

USO DE LA TÉCNICA SODAR PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

Luis Durán⁽¹⁾, Anselmo Barrios⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Física y Matemática, Escuela Superior Politécnica. UEM. C/ Tajo s/n, Villaviciosa de Odón, 28670. Madrid (España). luis.duran@uem.es

⁽²⁾ Barlovento Recursos Naturales. c/ Marqués de Murrieta nº 22, Entresuelo Izda. 26005 Logroño. La Rioja (España). abarrios@barlovento-recursos.com

RESUMEN

El objetivo de este estudio es la validación de la utilización de un sistema SODAR como procedimiento válido para la evaluación de perfiles verticales de viento en el rango 50-200 metros, con la exactitud requerida en el campo de la energía eólica.

Se investigan las limitaciones del SODAR en cuanto a su aplicación a la energía eólica, para posteriormente, una vez conocidas estas, aplicar esta tecnología como complemento a mediciones en tierra con métodos más convencionales (torres meteorológicas con alturas hasta 50 metros y coste razonable). Como conclusión se obtiene el rango de aplicabilidad del SODAR para fines de evaluación de recursos eólicos.

1. Introducción

El desarrollo de la tecnología de aeroturbinas para el aprovechamiento de la energía eólica mediante parques eólicos ha permitido un continuo incremento de la potencia unitaria de los aerogeneradores que se utilizan. Este aumento de potencia lleva aparejado un incremento de altura de las torres, motivado en parte por el mayor diámetro de los rotores y en parte también por el interés en aprovechar el mayor contenido energético del viento al elevarse la altura del buje. En la actualidad existen aerogeneradores de potencias superiores a los 2000 kW, con alturas de torre entre 60 y 100 metros, o mayores.

Este crecimiento en las alturas de torre lleva aparejado un importante incremento de costes, tanto de equipos como de instalación, por lo que se hace necesario realizar exactos estudios técnico-económicos que definan la conveniencia o no de la instalación de torres más altas. Estos estudios deberán estar basados en mediciones de viento a diferentes alturas, que en principio deberían alcanzar hasta los cien metros de altura.

Sin embargo, la realización de mediciones hasta estas alturas implica un elevado coste para los promotores, unido a problemas técnicos, como son las perturbaciones a las propias mediciones

producidas al tratarse de torres de gran sección, y el propio montaje de las mismas.

El SODAR (Sound Detection and Ranging) es un sistema de medida remota para detección de viento y estructura térmica en la baja atmósfera. El sistema utiliza los mismos principios que el radar, usando ondas acústicas en vez de microondas. El sistema detecta la energía acústica de la atmósfera y a partir del estudio del desplazamiento Doppler y de la energía recibida consigue información sobre las condiciones atmosféricas: perfiles verticales de viento y presencia de capas de inversión térmica

El sistema ha sido utilizado hasta la fecha en numerosas áreas:

- Predicción de dispersión de contaminantes atmosféricos.
- Pronóstico meteorológico.
- Predicción de altura de nieblas.
- Detección de cizalladura de viento en aeropuertos.
- Implantación de planes de emergencia en centrales nucleares.
- Estudios de vientos locales y en terreno complejo.

Sin embargo, en el campo de la energía eólica, y en concreto en la evaluación de recursos eólicos, el sistema no cuenta por el momento con una fiabilidad suficiente como para basar en él la decisión sobre las inversiones cuantiosas que suponen los parques eólicos.

2. Descripción de la instalación y principio de funcionamiento

La instalación consta de una torre de celosía de 80 metros instrumentada con anemómetros de cazoleta a 80, 70, 60 y 40 metros. El nivel de 60 m dispone de dos medidas de velocidad orientadas a 0 y 250°. Por otro lado, se dispone de medida de la dirección de viento a 60 metros. El sistema de adquisición de datos es de la marca SYNMETRON.

Adicionalmente, la torre dispone de sensores de temperatura a dos niveles y radiación solar global.

El SODAR utilizado es de los denominados “phased array antenna”, es decir consta de una sola antena compuesta por una matriz de transductores de ultrasonidos y un equipo de emisión, recepción, tratamiento de la señal y almacenamiento de datos. El principio de funcionamiento de un SODAR consiste en medir el desfase por efecto Doppler que sufre un pulso sonoro cuando este es reflejado por una heterogeneidad del aire en movimiento. Éstas heterogeneidades están provocadas por pequeñas diferencias espaciales de temperatura, del orden de la longitud de onda del pulso sonoro. El tiempo que tarda este pulso en volver a la antena desde donde fue emitido permite estimar la distancia a la que se encuentra la misma, y por tanto, permite realizar perfiles verticales de viento. Para poder calcular las distintas componentes del viento, el equipo lanza un pulso en la vertical y tres pulsos con diferentes ángulos respecto a la vertical, la inclinación varía entre 15 y 30°. Los tiempos de llegada y las desviaciones Doppler respecto a la frecuencia original de cada uno de los tres rebotes, permiten estimar las componentes del viento en tres dimensiones.

Este SODAR puede con una sola antena controlar la inclinación de los pulsos ya que es capaz de controlar electrónicamente el desfase entre el comienzo de emisión de cada uno de los transductores que componen la antena. El frente resultante será la suma de los pulsos individuales.

Este tipo de SODAR de una sola antena es más manejable y apto para instalaciones remotas y temporales.

A continuación se muestran las principales características técnicas de este equipo.

Número de elementos emisores	52
Tipo de elementos	Motorola
Frecuencia nominal central de funcionamiento (Hz)	3500
Tamaño de la antena (m)	0.4 x 0.4
Peso de la antena (Kg)	12
Potencia acústica (W)	1
Altura máxima (m)	1000
Altura media (m)	600

Tabla 1. – Características básicas del SODAR utilizado en la campaña.

La instalación se ha llevado a cabo en terreno relativamente llano y con escasa vegetación. El SODAR se ha situado a unos 400 m al norte de la torre, con el fin de evitar reflexiones sobre la misma y ruidos estructurales que podrían interferir en las medidas. Se han tenido en cuenta otros factores como las direcciones predominantes de viento, NO

y SE) así como otros aspectos clave en este tipo de instalaciones como son la disponibilidad del terreno, permisos, seguridad, acceso y lejanía relativa a la población. Es importante señalar aquí, que la obra civil necesaria para instalar este equipo es mucho más sencilla que para la torre, siendo necesario únicamente un terreno nivelado y seguro de algunos metros cuadrados. El impacto ambiental y visual de la instalación es mínimo comparado con la torre aunque no hay que dejar de considerar el posible impacto que puedan causar la sonoridad audible de los pulsos sonoros cuando estos son emitidos. Aunque estos son apenas perceptibles más allá de los 250 metros, pueden ser realmente molestos para la población que se encuentra a menor distancia.

3. Campaña de intercomparación torre-SODAR.

La campaña de intercomparación se extiende entre enero y agosto de 2004. Aunque estos siete meses no pueden ser nunca representativos del comportamiento general de ambos sistemas, sí que incluyen días con situaciones sinópticas y ambientales variadas, incluso opuestas. Hay que señalar que durante este periodo se han alcanzado temperaturas en torno a 0°C en invierno y superiores a 30°C en verano.

Dada la novedad que representa aún este tipo de instalaciones, ha sido necesario dimensionar con cuidado el sistema de alimentación para evitar pérdidas de energía que condujeran a paradas del equipo, habiendo sido necesaria una medida pormenorizada de los consumos y producciones de los elementos del sistema.

Sin embargo, una vez puesto en marcha, el equipo ha funcionado de forma relativamente autónoma, únicamente siendo necesarias algunas revisiones periódicas de la antena, volcado de datos, supervisión del sistema y algunos cambios en la configuración para dotar al sistema de mayor robustez. En este sentido, el SODAR dispone de muy pocas variables de configuración, ya que el propio sistema se adecua para un mejor rendimiento en función de las condiciones ambientales. El software y la plataforma de utilización del mismo es relativamente sencillo e intuitivo.

Durante este periodo el SODAR se han mantenido de forma continuada, realizando medidas horarias de la velocidad y dirección de viento desde una altura de 20 hasta 200 m, con incrementos de 20 metros. En este periodo, han ocurrido un cierto número de paradas esporádicas por fallos en el sistema de alimentación y paradas para comprobaciones y mantenimiento, que consideramos distribuidas aleatoriamente, es decir, independientes de los parámetros ambientales que

se pretenden evaluar y que por tanto, no deberían producir ningún sesgo sobre las conclusiones aquí presentadas.

Independientes de estas paradas operativas, por el propio principio de funcionamiento del SODAR, éste no siempre es capaz de proporcionar valores fiables de velocidad de viento. Esto ocurre cuando la señal recibida por el sistema no presenta una calidad suficiente como para que se pueda determinar la velocidad con suficientes garantías. Esto suele ser debido al propio estado de la atmósfera y a la relación señal ruido. Cuando ocurre esto, el sistema lo etiqueta como dato no válido.

Obviamente, los niveles más altos de la atmósfera son los más difíciles de determinar, especialmente bajo ciertas situaciones y debido principalmente al incremento de la atenuación que sufre el pulso con la distancia de propagación. Con objeto de ilustrar este hecho, a continuación se muestra la disponibilidad de datos respecto al total para cada uno de los niveles. Como se puede observar, las pérdidas de datos debidas a la imposibilidad del sistema para resolver las velocidades son relativamente pequeñas, más aún si nos referimos a los primeros centenares de metros.

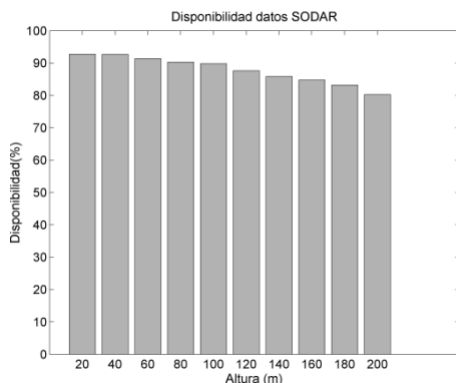


Fig 1.- Disponibilidad de datos del SODAR para cada nivel.

El resultado de comparar los valores de velocidad de viento obtenidos por los sensores ubicados en la torre y los obtenidos por el SODAR muestran valores bastante coherentes tal como muestra la siguiente figura.

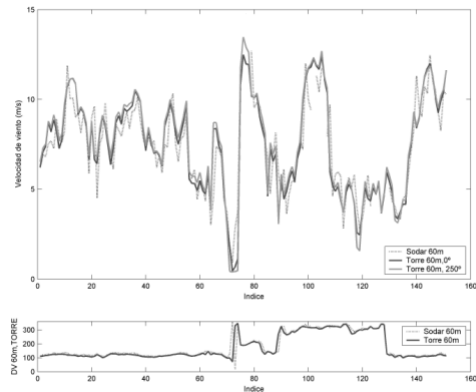


Fig 2.- Ejemplo de observaciones de la velocidad de viento en el sodar y en la torre para 60 metros y según las dos orientaciones de los anemómetros.

En esta figura se puede observar como para vientos fuertes, el SODAR deja esporádicamente de suministrar datos válidos debido al alto ruido provocado por el propio viento. Sin embargo, para velocidades moderadamente altas, las medidas tanto de velocidad como de dirección de viento son comparables. En este gráfico, se puede apreciar también la influencia de la torre, especialmente cuando la dirección del viento está en torno a los 200°. Esta dirección de transición entre las dos principales, aunque poco usual, deja totalmente a sotavento al anemómetro situado a 0° y eso parece afectar a las medidas anemométricas.

En lo que respecta a la variabilidad de los datos en torno a la media para todo el periodo de estudio, ambos sistemas proporcionan resultados equivalentes, tal como muestra la Figura 3. En esta figura se incluyen los diagramas de dispersión correspondientes a las anomalías estandarizadas de la velocidad de viento observadas por la torre y el SODAR a 80 y 60 metros. Se han incluido también las dos medias en el nivel de 60 metros para comprobar el efecto de la torre sobre las observaciones. De nuevo se constata el efecto de la misma, aunque parece ser más acusado para vientos muy flojos y de bajo interés eólico.

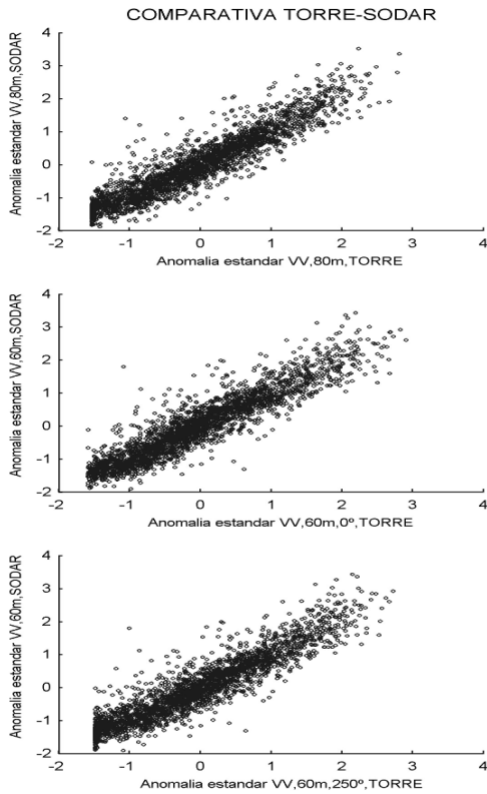


Fig 3.- Diagramas de dispersión entre las anomalías estandarizadas del viento medido en torre y las anomalías estandarizadas del viento medido por el SODAR para 80m, 60m (0°) y 60m (250°).

De la figura anterior se puede comprobar que el grado de correlación entre ambos métodos es relativamente alto. No hay que olvidar que se están comparando dos sistemas de medida conceptualmente muy diferentes. Mientras la medida por anemómetros es puntual, es decir, se calcula a partir del viento que se encuentra justo donde está el anemómetro, el SODAR calcula la velocidad a partir de información de todo un volumen de aire en desplazamiento.

La siguiente figura muestra el comportamiento comparado de la dirección de viento detectada por el SODAR y la torre a 60 metros. Se han enfatizado los puntos para vientos mayores a la media dado que para vientos bajos, la dispersión de los mismos es poco representativa.

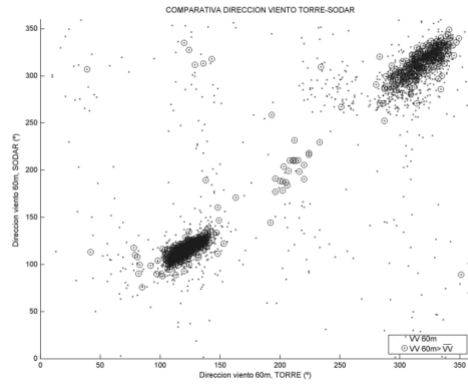


Fig 4.- Diagramas de dispersión entre la dirección de viento medida por el SODAR a 60 m y la Torre. Con círculos se indica cuando la velocidad en 60 m es mayor que la media.

La siguiente gráfica muestra la rosa de frecuencias de viento calculada a partir de los datos de la torre y SODAR a 60 m. Se puede observar como el SODAR suaviza el comportamiento de la dirección, debido probablemente al propio principio de funcionamiento que promedia en un volumen.

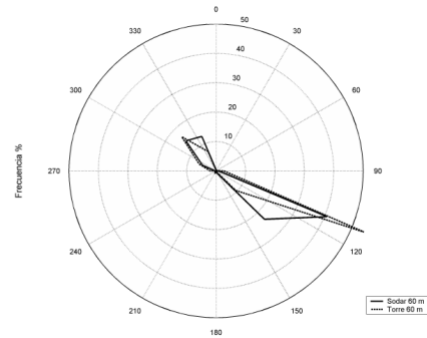


Fig 5.- Rosa de frecuencias de dirección del viento a 60 en SODAR y torre.

Con el objeto de analizar objetivamente las diferencias entre ambos sistemas de medida se han calculado el sesgo y el error cuadrático medio de las series según las siguientes fórmulas:

$$sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i); \quad (1)$$

$$ecm = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2 \quad (2)$$

Donde Y_i es la velocidad de viento medida por el SODAR y X_i es la velocidad de viento medida en la torre para el mismo nivel.

Los resultados obtenidos de estos parámetros se muestran en la siguiente tabla, donde también se ha incluido los resultados obtenidos para el coeficiente de correlación.

Parámetro	Nivel		
	80 m	60 m (0°)	60 m (250°)
Sesgo	0.01	0.06	0.09
Error cuadrático medio	1.44	1.37	1.63
Precisión	1.44	1.37	1.63
Coefficiente de correlación	0.93	0.92	0.92

Tabla 2.- Valores del sesgo, error cuadrático medio y de la precisión para los distintos niveles comparados.

Tal como se puede observar, los valores del sesgo son bastante bajos no tanto como los del error cuadrático medio, que se pueden considerar considerables. Se puede comprobar también como la medida de viento por el anemómetro situado a 250° presenta un comportamiento ligeramente diferente al situado a 0°, debido probablemente, a la influencia de la torre.

En cuanto al sesgo, que en un principio podría parecer bajo, a continuación se ha calculado para las diferentes horas del día. La Figura 6 muestra dicho cálculo, donde se puede apreciar como este varía en función de la hora del día, siendo pequeño y cercano a cero durante la noche y primeras horas del día y decreciendo significativamente durante la tarde y primeras horas de la noche. Este error sistemático negativo supone una infravaloración del viento medido por el SODAR con respecto a los medidos en la torre, tal como han encontrado otros autores (Rogers, 2003).

Este infravaloración, podría haberse atribuido inicialmente a que durante la noche la estabilidad es mayor, siendo menor la turbulencia, y por lo tanto peor la relación señal ruido clave en la determinación de la velocidad a partir del efecto Doppler. Sin embargo los resultados muestran otro fenómeno. En la misma gráfica se ha representado la media de la velocidad de viento para cada hora. Es fácil observar como el sesgo crece en valor absoluto cuando crece la velocidad de viento. Esta región presenta un ciclo diario muy acusado. Otros autores han encontrado aumentos del sesgo con la velocidad (Rogers, 2003; Vogt, 1994), siendo siempre menores las velocidades determinadas por el SODAR para vientos altos.

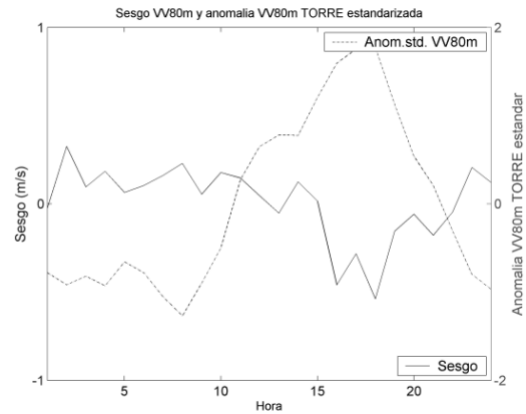


Figura 6.- Sesgo entre las anomalías estandarizadas de la velocidad de viento medida en torre y por el SODAR para el nivel de 80 metros.

Algunos autores (Crescenti, 1997 y Kurzeja, 1993) explican este sesgo negativo debido al propio funcionamiento del SODAR, que al promediar en un volumen, está suavizando los valores de la velocidad, especialmente, cuando la cizalladura del viento es alta. Algo que nunca haría un anemómetro. En este sentido, y relacionado con la evaluación del recurso eólico, cabe reflexionar sobre qué medida será más representativa teniendo en cuenta las dimensiones de un aerogenerador moderno.

La siguiente gráfica muestra la relación encontrada entre las diferencias entre las velocidades medidas por el SODAR y medidas por la torre en relación con las anomalías estandarizadas de la velocidad de viento. En ella se constata la relación existente entre las diferencias entre las medidas y la velocidad de viento.

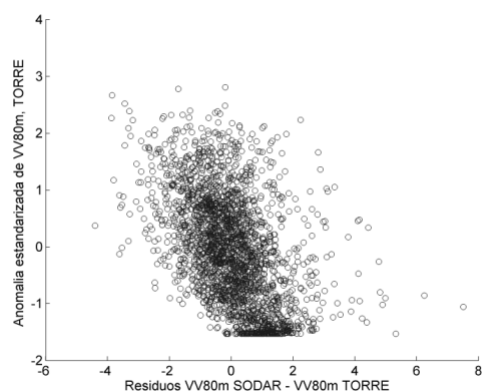


Figura 7. – Comportamiento de los residuos con la anomalía estandarizada del viento a 80 metros.

La razón por la cual el sesgo se mantiene considerablemente bajo durante el medio día a pesar de los vientos altos, podría deberse al propio principio de funcionamiento del SODAR que

necesita de heterogeneidades térmicas para la determinación de la velocidad, tal como señalan algunos autores (Kurzeja, 1994)

Otro aspecto determinante en la eficacia de un sistema SODAR es ser capaz de operar con el ruido ambiental. La siguiente figura muestra el ruido detectado por el sistema SODAR en función de la anomalía estandarizada de la velocidad de viento.

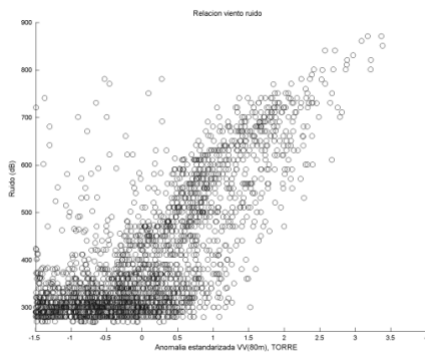


Figura 8. – Comportamiento del ruido de la señal con relación a la anomalía estandarizada del viento a 80 metros.

Es fácil constatar como parece existir una relación casi lineal entre el ruido detectado por el SODAR y la velocidad de viento.

Algunos autores, ya han trabajado sobre como afecta el ruido sobre las medidas SODAR diferenciando básicamente dos tipos de ruido: el ruido activo, debido a fuentes de ruido tales como el tráfico, los aviones, los aerogeneradores, cualquier actividad humana próxima a la antena así como el ruido generado por el propio viento al friccionar con torres, árboles, cables o la propia antena del SODAR. Por otro lado, el ruido pasivo sería el debido a reflexiones del pulso sonoro sobre la topografía, estructuras verticales y que el propio SODAR detecta e interpreta como una fuente estacionaria de ruido, lo que provoca una infravaloración de la estimación de la velocidad (Rogers, 2003, Kurzeja 1994, Vogt, 1993).

En el caso que nos ocupa, al ser un terreno totalmente remoto y encontrarse muy lejos de estructuras que puedan provocar reflexiones no deseadas, parece ser que es el propio viento el que origina el ruido.

Finalmente se muestra una de las principales ventajas del sistema SODAR, la posibilidad de prolongar los perfiles de viento obtenidos mediante torres. Estos perfiles, pueden dar información sobre la dinámica de las capas más altas, que aunque pueden no ser aprovechables desde el punto de vista

eólico, sí pueden ser de utilidad para conocer mejor su comportamiento.

6. Conclusiones

El SODAR utilizado en esta campaña es relativamente portátil. Esta portabilidad lo convierte en un sistema idóneo para:

- evaluaciones preliminares del recurso eólico;
- prolongación en altura de evaluaciones llevada a cabo con torres de altura media-baja;
- completar y verificar espacialmente evaluaciones llevada a cabo mediante torres anemométricas;
- evaluar el recurso en sitios donde las condiciones no permitan el establecimiento de una torre.
- Prolongar verticalmente los resultados sobre perfiles de viento obtenidos mediante torres.

Las medidas obtenidas por el SODAR son comparables a las obtenidas haciendo uso de torres anemométricas. Los valores obtenidos del sesgo son en promedio bajos, aunque aumentan en valor absoluto con la velocidad de viento. El sesgo es negativo para velocidades medias y altas.

Los resultados obtenidos para las direcciones de viento, también son relativamente satisfactorios aunque se observa una clara suavización de los valores observados en la rosa de viento.

Parece claro que para poder utilizar la técnica SODAR como herramienta de evaluación del recurso eólico será necesario conocer con mayor detalle los fenómenos que provocan los sesgos observados. Algunos son propios del principio de funcionamiento del sistema, pero otros pueden ser influencias ambientales locales y propias de la zona de estudio que será necesario evaluar apropiadamente.

El SODAR utilizado se ha mostrado como un sistema bastante robusto, las pérdidas de datos se han debido a pérdidas en el suministro de energía o paradas operativas.

El SODAR, sin embargo, deja de ser operativo cuando el viento es demasiado alto debido al ruido que genera el mismo.

La obra necesaria para la instalación de un SODAR es mucho menor que para una torre, aunque requiere de una mayor protección frente al vandalismo debido al mayor coste de la inversión en instrumentación y del sistema de alimentación. Por otro lado, el sonido de los pulsos puede llegar a

ser molesto si existe población muy cercana a la instalación.

7. Referencias.

Asimakopoulos D. N., T. J. Mouldsley, C. G. Helmis, D. P. Lalas, John Gaynor. "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,

Crescenti, G. H. (1997) A look back on two decades of Doppler SODAR comparison studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 651-671.

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.

Kerzeja, Robert J. (1994) "Comparison of a Doppler Sodar with Bivanes and Cup Anemometers". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 11, 192-

Vogt, S. and P. Thomas. (1994) "Test of a Phased Array Sodar by Intercomparison with Tower Data". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 11, 94-