

# Energía eólica y radares meteorológicos en España

BEATRIZ GALLARDO HERNANDO

GRUPO DE MICROONDAS Y RADAR (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID)

La energía eólica ha demostrado ser una fuente de producción renovable de energía eficiente, tanto en términos energéticos como económicos. Sin embargo no todo son ventajas, ya que la proliferación de parques eólicos en la geografía española suscita diversos problemas. Uno es el impacto visual y medioambiental que los parques eólicos producen en los parajes en los que están instalados. Otro, éste ya en un plano más técnico, el que estas enormes estructuras provocan efectos nocivos en la transmisión de señales. Por citar algunos ejemplos, los sistemas de difusión de televisión digital y diversos sistemas de radar se ven afectados por los aerogeneradores.

## La producción de energía eólica en España

Como se puede ver en la Fig.1, el crecimiento de la potencia instalada eólica en España ha sido prácticamente exponencial. En cuanto a la importancia relativa en el mercado eléctrico español, cabe reseñar que ya se trata de la

tercera tecnología en cobertura de la demanda, con más de un 11% de penetración. De hecho, en días muy ventosos se han batido récords absolutos en los que más de la mitad de la demanda de energía eléctrica era cubierta por la eólica. En España, hoy existen más de 670 parques eólicos.

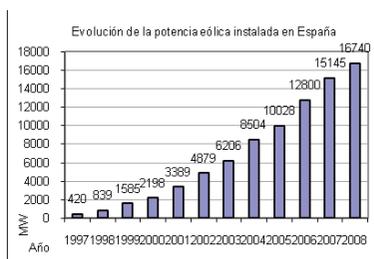


Figura 1: Evolución de la potencia eólica instalada en España. Fuente: Observatorio eólico AEE.

## Aerogeneradores y radar

Varios parques eólicos instalados en España están afectando a los productos generados por la Red de Radares Meteorológicos de la AEMET.

Un aerogenerador típico está compuesto de tres componentes principales, la torre, las aspas y el rotor. La torre produce un retorno constante de velocidad doppler

cero, por lo que es fácilmente minimizada mediante cualquier algoritmo de cancelación de clutter. En cambio, el retorno de las aspas es variable y función del ángulo de giro. Además, la velocidad en la punta de las aspas puede

Modelo	G-58	G-83	G-90
Potencia (kW)	850	2000	2000
Long. aspas (m)	28.3	40.5	44
Altura torre (m)	44-71	67-78	67-100
Velocidad (rpm)	15-31	9-19	9-19
Vel. max (m/s)	91	80.5	87.5

Tabla 1: Parámetros típicos de un aerogenerador. Fuente: GAMESA

fácilmente superar la máxima velocidad no ambigua del radar, con valores de hasta 90 km/h, lo cual dificulta enormemente su detección y eliminación. Los parámetros típicos de un aerogenerador se muestran en la tabla 1.

## Productos meteorológicos afectados

Existen varios tipos de distorsión de los productos de radar meteorológico provocados por aerogeneradores. En primer lugar, los aerogeneradores pueden provocar zonas de sombra y por tanto errores en la precipitación estimada. Esto es significativo para distancias menores a unos 5 km. En segundo lugar, las partes estacionarias generan señales de clutter que pueden ser muy potentes y por tanto llegar a saturar el receptor. En tercer lugar, las señales provenientes de la reflexión en las aspas dan lugar a desplazamientos doppler que pueden estar distribuidos por todo el espectro. Esto provoca errores en la lectura de la velocidad del viento y ecos de reflectividad falsos.

Estas distorsiones hacen que fallen los algoritmos meteorológicos y que den falsas estimaciones de precipitación acumulada, firmas de mesociclón incorrectas, e identificación errónea de tormentas y su seguimiento. La Fig. 2 muestra una imagen PPI de acumulación del radar de Valladolid donde se pueden apreciar claramente numerosos parques eólicos.

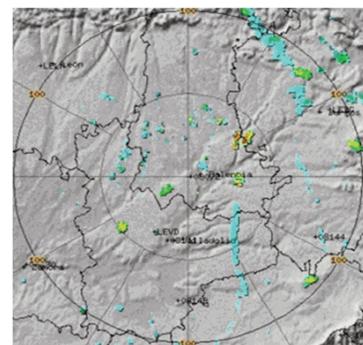


Figura 2: Imagen PPI de acumulación del radar de Valladolid. Fuente: AEMET

## Estudio de datos experimentales

Se han recogido datos de radares iluminando a parques eólicos para poder estudiar con detalle las diferencias entre el clutter de aerogeneradores y las señales meteorológicas.

En la Fig. 3 se muestra una representación de la matriz de datos estudiada. Se trata de una matriz de reflectividades (en dBZ) recogida en un día claro con el radar de Valladolid. Se pueden apreciar las filas de aerogeneradores de tres parques eólicos situados entre 30 y 50 km del radar. Estos datos corresponden con la grabación de las series IQ de un sector acimutal que contiene el parque eólico en cuestión durante una vuelta de la antena a la velocidad de 12°/s en su elevación más baja, 0.5° y PRF operativa más alta, 1346 Hz.

En primer lugar se grabaron las series de datos IQ del radar en un día claro. Calculando el espectro *doppler*, de velocidades, para cada ángulo de acimutal, para una celda de distancia particular, es posible estudiar el contenido espectral en función del ángulo. El resultado se muestra en la Fig. 4. Puede observarse cómo existe una sola turbina en dicha celda de distancia, y que sus aspas producen un desplazamiento *doppler* entre -600 y 400 Hz, aunque hay energía dispersada por todo el espectro. En este punto es importante considerar la Fig. 5, ya que la posición del aerogenerador respecto al radar no es perpendicular y por tanto el desplazamiento *doppler* no es máximo.

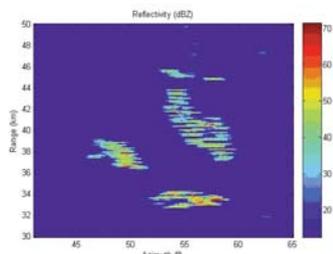


Figura 3: Matriz de reflectividades de los datos bajo estudio.

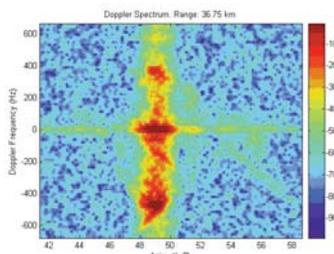


Figura 4: Espectro *doppler* vs acimut



Figura 5: Aerogenerador y LOS

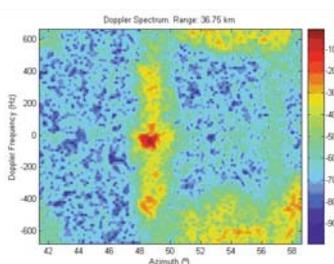


Figura 6: Espectro *doppler*: lluvia y aerogenerador

A continuación, se grabaron las series IQ en un día lluvioso. En la Fig. 6, ambos espectros, aerogenerador y lluvia, están claramente diferenciados. El primero es mucho más ancho frecuencialmente y además ocupa pocas celdas en acimut. Es importante advertir que no se utilizó una PRF dual como sí se hace en condiciones reales operativas, por lo que la señal de lluvia aparece ambigua en el espectro. En ambos casos, Fig. 4 y Fig. 6, se reconoce claramente el retorno de la torre a velocidad *doppler* cero, de gran potencia. En el segundo caso, debido a la atenuación producida por la lluvia, el retorno del aerogenerador es menos potente, pero de las mismas características que el primero. Es importante considerar que a partir de una velocidad del viento umbral, la velocidad de rotación de las aspas de los molinos es constante.

En segundo lugar, se recogieron datos IQ con el modo de exploración experimental denominado *spotlight*. En este caso, se paró la antena del radar para la obtención de datos del parque eólico con un tiempo de iluminación muy superior y por tanto con información temporal sobre su com-

portamiento. Los datos de elevación y PRF son los mismos que en el caso anterior; entonces, la energía reflejada por las aspas de los molinos va a aparecer como una función del ángulo de visión, la velocidad y la RCS.

En la Fig. 7 aparecen varios flashes periódicamente cuyo desplazamiento *doppler* es muy ancho. Su aspecto es explicado por el hecho de que la suma de las diferentes partes de un asa es sólo coherente cuando dicha asa es perpendicular a la línea de vista del radar. Si no hay tal perpendicularidad, la suma es destructiva como consecuencia de la variabilidad de la fase. Justo en la punta del asa los vectores de las señales reflejadas no son suficientes como para cancelar la señal, por lo que aparece un pico, visible en la Fig. 8: al describir el asa una circunferencia, una función seno aparece en el espectrograma, como cualquier movimiento armónico simple.

La razón de que los desplazamientos negativos en *doppler* (aspas alejándose) sean de menor potencia reside en las diferencias en la RCS entre las caras del asa, y también en un posible efecto de sombra sobre el haz radar. Considerando el tiempo que pasa entre los picos es posible estimar la velocidad de rotación del aerogenerador en 15 rpm. Como el desplazamiento *doppler* máximo es de 400 Hz, la velocidad radial máxima es de 10.7 m/s, lo cual corresponde, considerando las especificaciones de la tabla a un ángulo de visión del radar sobre el aerogenerador de 76°.

Desgraciadamente, en la mayor parte de los casos la energía reflejada por las aspas está distribuida en todo el espectro *doppler*, es totalmente ambiguo (ver Fig. 7) el espectro se solapa a un lado y otro del margen medible de frecuencias *doppler*.

Tomando los flashes más potentes, la velocidad de rotación del aerogenerador cuyo comportamiento con el tiempo se ha representado en la Fig. 8, es de 20 rpm. En cuanto al significado de los *flashes* menos potentes existen varias posibilidades. Primera, son las aspas en una posición diferente a la perpendicular ya que parecen tener el mismo periodo. Segunda, existe otro aerogenerador en la misma celda de resolución con la misma velocidad de rotación. Y por último, son efecto de los lóbulos laterales de la antena. Este punto es el más probable, y por tanto en la mayor parte de los casos hasta los instantes de tiempo sin *flashes* están contaminados.

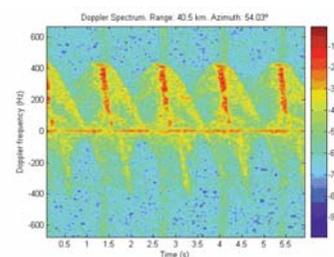


Figura 7  
Espectro *doppler* vs tiempo

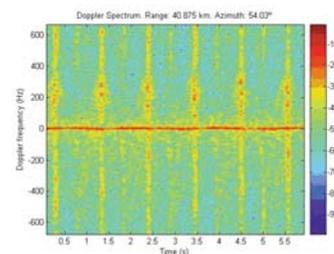


Figura 8  
Espectro *doppler* vs tiempo

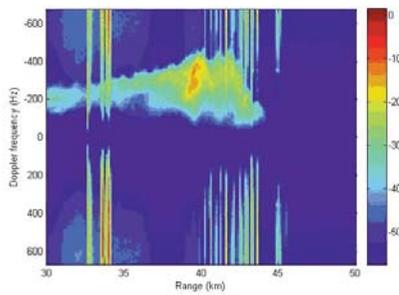


Figura 9: *Doppler* vs distancia

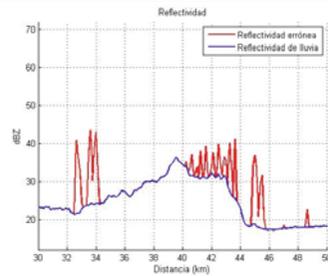


Figura 10: Medida de la frecuencia *doppler* en un radar meteorológico contaminado por un parque eólico en condiciones de lluvia

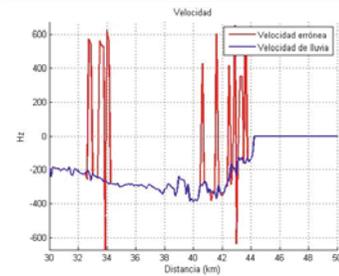


Figura 11: Medida de la reflectividad en un radar meteorológico contaminado por un parque eólico en condiciones de lluvia

Por último se muestra una imagen distancia-*doppler* en la que se solapan espectros de lluvia y de los parques eólicos estudiados. Para la construcción de esta imagen se utilizaron datos *spotlight* y se analizó el espectro medio en cada celda de distancia. El *clutter* estático, correspondiente a frecuencias Doppler cercanas a cero fue corregido.

Si representamos el error cometido en las medidas de la reflectividad y de la velocidad del viento, comprobamos cómo éste puede llegar a ser ciertamente preocupante, figuras 10 y 11.

### Conclusiones

Se ha intentado reflejar en este artículo un esbozo sobre los efectos que los parques eólicos tienen sobre las medidas de la precipitación de los radares meteorológicos. Se han presentado resultados de mediciones experimentales. El impacto de los parques eólicos en los sistemas radar en general es novedoso y actualmente se empiezan a estudiar diversas técnicas de procesado de señal que permitan minimizar sus efectos nocivos.



### El viento y la montaña

Se denomina viento al aire en movimiento. La veleta señala la dirección de donde viene el viento. El camino hacia donde va lo marca el ondear de la bandera, el humo de la chimenea, la manga de la pista en el aeropuerto... La velocidad de las ráfagas se registra con el anemómetro de cazoletas.

El viento sopla desde las altas presiones (anticiclón) hacia las bajas presiones (borrasca) indicándose en los mapas sinópticos del tiempo el tipo de circulación atmosférica en bajos niveles.

La presencia y perfil de determinados accidentes geográficos altera la regularidad de los flujos de aire en las proximidades de las cordilleras. La ladera que se enfrenta al viento húmedo (barlovento) determina estancamiento, con nubes y lluvias; mientras que la ladera opuesta (sota-

vento) ocasiona efecto foehn y se abren grandes claros con nubes medias de tipo lenticular. Los valles en zonas montañosas refuerzan los flujos de viento y aumentan su velocidad. En los periodos de calma atmosférica (ausencia de viento) se origina cielo despejado y soleado en la cima de la montaña y, en ocasiones, nieblas al pié de la montaña.

Próximo a las montañas y siguiendo el carácter del tiempo, el aire puede presentar aspecto térmico (frío o cálido) higroscópico (húmedo o seco) circulatorio (laminar o turbulento)...

La Península Ibérica, con sus cordilleras, mesetas, valles y llanuras aparece situada entre latitudes templadas: 45° a 35° Norte y entre longitudes que abarcan de 10° Oeste a 5° Este. Las zonas costeras, según sean rocosas o llanas, son también muy sensibles al oleaje provocado por los vientos.

La cuenca atlántica presenta su mayor actividad de nubes y lluvias aportadas por el viento en otoño e invierno, cuando las borrascas del frente polar discurren a más bajas latitudes. La zona mediterránea es más inestable y activa, con grandes aguaceros en otoño por embolsamiento de aire frío y denso en altos niveles de la atmósfera.

El estrecho de Tarifa separa España (Europa) de Marruecos (África) con una franja de mar de unos 14km de ancho en su zona más angosta que pone en contacto dos mares: Atlántico (Golfo de Cádiz) y Mediterráneo (Mar de Alborán) donde soplan vientos de poniente (W) y