LOS del LIDAR en la góndola sobre el suelo o el nivel del mar durante las mediciones. Independientemente del terreno, el LIDAR se mueve con la góndola reaccionando al

empuje del rotor, lo que puede provocar una variación en la altura de medición. La corrección de cambios en la elevación puede ser parte del algoritmo WFR o puede aplicarse en el posprocesamiento. Se debe documentar cómo se cuantifican y contabilizan las variaciones del terreno y los movimientos de la góndola.

- Si hay una diferencia de altura constante entre la posición del aerogenerador y la ubicación de medición en todo el sector de medición, la diferencia de altura debe considerarse en la configuración de la inclinación del LIDAR en la góndola conforme con la cláusula 10.4 del estándar IEC 61400-50-3:2022.
- Si la diferencia en la elevación del terreno a través del sector de medición excede los límites dados por el caso de uso, el error en la velocidad del viento debe corregirse, ya sea directamente en el algoritmo WFR o en la velocidad del viento promedio reconstruida de 10 minutos. El método de corrección debe documentarse y se debe aplicar un término de incertidumbre adicional de acuerdo con la cláusula 9.4 del estándar IEC 61400-50-3:2022. Si los requisitos del caso de uso se cumplen en una parte del sector de medición, el sector de medición se puede ajustar para cumplir con los requisitos de altura de medición.
- De manera similar a las variaciones del terreno, los cambios en la altura de medición debidos a la inclinación del LIDAR que excede los límites del caso de uso deben corregirse, ya sea directamente en el algoritmo WFR o en la velocidad del viento promedio reconstruida de 10 minutos. El método de corrección debe documentarse y se debe aplicar un término de incertidumbre adicional de acuerdo con la cláusula 9.4 del estándar IEC 61400-50-3:2022.

El ángulo de inclinación del LIDAR se debe monitorear durante toda la medición y se debe reportar al menos como valores promedio por intervalo de dirección de 10° e intervalo de velocidad del viento horizontal (V_{hor}) de 0.5 m/s.

8. Formato de reporte de parámetros para los LIDAR montados en góndolas

El reporte del SMM debe incluir los requisitos de establecidos en el caso de uso (e.g., el estándar IEC 61400-12 1:2022), y adicionalmente:

1. Periodo de medición.
2. Disponibilidad del sistema en el periodo de medición.
3. Registro de cambios:
 - Cambios en el LIDAR.
 - Cambios en el aerogenerador.

- Servicios/mantenimiento regular realizado y observaciones.
- 4. Documentación del sitio de medición (conforme a la cláusula 12.2 del estándar IEC 61400-50-3:2022).
- 5. Documentación del LIDAR ubicado en la góndola (conforme a la cláusula 12.3 del estándar IEC 61400-50-3:2022).
- 6. Documentación del aerogenerador (conforme a la cláusula 12.4 del estándar IEC 61400-50-3:2022).
- 7. Documentación de la sincronización entre sistemas de adquisición de datos independientes (e.g., la señal del aerogenerador o SCADA y el LIDAR ubicado en la góndola del aerogenerador), incluido el método de sincronización y el seguimiento a lo largo de la medición.
- 8. Descripción del análisis de datos que incluye:
 - Información sobre la validez de las muestras del LIDAR:
 - Criterios utilizados para determinar la validez de la muestra.
 - Gráfico del número de muestras válidas por registro en función de la velocidad del viento; también se recomienda el gráfico en función de la velocidad del rotor.
 - Se recomienda documentar cómo se distribuyen las muestras válidas en el tiempo a lo largo de cada valor estadístico de 10 minutos.
 - Informar todos los criterios de rechazo de datos, incluyendo el número total de conjuntos de datos eliminados.
- 9. Descripción del método para calcular la velocidad del viento horizontal (V_{hor}) y la dirección del viento a partir de las V_{LOS} medidas (i.e., algoritmo WFR).
- 10. Descripción del método de monitoreo para evaluar la consistencia de las mediciones del LIDAR y si las inconsistencias observadas conducen a una incertidumbre adicional.

9. Referencias

1. International Electrotechnical Commission, IEC 61400-50-3:2022 – Wind energy generation systems - Part 50-3: Use of nacelle-mounted lidars for wind measurements. Ginebra, Suiza: IEC, 2022.
2. ISO/IEC 61400-12-1:2022, Wind energy generation systems – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
3. ISO/IEC 61400-12-2:2022, Wind energy generation systems – Part 12-2: Power performance of electricity-producing wind turbines based on nacelle anemometry.

10. Anexo A. Ejemplo del algoritmo WFR con LIDAR en góndola de dos líneas de visión (2-LOS)

Para un LIDAR en góndola de dos haces/LOS (2-LOS) con geometría de haz fijo (ver Figura A.1), el Punto A representa el origen del haz, y L_0 y L_1 son las distancias a las posiciones B y C detectadas por el haz. Este algoritmo WFR es la aplicación típica de un LIDAR con geometría de haz fijo, pero también se usa en otros tipos de LIDAR de escaneo programable. Sin embargo, en el último caso, también se debe considerar la incertidumbre de posicionamiento dinámico.

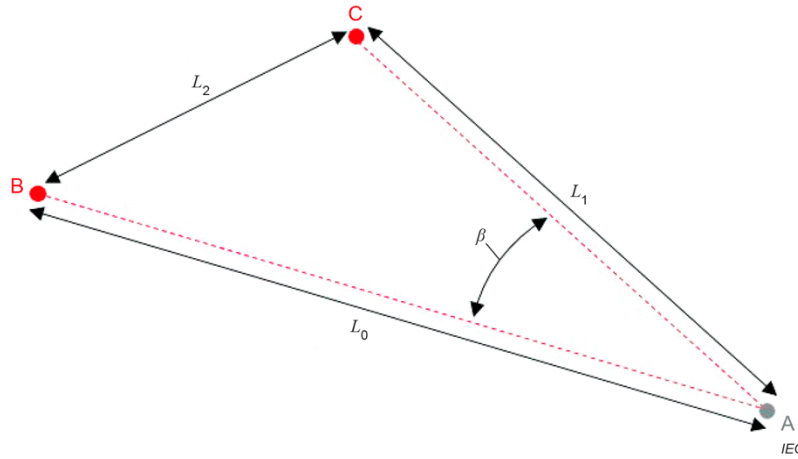


Figura A.1. Ejemplo de ángulo de apertura β entre dos haces. Tomado de [1].

En este ejemplo, se supone que el LIDAR se ha calibrado con lo establecido en el presente documento y los dos LOS se han calibrado uno tras otro utilizando los mismos instrumentos de referencia (anemómetro de copa para la velocidad del viento horizontal y veleta para la dirección del viento). Se supone que ambos LOS miden a la misma altura independientemente de las variaciones de inclinación de la góndola o dirección del eje del rotor del aerogenerador (*yaw*).

Las fórmulas del algoritmo WFR para calcular la velocidad del viento horizontal para 2-LOS son:

$$\bar{V}_x = \frac{V_{L_0} + V_{L_1}}{2 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos(\tau)} \quad (\text{A.1})$$

$$\bar{V}_y = \frac{V_{L_0} - V_{L_1}}{2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos(\rho)} \quad (\text{A.2})$$

Donde las variables denotan las siguientes cantidades:

- V_x es la componente longitudinal de la velocidad del viento.
- V_y es la componente transversal de la velocidad del viento.
- V_{L_0} es la V_{LOS} para el LOS izquierdo, visto desde detrás del LIDAR.
- V_{L_1} es la V_{LOS} para el LOS derecho.
- β es el ángulo entre los dos LOS.
- τ es el ángulo de inclinación.
- ρ es el ángulo de balanceo.

β se puede calcular como:

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_0^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_0 \cdot L_1}\right) \quad (A.3)$$

La velocidad del viento horizontal ($\overline{V_{2LOS}}$) se calcula como el promedio cuadrático de los componentes de la velocidad del viento longitudinal y transversal:

$$\overline{V_{2LOS}} = \sqrt{\overline{V_x}^2 + \overline{V_y}^2} \quad (A.4)$$

La dirección del viento ($\overline{\theta_{2LOS}}$) se calcula como la tangente inversa de dos argumentos de los componentes longitudinal y transversal de la velocidad del viento:

$$\overline{\theta_{2LOS}} = \arctan2(\overline{V_y}, \overline{V_x}) \quad (A.5)$$

Donde:

- La barra indica las variables que representan un promedio diezminutal de los datos.
- Si el algoritmo WFR no se puede expresar analíticamente, se debe usar otro método como Monte Carlo.

Suponiendo que no hay diferencia de altura entre los dos LOS en ningún momento, cada valor de 10 minutos de la velocidad del viento horizontal reconstruida ($\overline{V_{2LOS}}$) se puede escalar a la altura de medición deseada (e.g., la altura del buje) con la Ecuación 1, donde $v_{z_1} = \overline{V_{2LOS}}$, z_2 es la altura de medición deseada y z_1 la altura de medición real. El cortante del viento (α) debe definirse a partir de las mediciones disponibles conforme al Acuerdo CNO 1717 de 2023.

11. Anexo B. Método sugerido para la medición de los ángulos de inclinación y balanceo

El siguiente procedimiento proporciona simultáneamente la calibración de los inclinómetros y el valor del ángulo de apertura entre dos haces. La Figura B.1 muestra la geometría de dos haces del LIDAR exactamente nivelados en el plano horizontal (puntos A, B y C), y después de un desplazamiento de inclinación (τ) y un desplazamiento de balanceo (ρ) (puntos A', B' y C'). El punto A es el origen de los haces, el punto B es la posición detectada de uno de los haces (haz 0) a la distancia L_0 y el punto C es la posición detectada por el haz restante (haz 1) a la distancia L_1 . La distancia horizontal entre las dos posiciones de haz detectadas (B y C) es L_2 . El ángulo de apertura de los haces del LIDAR es β . Debido a la inclinación (ángulo τ) y al balanceo (ángulo ρ), las posiciones del haz 0 y del haz 1 se elevan en alturas H_0 y H_1 respectivamente.

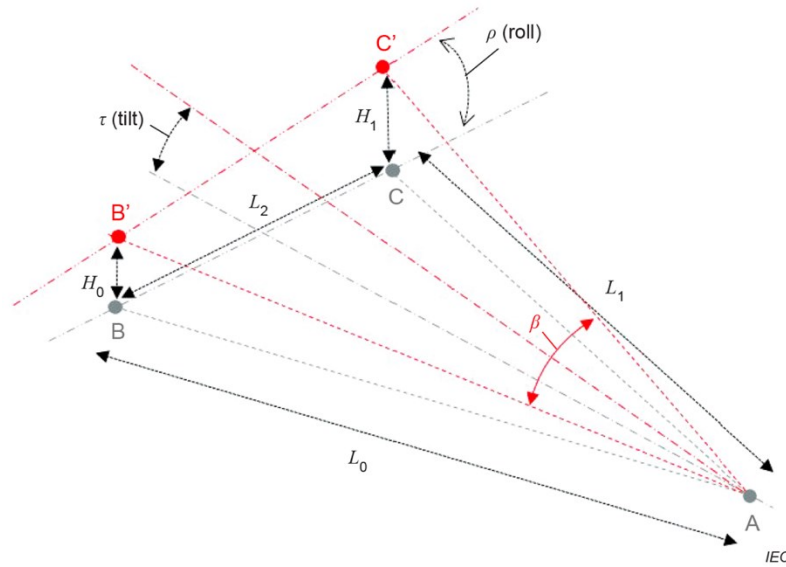


Figura B.1. Dos haces del LIDAR con inclinación y balanceo (en color rojo) en relación con la posición de referencia (en color gris). Tomado de [1].

Entonces, el desplazamiento de inclinación (τ) y el desplazamiento de balanceo (ρ) están dados por:

$$\tau = \arctan \left(\frac{\frac{H_0}{L_0} + \frac{H_1}{L_1}}{2 \cdot \cos \left(\frac{\beta}{2} \right)} \right) \quad (B.1)$$

$$\rho = \arctan\left(\frac{\frac{H_1}{L_1} - \frac{H_0}{L_0}}{2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (\text{B.2})$$

Para un LIDAR con geometría que consta de solo dos haces horizontales, los ángulos de inclinación (τ) y balanceo (ρ) medidos son:

$$\tau_{medido} = \tau \quad (\text{B.3})$$

$$\rho_{medido} = \rho \quad (\text{B.4})$$

Para un LIDAR con geometría que consta de dos haces inferiores y dos haces superiores, con un plano de simetría vertical y otro horizontal, los ángulos de inclinación (τ) y balanceo (ρ) medidos son:

$$\tau_{medido} = \tau + \frac{\gamma_V}{2} \quad (\text{B.5})$$

$$\rho_{medido} = \rho \quad (\text{B.6})$$

Donde γ_V es la proyección del ángulo de apertura entre dos haces simétricos respecto al plano horizontal (γ) sobre el plano vertical de simetría del LIDAR (ver Figura B.2).

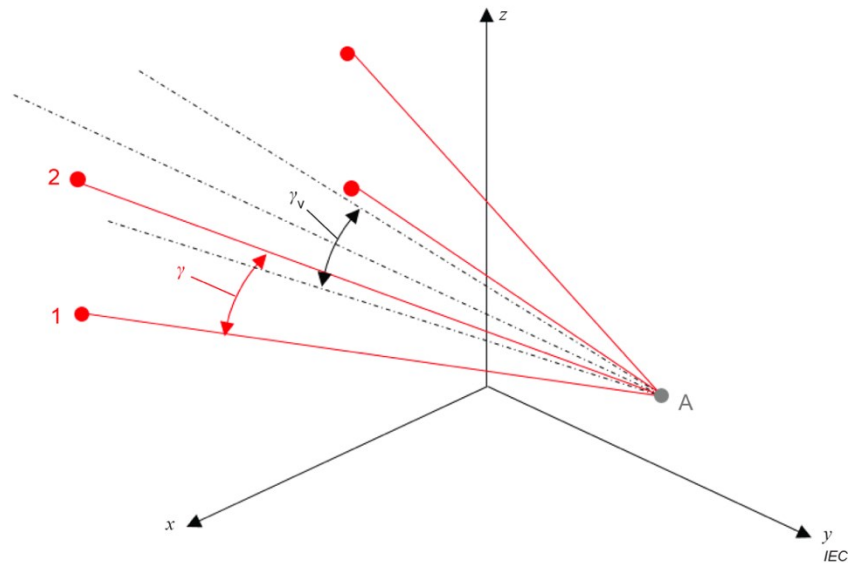


Figura B.2. Ángulo de apertura entre dos haces simétricos respecto al plano horizontal (γ) y su proyección sobre el plano vertical de simetría del LIDAR (γ_V). Note que γ_V es la proyección en el plano YZ del ángulo de apertura (γ) entre LOS 1 y 2. Tomado de [1].