

INTERFERENCIAS DE LOS PARQUES EÓLICOS EN EL SERVICIO DE TV.

Alejandro Calo Casanova⁽¹⁾, Miguel Calvo Ramón⁽¹⁾, Leandro de Haro Ariet⁽¹⁾, Pedro Blanco-González⁽²⁾

{acalo, miguel, leandro}@gr.ssr.upm.es, ⁽²⁾pedro.blanco@iberdrola.es

⁽¹⁾Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.

⁽²⁾Iberdrola S.A.

Abstract.- This paper analyzes the problematic of the interferences created by wind farms. Wind turbines may cause interferences to television and microwave signals due to reflections and diffractions of those signals from both the tower (stationary) and the blades (non-stationary). The ITU Radiocommunication Assembly, on the BT 805 [1], specifies a simplified model of impairment caused to television reception by a single wind turbine considering only free space propagation. This paper shows the extensions to a multiple turbine case, the inclusion of other propagation models (plain earth and ITU-R P.1546) and presents more accurate models to obtain the scattering produced by a wind turbine, as well as their implementation on friendly-use software.

I. INTRODUCCIÓN

Los aerogeneradores instalados en los Parques Eólicos actúan como elementos dispersores de las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia que inciden sobre ellos. Uno sus potenciales efectos es producir ecos en la señal, que degraden la provisión de algunos Servicios de Telecomunicaciones, tales como la difusión de TV.

A través de la Recomendación BT 805, la ITU-R establece los límites tolerables de la interferencia producida por un aerogenerador en el servicio de TV analógica. Esta Recomendación considera la dispersión producida por una sola pala del aerogenerador, sin tener en cuenta la dispersión causada por el resto de partes que lo componen, ni por la presencia de varios aerogeneradores.

Este artículo resume los nuevos cambios realizados en la línea de trabajo descrita en [11]. Se extiende la Recomendación BT 805, a fin de obtener un modelo más detallado de la dispersión producida por un aerogenerador, que incluya la dispersión de cada una de las partes que lo compone. Junto con las extensiones de dicha Recomendación ya hechas para considerar la interferencia causada por varias turbinas, así como distintos modelos de propagación, el nuevo modelo de dispersión ha sido integrado en un programa que se viene desarrollando en Matlab, cuyo objetivo es calcular la interferencia total causada por un parque eólico en el servicio de TV analógica y digital.

II. MODELO ITU-R BT 805

El modelo de la recomendación ITU-R BT 805 considera un diagrama de reflexión como el mostrado en la Figura 1, con un lóbulo principal cuya anchura de haz es inversamente proporcional a la anchura de las aspas (W , en m) y una envolvente de lóbulos secundarios constante de -10 dB respecto al principal. El valor máximo del factor de reflexión

(RF) depende de la superficie de las aspas (A , en m²) de forma que puede expresarse su diagrama como:

$$RF(\alpha, A, W, \lambda) = (20 \log(A/\lambda) - 60) + \max(-10, 20 \log \frac{\sin(\pi \times W/\lambda \times \sin \alpha)}{\pi \times W/\lambda \times \sin \alpha}) \quad (1)$$

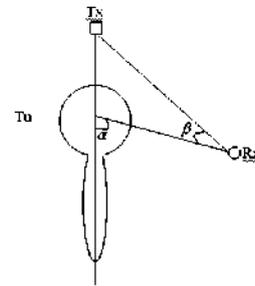


Figura 1. Modelo empleado por la ITU-R BT 805

Según la BT 805, la intensidad de campo interferente en el receptor (FSR) se obtiene a partir de la intensidad de campo incidente en la turbina (FSWT) multiplicada por el diagrama de reflexión y atenuada por las pérdidas de propagación hasta el receptor:

$$FSR = FSWT + RF(\alpha, A, W, \lambda) - 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (2)$$

Al valor obtenido, se le aplica un término corrector debido a la directividad de la antena receptora [5].

La recomendación también establece la relación necesaria entre la señal deseada y la interferente, en función del retardo, para una recepción adecuada de la TV analógica como se muestra en la Figura 2.

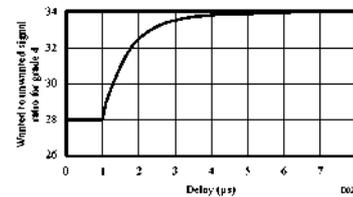


Figura 2. Relación C/I en función del retardo

III. EXTENSIÓN DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R BT 805

A. Extensión a múltiples aerogeneradores

Para tener en cuenta las interferencias causadas por varias turbinas se ha dividido la curva C/I en distintos intervalos (Figura 3). Las interferencias que pertenecen a un mismo

intervalo se sumarán coherentemente y aquéllas con retardos superiores a 2.4 μ s se sumaran de forma no coherente, teniendo en cuenta su fase (proporcional a la distancia eléctrica recorrida).

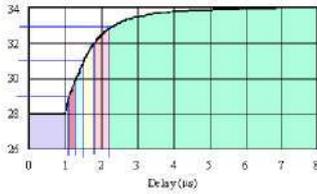


Figura 3. Relación C/I en función del retardo dividida en tramos

Por tanto, suponiendo antenas isotrópicas y propagación en espacio libre, la relación C/I o CIR para el k-ésimo aerogenerador vendría dada por:

$$CIR_k = P_{rd} - P_{ri,k} = 20 \log \left(\frac{4\pi d T_x T_{u_k}}{\lambda} \right) + \quad (3)$$

$$+ 20 \log \left(\frac{4\pi d T_{u_k} R_x}{\lambda} \right) - 20 \log \left(\frac{4\pi d T_x V}{\lambda} \right) -$$

$$- RF'(\alpha_k) - X(\beta_k) = 20 \log(d T_u T_x) + 20 \log(d R_x T_u) -$$

$$- 20 \log(d R_x T_x) - RF(\alpha) - X(\beta)$$

La interferencia total cauda por todos los aerogeneradores en un tiempo t, sería:

$$\left(\frac{C}{I} \right)_t^{-1} = \sum_{k'} \left(\frac{C}{I_{k'}} \right)^{-1} \quad \forall k' / delay \in t \quad (4)$$

B. Otros métodos de propagación

Se considerará el modelo de tierra plana, el cual supone que la señal que aparece en el receptor es el resultado de la superposición de un rayo directo entre transmisor y receptor, y uno reflejado (Figura 4). El modelo tiene en cuenta las alturas del trasmisor, receptor y aerogenerador.

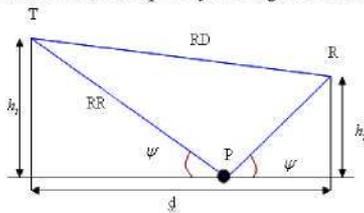


Figura 4. Modelo de propagación en tierra plana

La CIR resultante teniendo en cuenta dicho modelo de propagación viene dada por:

$$CIR = Prd - Pri = 40 \log(d T_u T_x) + 40 \log(d R_x T_u) \quad (5)$$

$$- 40 \log(d R_x T_x) - RF(\alpha) + 20 \log(h_{T_x} \cdot h_{R_x})$$

$$- 20 \log(h_{T_u} \cdot h_{R_x}) - 20 \log(h_{T_u} \cdot h_{T_x}) - X(\beta) \quad dB$$

El modelo de tierra plana solo es válido si la separación entre transmisor y receptor es suficientemente grande. En caso contrario, suele utilizarse un modelo de propagación de dos tramos: en el primero se considera propagación en espacio libre, y a partir de cierta distancia (punto de ruptura)

se supone que las pérdidas aumentan según el modelo de tierra plana. La distancia del punto de ruptura es:

$$2\pi \frac{h_{T_x} h_{R_x}}{\lambda} \quad (6)$$

Para terrenos con orografía muy accidentada, se utilizará un modelo de propagación como el descrito en la Recomendación ITU-R BT 1546 [2]. En esta situación, es necesaria la información de altimetría proporcionada por un modelo digital del terreno. En nuestro caso se usarán los datos de libre disposición del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [6].

C. Extensión del modelo de dispersión

El modelo descrito en la Recomendación ITU-R BT.805 sólo tiene en cuenta la dispersión electromagnética producida por una pala, no considerando así la dispersión producida por el resto de palas y por la torre del aerogenerador.

Una aproximación más realista al fenómeno de la dispersión, consiste en dividir el aerogenerador en sus principales centros de dispersión (ver Figura 5), analizar la dispersión causada por cada uno de ellos, considerando los distintos movimientos que estos pudieran realizar y, finalmente, superponer dichos efectos [9].

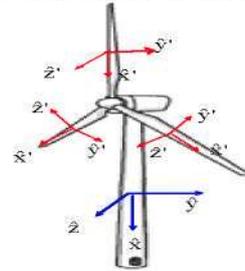


Figura 5. Principales centros de dispersión de un aerogenerador.

Para el análisis de la dispersión será de utilidad introducir el concepto de SCR, que permitirá definir la relación entre el campo incidente y el campo dispersado independientemente de la distancia a la que ambos campos sean medidos:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|\vec{E}^s|^2}{|\vec{E}^i|^2} \right] = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|\vec{H}^s|^2}{|\vec{H}^i|^2} \right] \quad (7)$$

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para el cálculo de la SCR de cada uno de los centros de dispersión del aerogenerador (palas y torre).

Para calcular la SCR de cada pala, éstas se modelan como un plano conductor perfecto de dimensiones adecuadas, siendo "a" y "b" el ancho y largo respectivamente de cada pala (Figura 6). A continuación, se colocan dos sistemas de referencias, uno móvil ligado a la pala y otro fijo ligado a la posición del aerogenerador. De esta forma, los principales giros que una pala puede realizar (giro alrededor del eje z debido a la fuerza del viento, giro alrededor del eje x de la torre orientándose en la dirección del viento y giro alrededor del eje x' para controlar la velocidad de rotación), vendrán caracterizados por una matriz de giro, siendo equivalentes a un cambio en la posición relativa entre ambos sistemas de referencias y, desde la perspectiva del sistema de referencia ligado a las palas, a un cambio en la dirección de polarización y de incidencia. Finalmente, a partir de los

nuevos ángulos de incidencia y polarización, la situación es equivalente a resolver el problema electromagnético mostrado en la Figura 6 [7]:

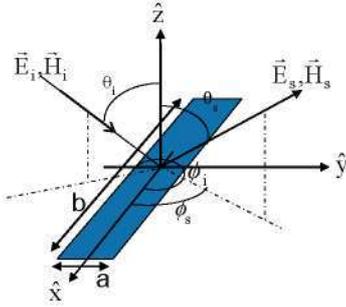


Figura 6. Aproximación de una pala mediante un plano conductor perfecto

Aquí (E_i, H_i) son las componentes del campo eléctrico y magnético, (θ_i, ϕ_i) determinan la dirección de incidencia y (E_s, H_s) son las componentes del campo dispersado, siendo el campo resultante igual a $E_i + E_s$. El campo dispersado se calcula a partir de las corrientes superficiales inducidas por la onda incidente sobre la superficie de las palas (despreciando los efectos de borde), considerando las aproximaciones hechas por la Física Óptica.

Una vez que se obtengan los campos dispersados por cada pala, la SCR del conjunto sobre el plano paralelo al suelo (plano que contiene la polarización horizontal de las antenas de TV), puede expresarse como la superposición de la SCR de cada centro de dispersión.

Como se ha comentado anteriormente, la Recomendación ITU-R BT.805, no considera la dispersión producida por la torre del aerogenerador. Con objeto de obtener una mejor aproximación de la dispersión, se analizará la SCR de la torre (equivalente a un cilindro metálico de altura "l" y radio "a").

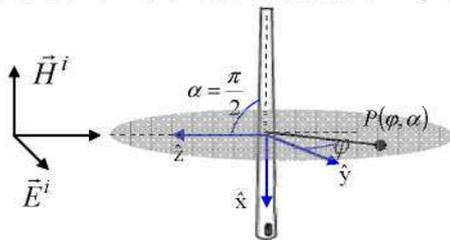


Figura 7. Aproximación de la torre mediante un cilindro circular de conductor perfecto

A partir de la SCR de un cilindro de longitud infinita (asumiendo incidencia normal y polarización horizontal) [8]:

$$\sigma_{\infty} \approx \frac{2\lambda}{\pi} \left| \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n \tilde{B}_n \cos n\phi \right|^2, \quad B_n = -\frac{J'_n(\beta a)}{H_n^{(1)'}(\beta a)} \quad (8)$$

La SCR de un cilindro de longitud de l puede expresarse como [7]:

$$\sigma_l = \frac{2l^2}{\lambda} \sigma_{\infty} \quad (9)$$

Para obtener un valor numérico de la SCR, la serie infinita se aproxima por el sumatorio de los "n" primeros términos. Para un valor de "n" del mismo orden de magnitud que "2βa", el error cometido sería del 4% [9].

Una vez analizado cada centro de dispersión, la SCR del aerogenerador puede expresarse a partir de la superposición de los resultados obtenidos.

IV. VALIDACIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN

Para comprobar la validez de los modelos de dispersión (SCR) descritos en la sección anterior, se han comparado los valores teóricos de la SCR de cada uno de los centros de dispersión de una turbina, con los obtenidos a través del programa de simulación electromagnética FEKO v.5.3

Para una pala (resultados mostrados en la Figura 8), de dimensiones 40x2 m de largo y ancho respectivamente, puede observarse la similitud entre los resultados obtenidos tras la simulación y los resultados del modelo teórico.

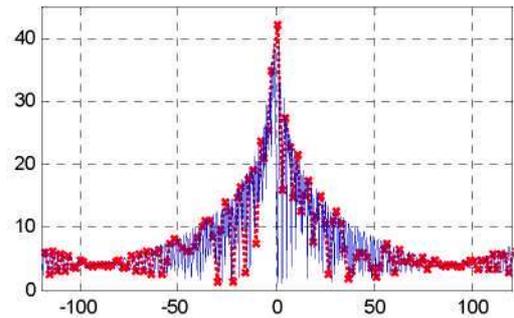


Figura 8. SCR de la pala obtenida a partir del modelo teórico (-) y del proceso de simulación (·x·x·)

En el caso de la torre del aerogenerador, su comportamiento electromagnético es equivalente al de un cilindro circular conductor perfecto bajo incidencia normal. En la simulación se ha utilizado un cilindro de radio 1m y longitud 80m. En la Figura 9, se observa la similitud entre los resultados obtenidos tras la simulación y los resultados del modelo teórico anterior.

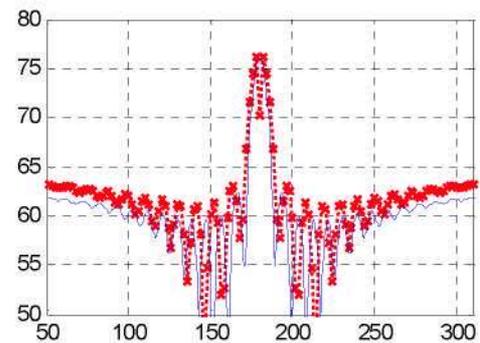


Figura 9. SCR de la torre obtenida a partir del modelo teórico (-) y del proceso de simulación (·x·x·)

V. IMPLEMENTACIÓN SOFTWARE

Se ha desarrollado un programa que permite analizar la dispersión producida por un parque eólico. El programa muestra al usuario el perfil de potencia-retardo de cada una de las señales que llega al receptor, así como el valor mínimo del cociente C/I necesario en el receptor para poder reconstruir la señal de TV correctamente. En caso de que quiera comprobarse la relación C/I en distintas ubicaciones (útil en zonas pobladas), el programa permite reubicar tanto el transmisor como el receptor.

VI. COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO DE DISPERSIÓN DE LA ITU-R BT 805 Y EL MODELO PROPUESTO

Las Figura 11 y 12, muestran los perfiles “potencia-retardo” obtenidos siguiendo el modelo propuesto por la Recomendación ITU-R BT 805 y el modelo teórico descrito en la sección anterior. Los datos usados en las simulaciones corresponden a los del parque eólico de Maranchón (España). Dichas figuras se han obtenido con el software que se ha desarrollado.



Figura 10. Parque eólico de Maranchón (“x” aerogeneradores).

Los parámetros con los que se han realizado las simulaciones han sido:

- Superficie de las palas: 20 m².
- Ancho de las palas: 0.5m.
- Frecuencia: 800MHz.
- Altura de la turbina: 30m.
- Altura del transmisor: 40m.
- Altura del receptor: 10m.

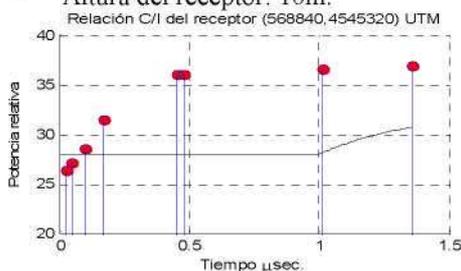


Figura 11. C/I según la Recomendación ITU-R BT 805

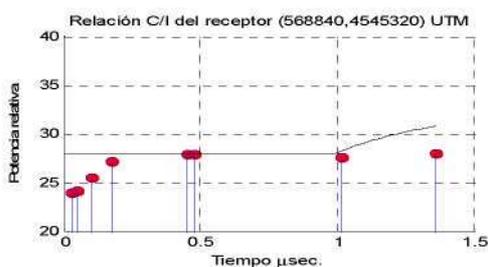


Figura 12. C/I considerando los principales centros de dispersión del aerogenerador

En la Figura 12, se aprecia una notable reducción de la relación C/I cuando se tienen en cuenta la dispersión causada por las palas, y por la torre. La línea continua representa el nivel mínimo de C/I que garantiza una correcta recepción del servicio de TV.

VII. RESULTADOS

La medida de la relación C/I en función del retardo, causada por las interferencias, se puede obtener a partir de una medida típica del perfil potencia – retardo del canal. Para las bandas de frecuencia de TV este tipo de medida se implementa en algunos instrumentos como el ProLink de

Promax. Para realizar la medida de ecos se requiere una señal TDT y, desafortunadamente, al no haber aún cobertura digital en Maranchón, se ha recurrido al uso de un generador de señal (SFQ de Rhode&Swarz) y de un amplificador de potencia para realizar las medidas.

Los datos obtenidos tras las medidas serán comparados con los dados por los modelos teóricos. Esto permitirá un ajuste más fino de los parámetros del modelo.

VIII. CONCLUSIÓN

Para obtener un cálculo más exacto de las interferencias causadas por parques eólicos se ha desarrollado un modelo de dispersión más detallado que el propuesto por la Recomendación ITU-T BT 805, se han extendido las especificaciones de la BT 805 a señales DVB-T y se ha tenido en cuenta las interferencias causadas por varias turbinas, así como modelos de propagación más realistas (tierra plana, doble pendiente y, para orografías accidentadas, ITU-R P 1546). Todo ello ha sido integrado en un software capaz de automatizar los cálculos, calcular el perfil potencia-retardo y mostrar el perfil de alturas en puntos de prueba seleccionados. Los resultados del modelo teórico de dispersión han sido contrastados con los obtenidos utilizando software comercial de simulación electromagnética.

Se ha propuesto el ajuste de los parámetros del modelo de la ITU-R BT 805 a partir de medidas del perfil potencia-retardo de los ecos de dispersión de las turbinas. Actualmente se va a realizar una segunda campaña de medidas en Maranchón, con el objeto de recopilar un mayor volumen de datos que permita verificar los modelos desarrollados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla a cargo del proyecto PROFIT FIT-330210-2007-70

REFERENCIAS

- [1] ITU-R BT 805 “Assesment of impairment caused to television reception by a wind turbine”
- [2] ITU-R P.1546-2 Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz
- [3] “Transmisión por radio”. José María Hernando Rábanos. Madrid, Editorial Universitaria Ramón Areces, 2006
- [4] Digital terrestrial television receivers for the DVB-T system -- Part 1: Baseline receiver specification. CENELEC Standard EN 62216-1:2002.
- [5] ITU-R BT 419 “Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting”
- [6] SRTM 90m Digital Elevation Data : <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- [7] C. A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, J. Wiley & Sons 1989.
- [8] O. Einarsson, R.E. Kleinman, P. Laurin and P.L.E. Uslenghi (1966) “Studies in Radar Cross Sections L”, The University of Michigan Radiation Laboratory Rep. No. 7133-3-T, Ann Arbor, Michigan.
- [9] G. T. Ruck , D. E. Barrick , W. D. Stuart and C. K. Krichbaum, “Radar Cross-Section Handbook”, New York: Plenum, 1970.
- [10] Nicholas C. Currie, “Radar Reflectivity Measurement: Techniques and Applications”, Artech House 1989.
- [11] Castroviejo B et al. “Efecto de las Interferencias de Aerogeneradores en TV”, Universidad Politécnica de Madrid, Dpto de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones.
- [12] Iñigo Etayo et al. “Análisis de la Influencia de los Parques Eólicos en la Transmisión de Señales de Radiofrecuencia”, Universidad Pública de Navarra, Dpto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- [13] C. Fernández et al. “Herramienta Software para el Análisis de la Influencia de Aerogeneradores en los Servicios de Telecomunicación”, Universidad del País Vasco, Dpto de Electrónica y Telecomunicaciones.