

# CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS PROVOCADOS POR PARQUES EÓLICOS EN LA RED DE RADARES DE LA AEMET

Beatriz Gallardo<sup>(1)</sup>, Fernando Aguado<sup>(1)</sup> y Félix Pérez Martínez<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Agencia Estatal de Meteorología. Madrid. [bgallardo@inm.es](mailto:bgallardo@inm.es)

<sup>(2)</sup>Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. UPM. [felix@gmr.ssr.upm.es](mailto:felix@gmr.ssr.upm.es)

## Introducción

El empleo de técnicas de producción de energías renovables se ha incrementado notablemente en los últimos años, no sólo debido a sus innumerables ventajas, sino también como consecuencia de los avances tecnológicos. En el caso que nos ocupa, parques de producción de energía eólica, los molinos son cada vez de mayor altura, siendo habitual encontrar molinos de hasta 120 metros, y la tendencia es a que sean aún mayores. Por otro lado España ocupa, tras Alemania, el segundo lugar a nivel mundial en producción de energía eólica, esto es, aproximadamente un 20% de la energía eólica producida mundial.



Fig. 1.- Parque eólico

## Parámetros típicos de aerogeneradores

En la tabla siguiente se resumen algunos de los parámetros más importantes que caracterizan los molinos que integran estos parques eólicos.

Potencia (MW)	1.5	3	5
Longitud aspas (m)	38	45	62
Altura torre (m)	60-110	80-105	100-120
Altura máxima (m)	98-148	125-150	162-182
Velocidad de rotación (rpm)	17	16	12
Velocidad máxima (m/s)	68	76	79

## Efectos en los productos radar

Los parques eólicos situados relativamente cerca de estaciones de radar meteorológico provocan efectos nocivos sobre el comportamiento de los últimos. Por un lado, bloquean la propagación normal de la señal del radar, y por otro provocan ecos de reflectividad falsos. Debido al movimiento de las aspas de los molinos, que pueden llegar a alcanzar hasta  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , las técnicas clásicas de eliminación de clutter, como el algoritmo GMAP [1] implementado en la red actual, no consiguen eliminar los efectos de los molinos en los productos radar.

Estas interferencias provocan que se identifiquen erróneamente tormentas cerca de los parques eólicos, o que se estimen falsas tasas de precipitación acumulada, como se observa en la fig. 2.

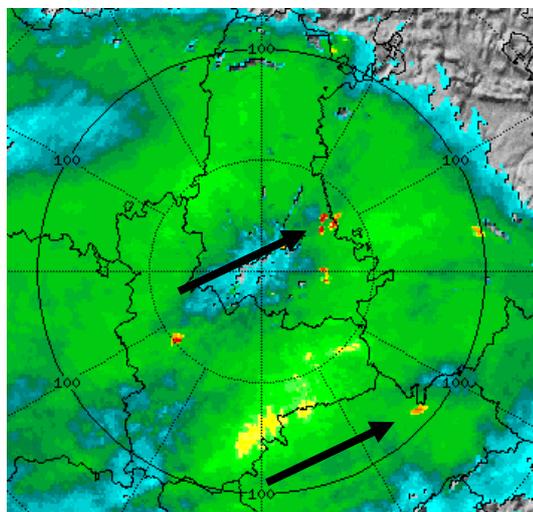


Fig. 2.- Imagen de precipitación acumulada

## Estudio realizado

En este estudio se analiza el contenido espectral doppler [2] de la señal de clutter de los parques eólicos y se trata de caracterizar mediante técnicas específicas de procesamiento espectral. Los experimentos se han realizado con el radar de Valladolid, cuyos productos están afectados por la presencia de varios parques eólicos. En concreto, se analizan aquí los efectos del parque

eólico “El Teruel”, en Palencia, actualmente el más cercano a dicho radar.

Los ensayos practicados tienen como objetivo la recolección de datos en modo normal de operación y en modo *spotlight*. En la siguiente imagen se muestran los datos de reflectividad (dBm) de la selección de la matriz de datos radar estudiada. En ella se aprecian los ecos de reflectividad provocados por la presencia del parque eólico. Dichos datos se tomaron en un día claro. El parque tiene una extensión de casi 10 km en la dirección del radar, y existen otros dos parques eólicos muy cercanos también visibles

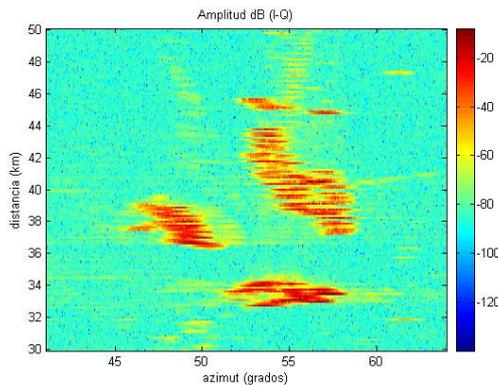


Fig 3.- Representación de la amplitud en dB de los datos IQ utilizados para el estudio.

Dada la geometría del parque eólico y la alta resolución temporal con que se tomaron los datos, es posible apreciar perfectamente las filas de molinos ya que están separadas por una distancia mayor que la resolución en distancia del radar.

A partir de las series de datos IQ grabadas se realizan dos tipos diferentes de procesamiento espectral, calculando el espectro Doppler como funciones del ángulo acimutal y del tiempo.

#### Espectro Doppler en función del ángulo acimutal

En este caso se calcula el espectro Doppler para cada ángulo acimutal, para una determinada celda de distancia. Esto es, se muestra la variación del espectro Doppler del clutter como una función del azimut.

Para la celda de distancia de 40.5 km, el espectro de potencia Doppler es el mostrado en la figura 4. Se observa cómo el espectro Doppler del clutter provocado por los molinos es extremadamente ancho, se intuye por tanto que existe una total ambigüedad debida a la gran velocidad con que se mueven las aspas, que superará por consiguiente a la máxima velocidad no ambigua definida por la frecuencia de repetición de pulsos (PRF):

$$v_{aspas} > v_{max} = \pm \frac{\lambda}{4} PRF$$

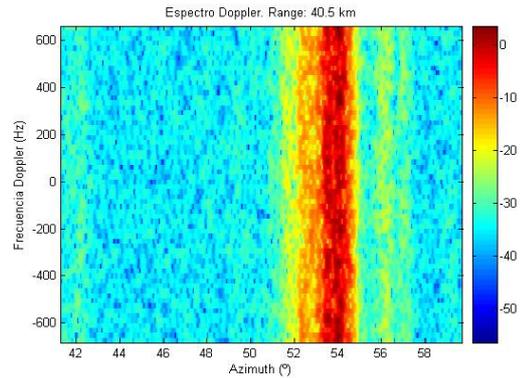


Fig. 4.- Espectro Doppler en función del ángulo.

#### Espectro Doppler en función del tiempo

Se han tomado medidas con la antena del radar apuntando constantemente al parque eólico, modo *spotlight*, a 54.03°. Si se representa la amplitud de una celda a la distancia anterior (un solo molino) en función del tiempo, se observa que ésta es periódica. Dicho periodo coincidiría teóricamente con el de rotación de las palas.

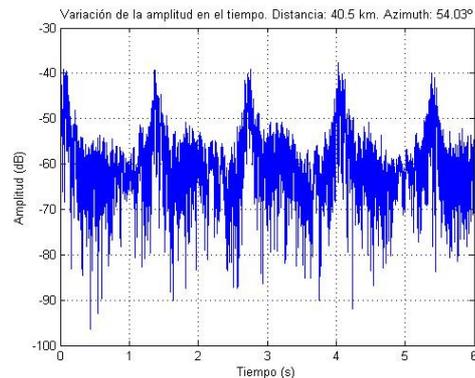


Fig. 5.- Variación de la amplitud en el tiempo.

La figura siguiente muestra el resultado de realizar una transformación en frecuencia sobre la celda de distancia y azimut estudiada. Se observa obviamente la misma periodicidad.

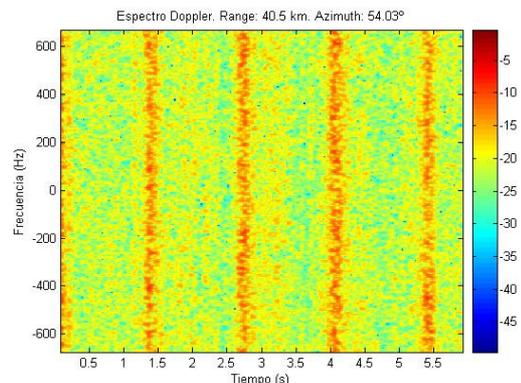


Fig. 6.- Espectro Doppler en función del tiempo.

## Caracterización estadística del clutter de aerogeneradores

A través de la información temporal se ha realizado una caracterización estadística de la señal de clutter provocada por los aerogeneradores.

El centroide Doppler parece seguir aproximadamente las variaciones de amplitud, no así el ancho de banda, que varía muy poco, fig. 7, y se asemeja más a un entorno ruidoso.

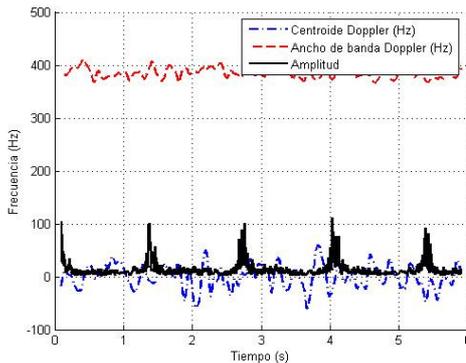


Fig. 7.- Centroide y ancho de banda Doppler.

La autocorrelación de la amplitud de la señal vuelve a mostrar las periodicidades comentadas, figura 8.

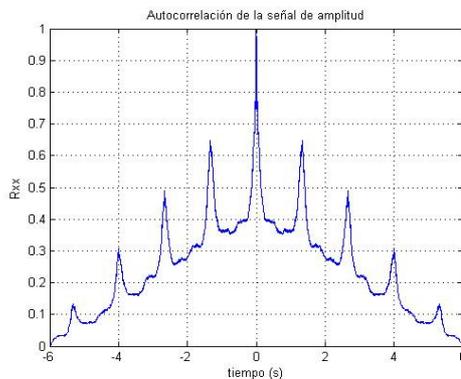


Fig. 8.- Autocorrelación de la señal de amplitud.

Se ha modelado la función densidad de probabilidad de los datos experimentales. Dicha PDF empírica se ha ajustado a las distribuciones Log Normal, Weibull, Rayleigh, Gamma y K utilizando el método de máxima verosimilitud en todos los casos salvo en el de la distribución K, para el cual se utilizó el método de los momentos. Para determinar el mejor ajuste se han calculado los momentos experimentales y teóricos de las distribuciones, comprobándose que el mejor ajuste lo da la distribución K, fig. 9

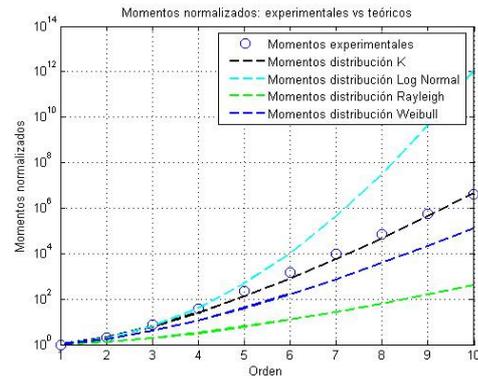


Fig. 9.- Comparación de momentos.

## Simulación de señales meteorológicas.

Se ha simulado la señal de lluvia correspondiente a una tasa de  $R=9\text{mm/h}$ . Para ello, se ha partido del estudio de Zrnic [3], que permite simular el espectro Doppler de señales meteorológicas. Como forma del espectro de potencia se ha tomado la propuesta por [4] y utilizada mayoritariamente para la lluvia:

$$S(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f - f_0}{f_c}\right)^n}$$

La frecuencia de corte,  $f_c$ , es la que define la anchura del espectro. Depende del tiempo de correlación, el cual es función de la tasa de lluvia. La frecuencia  $f_0$  se refiere a la frecuencia Doppler del viento.

En cuanto a la potencia de la señal de lluvia, se ha tenido en cuenta el procesado específico del RVP8 [5], y por tanto considerado los valores de atenuación atmosférica, distancia y dBZO para ese radar, valor de reflectividad de calibración:

$$dBZ = 10 \log \frac{S}{N} + dBZO + 20 \log r + ar$$

Para el cálculo de la reflectividad,  $Z$ , a partir de la tasa de lluvia  $R$ , se ha tomado la relación clásica de Marshall-Palmer, con los valores típicos de  $a=200$  y  $b=1.6$ :

$$Z = aR^b$$

El periodo de grabación de datos en modo *spotlight* fue de sólo 6 segundos. Se ha supuesto, con objetivos meramente ilustrativos, una pequeña variación en la velocidad del viento durante ese tiempo. No obstante, los resultados mostrados a continuación no variarían significativamente suponiendo una variación nula de dicha velocidad. El resultado de la simulación se representa en la fig.10.

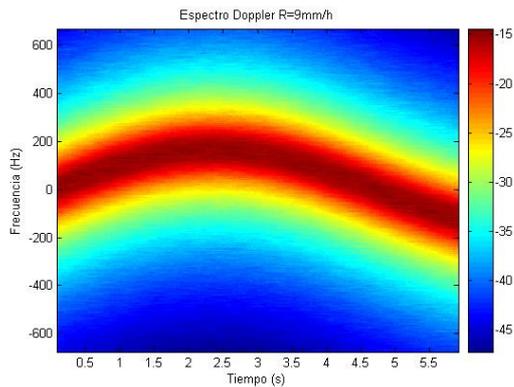


Fig. 10.- Simulación espectral de lluvia.

El paso siguiente supone la suma directa del espectro calculado con los datos grabados del clutter producido por los aerogeneradores en un día claro y el espectro simulado de lluvia. El mecanismo de simulación de señales meteorológicas permite el correcto estudio de diferentes técnicas de filtrado, ya que las condiciones de trabajo permanecen constantes. En la fig. 11 se aprecia cómo el espectro simulado de la lluvia tiene un valor ligeramente inferior al del clutter real del aerogenerador.

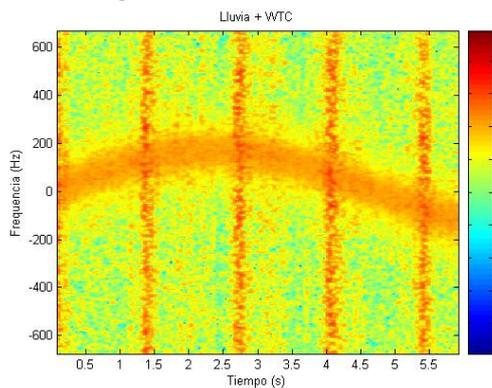


Fig. 11.- Clutter real y lluvia simulada.

### Transformación de Radon

Si tomamos el espectrograma visto en la fig. 6 como una imagen, ésta puede ser manipulada mediante técnicas clásicas de tratamiento de imágenes. Como ejemplo, la transformación de Radon integra las proyecciones de una imagen a lo largo de direcciones específicas.

Dicho espectrograma muestra flashes muy estrechos en tiempo que ocupan todo el espectro. Dichos flashes son interpretados a través de esta transformación como puntos a  $0^\circ$ , como se comprueba en la fig. 12. De este modo se pueden filtrar dichos puntos a  $0^\circ$ , minimizando los flashes que aparecían en el espectrograma. La figura 13 muestra el efecto de dicho filtrado. El nivel de potencia de los flashes se ha visto muy reducido, mientras que el espectro de lluvia, que era de menor nivel, ha permanecido invariable.

Como inconveniente, las componentes más altas de frecuencia son dañadas. Además, se requiere un elevado coste computacional.

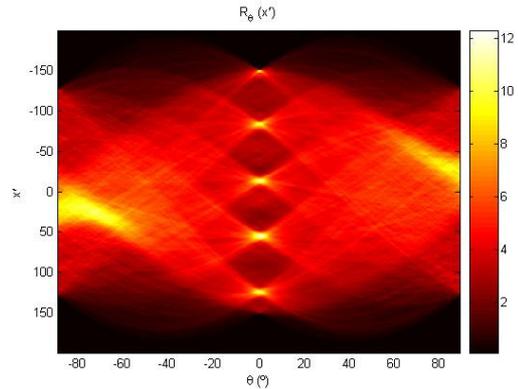


Fig. 12.- Transformada de Radon del espectrograma.

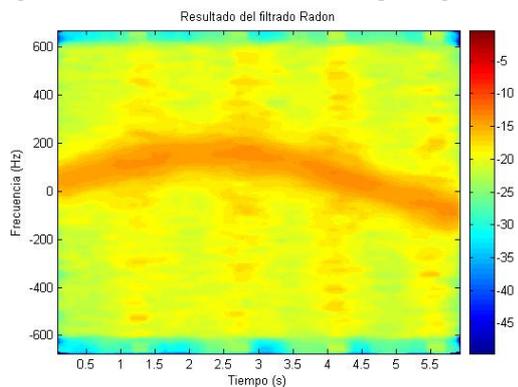


Fig. 13.- Resultado del filtrado.

### Conclusiones

Se ha visto cómo los parques eólicos amenazan seriamente el correcto funcionamiento de los radares meteorológicos. La caracterización del clutter producido por aerogeneradores muestra un espectro totalmente ambiguo, lo cual dificulta las tareas más clásicas de filtrado. Se estudiarán por tanto mecanismos de filtrado adaptativo.

### Referencias.

- [1] Siggia, A. D., and R. E. Passarelli, "Gaussian Model Adaptive Processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation", MS-NR: ERAD3-P-00117, 2005.
- [2] Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, "Doppler Radar and Weather Observations", Dover Pub., 1993.
- [3] Zrnic, D. S., 1975: "Simulation of weatherlike Doppler spectra and signals". J. Appl. Meteor., 14, 619-620.
- [4] J. L. Eaves y E. K. Reedy. "Principles of Modern Radar", Ed. Van Nostrand Reinhold Co. New York, 1987.
- [5] RVP8 Digital IF Receiver & Signal Processor User's Manual. Marzo 2007. SIGMET