

USO DE LA TÉCNICA LIDAR PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES VERTICALES DE VIENTO

Durán L., Martínez R., Zubiaur R

Barlovento Recursos Naturales S.L.

Pintor Sorolla Str. N°8, 26007, Logroño (SPAIN)

brn@barlovento-recursos.com

RESUMEN

Existen diversas técnicas para la obtención de perfiles verticales de viento sin hacer uso de las clásicas torres anemométricas. La mayoría de estas técnicas ya fueron desarrolladas hace alguna décadas y mostraron su potencial siempre en el ámbito científico y para campañas muy concretas (Post et al 1978, Crescenti et al, 1997). No obstante, en los últimos años han ido apareciendo nuevos diseños que gracias a su fiabilidad, robustez y fácil manejo, se están convirtiendo en serias alternativas a la torre anemométrica. Para algunas aplicaciones, son incluso la única alternativa posible, debido a restricciones de tipo medioambiental o puramente de logística que supone una torre de gran altura. Entre las más conocidas se encuentran el SODAR (“Sonic Detection And Ranging”) (Rogers, 2003) y el LIDAR (“LIght Detection And Ranging”). Debido a su uso tan reciente, en lo que respecta a su aplicación para la evaluación del recurso eólico, son pocos los estudios de comparación con torres anemométricas en lo que respecta a la evaluación del recurso como a su fiabilidad y funcionamiento remoto en campo. En este estudio se analizan las relaciones encontradas entre una torre anemométrica clásica y un LIDAR comercial. Se exponen aspectos tales como requerimientos de instalación, grado de fiabilidad, cobertura de datos y se analizan los resultados obtenidos por ambas técnicas. Se estudian las desviaciones observadas y se analizan los factores meteorológicos y ambientales que han podido dado lugar a las mismas. Finalmente se discute la posibilidad de utilizar esta técnica como sustitutiva de la torre anemométrica para el cálculo de los perfiles verticales de viento y se trazan algunas líneas para futuros trabajos de investigación que permitan la utilización del LIDAR como medida única de evaluación del recurso.

Introducción

El desarrollo de las futuras turbinas está conduciendo a un crecimiento continuo de su

potencia nominal lo que implica un incremento de la altura de buje. Este incremento está asociado también a una mayor longitud de las palas con el propósito de captar una mayor energía del viento, que como es bien sabido, aumenta con la altura respecto al suelo. Actualmente es común encontrar parques eólicos con turbinas instaladas de 2 MW o incluso superiores, y alturas de buje en torno a los 100 metros de altura.

Un incremento de la altura de buje implica un aumento de los costes adicionales de instalación, equipos y labores de mantenimiento. Por esta razón, es crucial disponer de una evaluación realista de los perfiles verticales de viento para determinar si este sobre coste es rentable con el incremento de energía captada. En este contexto, disponer de perfiles de viento de los primeros cien metros de la atmósfera es crucial (Wagner, 2008).

La medida de datos de viento a esta altura implica realizar una inversión considerable en torres, equipos e instalaciones y obra civil. Por otro lado, surgen dificultades técnicas añadidas asociadas a la gran altura de la torre, problemas con los permisos, y un mayor impacto ambiental, sin olvidar la influencia que una torre de estas características provoca sobre las propias medidas de viento debido a su mayor sección.

Existen diversas alternativas a la torre anemométrica para medir el viento en estos primeros centenares de metros (Chintawongvanich, 1989). Quizás la más extendida sea el SODAR que hace uso del desplazamiento doppler que sufre un pulso sonoro cuando rebota en las heterogeneidades del aire en movimiento. Menos conocido para esta aplicación, pero en expansión es el LIDAR, el cuál hace uso del desplazamiento en frecuencia que sufre un pulso de luz cuando este rebota en las partículas en suspensión, que se supone se mueven a la velocidad del viento.

Existe amplia bibliografía sobre las ventajas e inconvenientes del SODAR para la evaluación del perfil vertical de viento con vistas a la evaluación del recurso eólico, sin embargo son más escasos los análisis de la técnica LIDAR para este propósito. Esto es debido fundamentalmente, a que es un sistema relativamente recientemente y que tradicionalmente ha requerido de un conocimiento experto de los equipos, siendo estos de gran volumen y grande requerimientos energéticos y de funcionamiento. Gracias a los nuevos diseños y equipos comerciales, estas restricciones han ido desapareciendo, como el utilizado en este estudio. Aquí se analizan los resultados obtenidos con el sistema Zephir (Natural Power Ltd, Reino Unido).

Características del emplazamiento

La campaña se lleva a cabo una zona de cultivo de cereal con una orografía ligeramente ondulada. En esta zona existe un parque eólico con turbinas de 90m de altura de buje alineados según la dirección suroeste a noreste (los vientos dominantes son de noroeste a sureste). Tanto la torre meteorológica como el LIDAR se encuentran a unos 200m por delante de la línea de aerogeneradores y a barlovento de la dirección dominante. El LIDAR se ubica a 150 m al noreste de la torre en la línea paralela a la línea de los aerogeneradores.

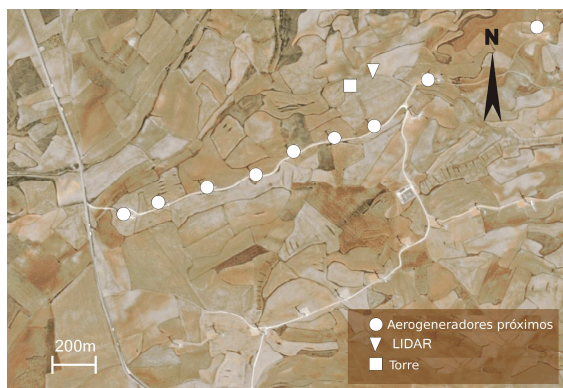


Figura 1. Localización de los instrumentos de medida y del parque eólico.

El LIDAR Zephir utilizado es un equipo especialmente diseñado para evaluación del perfil de viento en los primeros metros de la atmósfera. Es de construcción robusta y está pensado para un funcionamiento autónomo y remoto. Las características principales de este equipo son:

- Dimensiones: 550mm diámetro X 1340mm longitud
- Peso: 134kg
- Temperatura de funcionamiento: -25°C to $+40^{\circ}\text{C}$
- Consumo: 28v DC @ 100W continuo
- Voltaje: 100 - 240V A.C. 50/60Hz 300VA

- Rango de medida: de 11m hasta 200 m
- Velocidad máxima detectada: 70m/s
- Velocidad mínima detectada: 2ms/
- Longitud de onda del láser: 1575nm
- Almacenamiento de datos : 3 días datos sin elaborar, 365 días de velocidad de viento
- Datos salida: Velocidad de viento, temperatura, presión y humedad
- Número de niveles: 5



Figura 2. LIDAR, torre anemométrica y parque eólico.

Principios básicos de operación del LIDAR

Entre las ventajas del LIDAR utilizado es que apenas requiere tiempo de instalación. Por otro lado, no es necesaria ninguna preparación previa del terreno ni obra civil, ya que dispone de patas auto-nivelantes y sistema de anclaje al suelo. Dispone de un sistema de comunicaciones GSM y GPRS que permiten configuración remota y volcado de datos. También dispone de una tarjeta de memoria y conexión de red para volcado y configuración local. Aunque su consumo es mucho menor que sus antecesores, sí que requiere un suministro considerable de energía estable, aunque dispone de baterías de apoyo en el caso de cortes eventuales en el suministro.

Este sistema pertenece a los denominados LIDAR de pulsos, ya que estima las velocidades de viento gracias al desplazamiento que sufre un pulso de láser infrarrojo emitido cuando éste es reflejado en las

partículas en suspensión presentes en el aire. La comparación entre una parte del pulso emitido con el reflejado, proporciona una estimación de la velocidad radial respecto al origen. Una serie de cálculos vectoriales permite obtener las velocidades horizontales y verticales del viento. Este proceso se repite para todos los ángulos gracias a un sistema óptico en rotación que va enfocando el pulso a distancias diferentes, y por lo tanto, a diferentes alturas, formando un patrón cónico. Obviamente, este proceso consume cierto tiempo, en concreto, unos 20 milisegundos por muestreo, de tal forma que es capaz de capturar unos 150 puntos en tres segundos antes de pasar a la siguiente altura. Si el sistema se configura para medir en cinco niveles, se requieren unos 15 segundos para volver a la misma altura. En condiciones normales de operación, una media de viento de diez minutos se calcula a partir de unos 40 muestreos. Este hecho hay que tenerlo en cuenta a la hora de comparar con otros métodos, como son los anemómetros, ya que éstos suelen estar configurados con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, calculando la misma media a partir de 600 muestreos de velocidad.

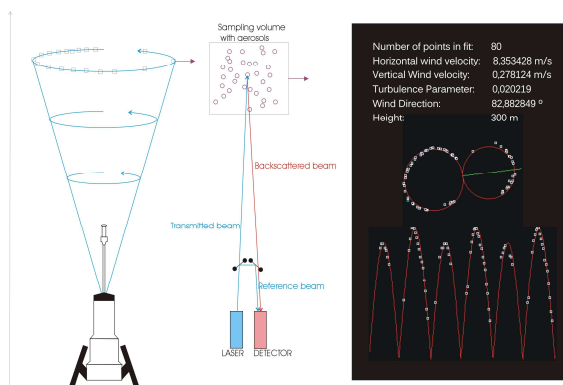


Figura 3. Principio de funcionamiento del LIDAR.

La torre meteorológica utilizada en este estudio tiene una altura de 78 metros, con anemómetros calibrados de la firma Vector a 78 y 68 metros de altura y veletas a las mismas alturas. El sistema de almacenamiento de datos es de la firma Synmetron configurado con una frecuencia de muestreo de 1 Hz y promedios de diez minutos. Se dispone de información adicional como sensores de temperatura y humedad relativa a 2 metros.

Resultados

Los datos usados para el análisis se extienden desde el 31 de Octubre de 2008 hasta el 19 de Diciembre de 2008. Aunque se dispone de un rango de datos mucho mayor, ha sido necesario seleccionar el periodo en el que los datos son homogéneos. Esto es debido a las diversas vicisitudes, algunas

relacionadas con el funcionamiento del parque existente, otras relacionadas con cambios de instrumentación de la torre y finalmente, incidencias iniciales relacionadas con el suministro de energía y el uso del terreno. Estos hechos han acortado la extensión de los datos disponibles para la intercomparación.

Una vez solventadas estas incidencias y decidida la configuración del sistema, el LIDAR se ha comportado de forma bastante robusta. Apenas ha requerido operaciones de mantenimiento y la gestión remota ha sido posible a pesar de la poca calidad de la señal GSM en la zona de estudio, lo que ha requerido algunas más acciones a nivel local de las deseadas.

El procesado de datos es relativamente sencillo, ya que es el propio sistema el que calcula las velocidades de viento. Esto hace bastante directa la interpretación de los mismos y su control de calidad, a diferencia de sus antecesores. En lo que respecta a la completitud de datos, esta es bastante satisfactoria, del 98% en el nivel de 200 m. La disponibilidad disminuye con la altura, tal como era de esperar, pero en mucho menor grado de lo esperado, comparado con campañas similares llevadas a cabo utilizando SODAR (Durán et al, 2006).

Altura (m)	36	78	119	150	200
Disp. Datos (%)	99,1	98,6	98,3	98,1	98

Tabla 1. Disponibilidad de datos.

En condiciones ideales, el número de muestreos máximo utilizado para el cálculo de cada velocidad de viento es de 150, en esta campaña la media de puntos utilizados está en torno a los 120 puntos. Bajo ciertas condiciones el número de muestreos disminuye, debido fundamentalmente al peor valor del parámetro señal-ruido. Esta disminución puede deberse a dos causas: un aumento del ruido de fondo, o una disminución de la señal rebotada. Tal como se comentará a continuación, este dato se ha convertido a un buen indicador de la calidad de la medida de velocidad de viento, y fundamental en el control de calidad.

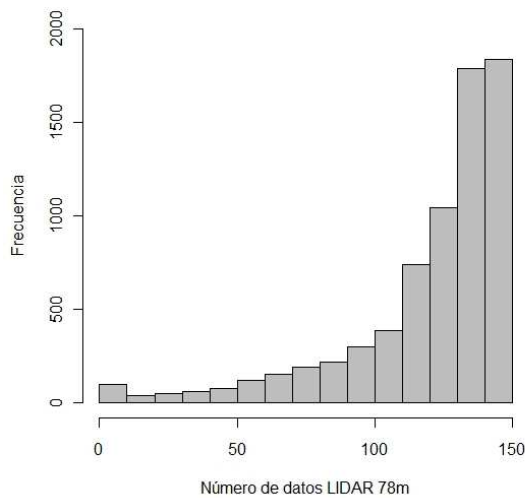


Figura 4. Número de muestras utilizadas para calcular la velocidad de viento.

Es importante señalar que se van a comparar los resultados obtenidos por dos técnicas cuyo principio básico de medida es muy diferente. Un anemómetro gira gracias a la energía contenida en una pequeña porción de aire de su entorno, de la cual extrae cierta cantidad convirtiéndola en energía mecánica. Esta energía hace rotar su eje y mediante un sensor genera una frecuencia, la cual mediante una función de transferencia, obtenida mediante calibración, se traduce en velocidad de viento. Los anemómetros tienen inercia y no están libres de cierto margen de error. Este error, no solo es debido al sensor en sí mismo y su calibración, también pueden estar inducidos por el sistema de adquisición, algoritmos internos de cálculo, el transporte de la señal o incluso por la influencia aerodinámica de la propia torre que lo soporta. En el caso de torres altas, el efecto de la estructura no es despreciable y es recomendable la medida redundante en un mismo nivel con distintas orientaciones. El LIDAR estima la velocidad del viento de forma directa a partir de la información que suministra un volumen mucho mayor de aire y mediante una medida directa que no lo perturba. Sin embargo, el número de muestreos utilizados para hacer las medias es muy inferior.

Es lógico que en la comparación de dos técnicas tan diferentes, aparezcan siempre diferencias. Dado que las torres anemométricas han sido durante años el sistema utilizado para medir los perfiles verticales de viento, denominaremos error a la diferencia entre lo medido por la torre y lo medido por el LIDAR, aunque esto no quiere decir que uno sea mejor que otro, o que uno se erija como el patrón respecto al que calibrar el otro. Este aspecto abre la discusión sobre qué técnica es la más adecuada para evaluar el potencial eólico cuando se trata de aprovechar la energía contenida en grandes masas de aire

desplazándose a gran altura, como es el caso de los aerogeneradores.

En términos generales, los resultados obtenidos en esta campaña, y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, dan lugar a series bastante similares, tal como han encontrado otros autores (Smith, 2006)

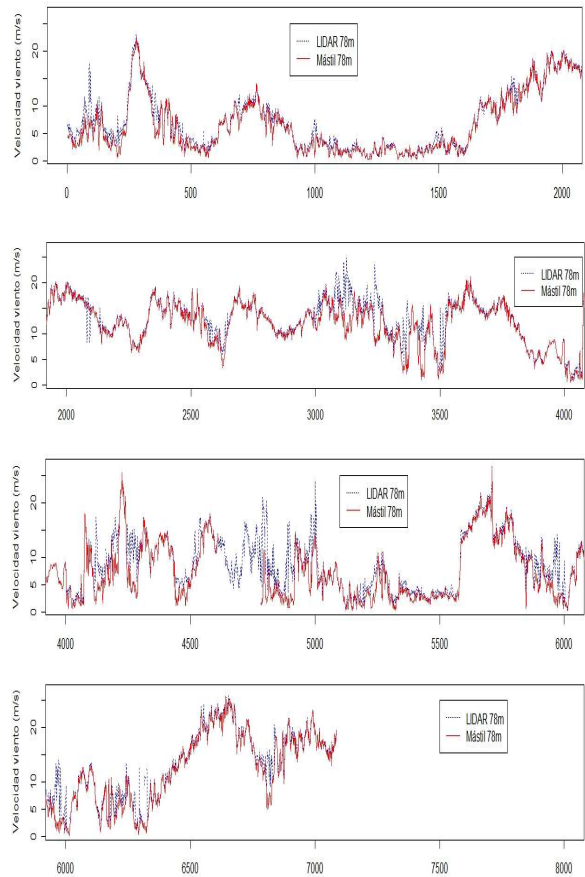


Figura 5. Series temporales obtenidas.

Una mirada más precisa, muestra ciertas discrepancias. Se puede asegurar que el LIDAR sobrestima ligeramente la velocidad de viento respecto a las velocidades de la torre. En algunos casos, este efecto es muy acusado, del orden de varios metros por segundo, que suele estar acompañado de desviaciones en la dirección de viento. Aunque, ya se han comentado las razones intrínsecas que pudieran dar lugar a estas discrepancias, algunas son demasiado acusadas como para poder pensar que sean fruto de la diferencia en el método de medida.

Los diagramas de dispersión para los niveles de 36 y 78 metros, también reflejan este comportamiento general equivalente aunque están patentes las desviaciones comentadas. Si se pretende hacer uso del LIDAR como una herramienta autónoma para el cálculo de perfiles de viento, parece obvia la

necesidad de desarrollar algún tipo de procedimiento que permita identificar estos posibles errores.

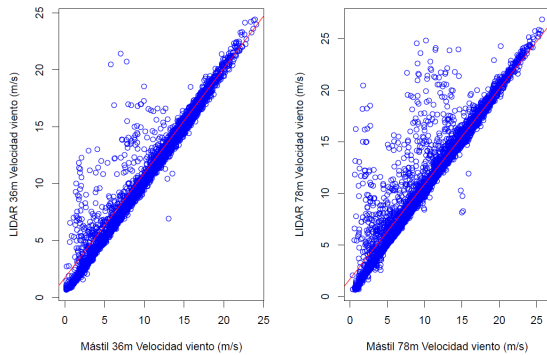


Figura 6. Diagramas de dispersión para la torre y LIDAR a 36 y 78 metros.

En lo que respecta a la dirección de viento, de nuevo se corrobora un comportamiento general equivalente y satisfactorio, aunque aparecen ciertas discrepancias tal como se puede apreciar en las las rosas de viento.

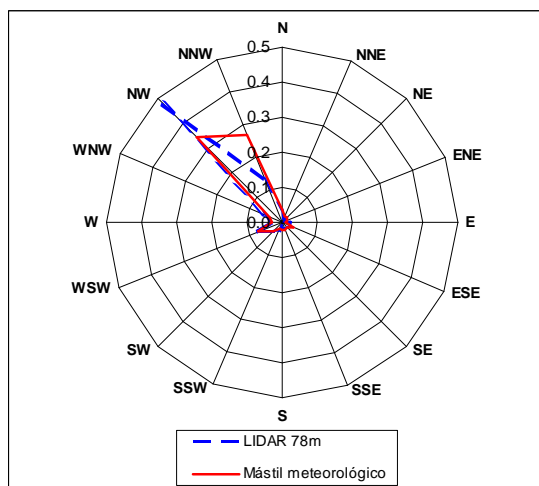


Figura 7. Rosas de viento calculadas a partir de los datos de la torre y el LIDAR.

Con el objeto de cuantificar cualitativamente las desviaciones, se han calculado una serie de parámetros clásicos de comparación de series tales como el sesgo, raíz cuadrada del error cuadrático medio y el coeficiente de correlación. Los valores para los niveles de 36 y 78 m se muestran en la siguiente tabla.

Parámetro	NIVEL	
	36 m	78 m
Sesgo	0,50	1,03
RMSE	1,17	2,31
Coficiente de Correlación	0,958	0,874

Tabla 2. Valores del sesgo, RMSE y coeficiente de correlación.

Dado que el propósito de este estudio es estudiar la posibilidad de utilizar el LIDAR como una herramienta única para el cálculo del perfil vertical del viento, se han llevado una serie de análisis adicionales que permitan filtrar justificadamente los datos obtenidos y mejorar, si cabe, la equivalencia de los dos métodos. El objetivo ha sido desarrollar una serie de filtros de calidad adicionales a los que aplica la lógica interna del LIDAR. Estos filtros están alimentados únicamente por la información suministrada por el LIDAR. A continuación se enumeran y comentan brevemente:

- **Filtro 1:** Influencia del parque. La presencia de una línea de generadores en las cercanías de los sensores puede perturbar considerablemente los perfiles de viento, especialmente cuando éstos se encuentren a sotavento debido al efecto estela.
- **Filtro 2:** Número de muestreos. La estimación realizada por el LIDAR depende del número de muestras utilizadas para su cálculo. Por debajo de un umbral de datos válidos, la medida de viento puede no ser representativa.
- **Filtro 3:** Influencia de la lluvia. Dado que el LIDAR utiliza el haz reflejado sobre las partículas en suspensión, parece susceptible de ser influido por la lluvia, bien por el propio efecto de las gotas de agua en descenso, bien por la ausencia de partículas en suspensión que supone la presencia de lluvia debido al efecto lavado. También, la presencia de nubosidad puede influir en la relación señal-ruido, aumentando los niveles de fondo.

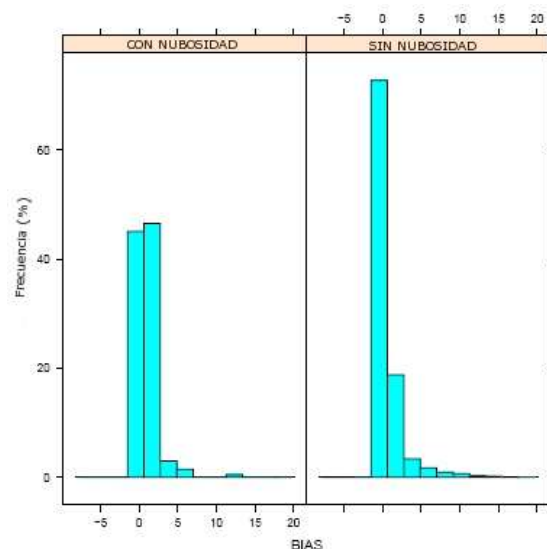


Figura 8. Relación entre la nubosidad y el error bias.

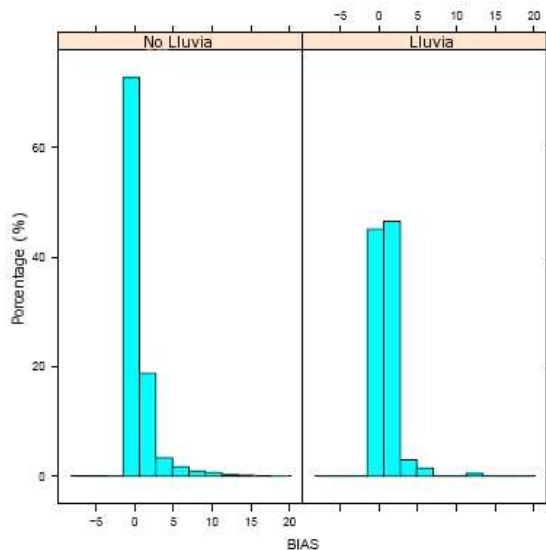


Figura 9. Relación entre la precipitación y el error bias.

Los resultados obtenidos para el nivel de 78 m aplicando sucesivamente los distintos filtros se muestran en la siguiente tabla.

FILTRO	Número de datos	RMSE 78 m	R ² 78m
SIN FILTRO	7086 (100%)	2,31	0,87
FILTRO 1	4919 (69.4%)	1,96	0,89
FILTRO 1+ 2	4003 (56.5%)	1,4	0,94
FILTRO 1+2+3	3074 (43.4%)	0,67	0,99

Tabla 3. Valores del RMSE y coeficiente de correlación en función de los filtros aplicados.

Tal como se puede comprobar, la disminución del error es considerable aplicando sucesivamente los distintos filtros. La Figura 8, comparada con la Figura 6 ilustra la mejora en la similitud entre los dos métodos.

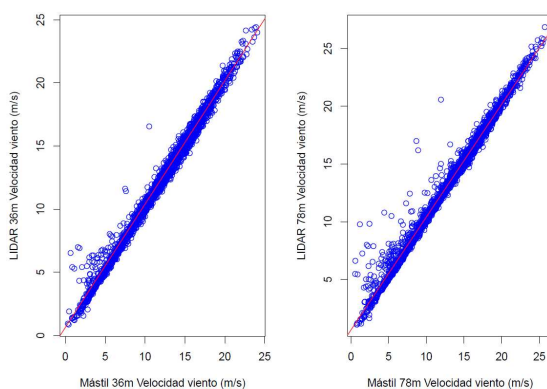


Figura 10. Diagramas de dispersión de las velocidades obtenidas por ambos métodos después de aplicar sucesivamente los tres filtros de calidad.

Asimismo se ha evaluado el perfil vertical de viento, tanto en LIDAR como en torre. El modelo comúnmente utilizado en la industria eólica es el de la ley potencial, formulación que tiene como ventaja la utilización de las medidas a dos alturas:

$$V_2 = V_1 (h_2/h_1)^\alpha$$

El exponente de ley potencial (α) se calcula a partir de las velocidades V_1 y V_2 correspondiente a los niveles de alturas h_1 y h_2 respectivamente. Se ha restringido el cálculo para velocidades mayores de 4m/s (velocidad de arranque de muchos aerogeneradores). El perfil entre los niveles de 36 y 78m en la torre y LIDAR ha sido evaluado considerando únicamente el filtro 1 (sector libre de perturbación) y la totalidad de los filtros expuestos anteriormente. En ambos casos el LIDAR ha sobreestimado ligeramente el valor del parámetro α respecto a la torre. La siguiente tabla muestra los resultados:

α	TORRE	LIDAR
FILTRO 1	0.16	0.19
FILTRO 1+2+3	0.15	0.17

Tabla 4. Valores del perfil para distinto filtros con velocidades mayores de 4m/s.

Para una correcta evaluación del recurso eólico, cuando no se dispone de medidas a la altura de buje, se hace indispensable la determinación lo más precisa posible de este perfil vertical del viento. Este hecho es aún más importante cuando se tiene en cuenta las dimensiones de los modernos aerogeneradores. Una mayor o menor ganancia del viento con altura, puede ser determinante a la hora de determinar si una inversión es o no rentable. Notar además, como un comportamiento diferente en el área de barrido del rotor, tanto en velocidad como en dirección, pueden acarrear problemas de funcionamiento con consecuencias en la producción energética final y fatiga de la máquina.

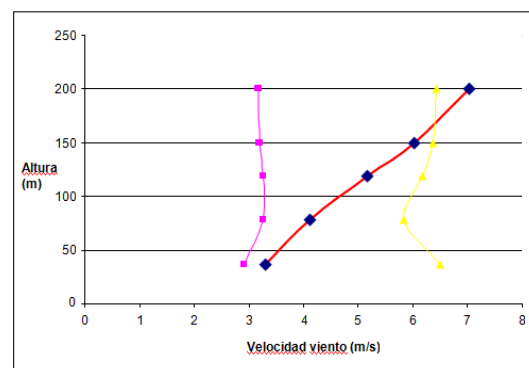


Figura 11. Diferentes perfiles medidos por el LIDAR.

Conclusiones.

Se ha instalado un sistema LIDAR en una ubicación remota para la determinación de los perfiles de viento. Una vez superadas diversas incidencias técnicas y logísticas, el sistema se ha comportado de forma robusta, habiendo soportados pequeños cortes de energía y variaciones en la calidad de la corriente. El sistema ha permitido realizar configuraciones y volcado de datos de forma remota, aunque una mejor calidad de la señal GSM habría facilitado las labores de mantenimiento.

El tiempo ocurrido desde la selección del emplazamiento hasta que se dispone de las primeras medidas es excepcionalmente corto, de algunas horas, en contraste con el tiempo necesario para instalar una torre. El impacto visual y paisajístico es prácticamente nulo y no es necesaria obra civil. No ha habido casos de vandalismo, ni interferencia por animales, uso del terreno ni agentes meteorológicos severos.

La completitud de datos disminuye con la altura, pero está en torno al 98% en el peor de los casos.

La correlación entre los datos procedentes de la torre anemométrica y el LIDAR es alta y ambos métodos son comparables en líneas generales. Sin embargo, a la hora de utilizar el sistema LIDAR con fines de evaluación del recurso eólico parece necesario llevar a cabo algunos controles de calidad adicionales. Se ha encontrado como la influencia de una línea de aerogeneradores en las proximidades, el número de datos utilizados por el LIDAR para estimar la velocidad y la presencia de lluvia o nubosidad, producen diferencias importantes entre ambos métodos.

Se han elaborado una serie de filtros de calidad alimentados únicamente por datos suministrados por el propio LIDAR de tal forma que ha sido posible pasar de un RMSE inicial de 2,31 m/s a otro de 0,67 m/s, a costa de un menor número de datos disponibles. Las diferencias que se siguen observando pueden ser debido a la diferencia intrínseca entre los métodos de medida, volumen de aire muestreado y las muestras utilizadas en el cálculo de las medias. Tampoco se descartan factores que afectan a las medidas de la torre, como por ejemplo los efectos aerodinámicos de la estructura, calibración de los anemómetros y otros factores.

Se han encontrado situaciones con gran variabilidad del perfil de viento entre los 50 y 150 m de altura, información crucial en la evaluación del recurso eólico y en la selección de máquinas con gran altura de buje.

Finalmente, es necesario ahondar en el futuro aspectos tales como la influencia del número de partículas en el aire, relacionada con la intrusión de aire limpio bajo determinadas circunstancias, y el efecto de la nubosidad y la precipitación.

Se puede concluir que el LIDAR utilizado en esta campaña es una herramienta excepcional para la estimación del recurso eólico, con numerosas ventajas respecto a las torres anemométricas. Sin embargo, los resultados de sus medidas deben sufrir un postproceso y control de calidad si se pretende utilizar como una herramienta por sí misma, sin el apoyo de otros métodos.

Referencias

- Asimakopoulos D. N., T. J. Mouldsley, C. G. Helms, D. P. Lalas, John Gaynor, 1983. "Quantitative low-level acoustic sounding and comparison with direct measurements" *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 27, Issue 1, Sep 1983, Pages 1 - 26, DOI 10.1007/BF00119969,
- Chintawongvanich, P., R. Olsen, and C.A. Biltoft, 1989: Intercomparison of Wind Measurements from Two Acoustic Doppler Sodar, a Laser Doppler Lidar, and In Situ Sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6, 785-797.
- Crescenti, G. H. (1997) A look back on two decades of Doppler SODAR comparison studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 651-671.
- Durán L., Barrios A. (2006) Ventajas e inconvenientes de la utilización del SODAR como herramienta de evaluación del recurso eólico. XXIX Jornadas Científicas de la AME. Pamplona.
- Gaynor, J. E., (1994) "Accuracy of sodar wind variance measurements," *Int. J. Remote Sensing*, 1994 vol. 15, No. 2, 313-324.
- Rogers, A. L. And Manwell, J. F. (2003) "Investigation of the Applicability of SODAR for Wind Resource Measurements in Complex and Inhomogeneous Terrain," G. G. Grills, Proc.ASME/AIAA 2003 Wind Energy Symposium, Reno NV. January 2003.
- Post, M.J., R.L. Schwiesow, R.E. Cupp, D.A. Haugen, and J.T. Newman, 1978: A Comparison of Anemometer- and Lidar-Sensed Wind Velocity Data. *J. Appl. Meteor.*, 17, 1179-1181.
- Smith D. A., Harris M., Coffey A.S., Mikkelsen T., Jorgensen H.E., Mann J., Danielian R, 2006: Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Høvsøre. *Wind Energy*. Volume 9 Issue 1-2, Pages 87 - 93
- Wagner R., Jørgensen H.E. , Paulsen U., Madsen H.A. , Larsen T. J., Antoniou I., Thesbjerg L. 2008: Wind characteristics measurement for large wind turbine power curve. EWEC 2008.