

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y
DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA
XXVIII CONVOCATORIA PREMIOS
“Ingenieros de Telecomunicación”

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARQUES EÓLICOS EN
LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS, Y EN
LA PRESTACIÓN DE SERVICIO DE SISTEMAS TERRENALES
DE RADIO-NAVEGACIÓN AÉREA CERCANOS**

Autor: Iñigo Etayo Otermin

Tutor: Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Fecha y lugar de presentación: Pamplona, 13 de Septiembre de 2007

ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.....	3
1.1 ANTECEDENTES Y PUNTO DE PARTIDA	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 DESARROLLO.....	4
1.3.1 <i>Análisis de la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas</i>	5
1.3.2 <i>Descripción de los sistemas terrenales de radio-navegación aérea</i>	7
1.3.3 <i>Análisis de la influencia de los parques eólicos en la prestación de servicio de sistemas terrenales de radio-navegación aérea cercanos</i>	8
1.4 CONCLUSIONES.....	8
2. ORIGINALIDAD DE LA TEMÁTICA ABORDADA	9
3. RESULTADOS OBTENIDOS	12
3.1 ANÁLISIS DEL SCATTERING DE LOS AEROGENERADORES	12
3.2 ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LOS AEROGENERADORES EN LOS SISTEMAS DE RADIO-NAVEGACIÓN AÉREA	14
4. APLICABILIDAD PRÁCTICA DE LOS RESULTADOS	15
5. ANEXOS	17
5.1 ANEXO 1 – ARTÍCULOS RELACIONADOS DE DOMINIO PÚBLICO	17
5.2 ANEXO 2 – ARTÍCULOS RELACIONADOS CON EL TRABAJO PRESENTADOS EN EL SIMPOSIUM NACIONAL 2007 DE LA UNIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE RADIO	18
5.3 ANEXO 3 – FINANCIACIÓN DEL PROYECTO	27

1. Descripción del trabajo

Este documento es el resultado de un **proyecto de investigación y desarrollo** realizado en la *Universidad Pública de Navarra*, en colaboración con la empresa de Energías Renovables *Acciona Energía S.A.*, durante el periodo de un año. En él **se analiza la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas, y se estudia el impacto de estos en la prestación de servicio de los principales sistemas terrenales de Radio-Navegación Aérea cercanos**. En concreto, los principales sistemas terrenales de Radio-Navegación Aérea que más pueden verse afectados por la construcción cercana de parques eólicos, y que por tanto han sido estudiados en profundidad, son los siguientes: *VOR*, *DVOR*, y Radar Primario *PSR*. El proyecto se fundamenta en un riguroso análisis teórico de la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas, para el cual **se ha desarrollado e implementado, mediante el software informático *MatLAB*[®], una innovadora metodología matemática de análisis**. Como contraste al análisis teórico desarrollado, se han realizado diversas **medidas en campo** con el afán de validar y consolidar los resultados teóricos obtenidos. Por último, se ha aplicado la metodología de análisis desarrollada al estudio del impacto de los parques eólicos en la prestación de servicio de los sistemas de Radio-Navegación Aérea enumerados anteriormente; **además del estudio teórico aplicado, se han incluido una serie de medidas en campo**, que con la ayuda del software informático de cálculo de perfiles radioeléctricos *ICS-Telecom*[®] de *ATDI*, han permitido validar y consolidar las bases teóricas subyacentes. Por otro lado, **se han contrastado los resultados teóricos obtenidos con una serie de experiencias prácticas recogidas por las autoridades que gestionan los sistemas estudiados**, sobre el impacto negativo de los parques eólicos en la prestación de los respectivos servicios.

La **financiación** de este proyecto de investigación y desarrollo ha sido posible gracias a los programas de ayuda al desarrollo de la investigación del **Profit FIT-330210-2006-70**, del **Gobierno de Navarra IIP09838.RII**, y del **C.D.T.I. IDI-20070185**. El trabajo ha sido **primer premio proyecto fin de carrera 2007 por la Asociación Navarra de Ingenieros de Telecomunicación (A.N.I.T.)**.

1.1 Antecedentes y punto de partida

El aumento del número de parques eólicos y del tamaño de los mismos conlleva de manera inevitable el aumento de la posibilidad de *interferencia* de estos en los sistemas de radiocomunicación cercanos. **Se entiende por interferencia la obstrucción, difracción, refracción y dispersión de las ondas electromagnéticas provocada por la estructura física de los aerogeneradores**. Los aerogeneradores que se implantan hoy en día se componen de torres que superan ya los 80 metros de altura y palas que sobrepasan los 40 metros de longitud, por lo tanto, **son estructuras potencialmente interferentes** para las ondas electromagnéticas cuya longitud de onda es comparable con estos tamaños o menor, como ocurre en la mayoría de los servicios de radiocomunicación, ya que trabajan a frecuencias muy superiores a 3 MHz. **Unos de los servicios de radiocomunicación que pueden verse afectados por la construcción cercana de parques eólicos son los sistemas terrenales de radio-Navegación Aérea**.

Muchos son los **autores y entidades (públicas o privadas) que han analizado la influencia de los aerogeneradores** en la prestación de determinados servicios de radiocomunicación en los últimos años y en el pasado (véase anexo 1). Un repaso conceptual de los artículos publicados por autores y entidades públicas, pone rápidamente de manifiesto que **la gran mayoría de estos estudios están relacionados con el impacto de los aerogeneradores en los sistemas de televisión**, por otro lado, la falta de **estudios referentes al análisis de la influencia de los aerogeneradores en los sistemas de radio-navegación aérea**, deja entrever que estos **pertenecen al ámbito privado o militar**. Una lectura más detallada de los artículos y trabajos publicados, hace ver que **la gran mayoría de ellos son estudios**

de análisis cualitativo, además, **la gran parte de ellos no son actuales**, y por tanto no analizan la problemática de los aerogeneradores de implantación actual (nótese que el ritmo de crecimiento del tamaño de los aerogeneradores ha sido considerablemente alto en los últimos años). Además de las características ya descritas, **la gran mayoría de los estudios realizados simplemente son recopilaciones de experiencias prácticas** sobre influencias negativas de los parques eólicos en los sistemas de radiocomunicación.

1.2 Objetivos

En base a la carencia de estudios teóricos de análisis cuantitativo sobre la influencia de aerogeneradores modernos en sistemas de radiocomunicación, y a la privacidad de los estudios realizados sobre sistemas de radio-navegación aérea, este trabajo tiene como objetivos: el **análisis de la influencia de los parques eólicos de implantación actual, en la propagación de ondas electromagnéticas**, y el **análisis del impacto de estos parques eólicos en la prestación de servicio de sistemas terrenales de radio-navegación aérea cercanos**.

1.3 Desarrollo

La estructura que conforma un aerogenerador es realmente compleja, en concreto las palas o aspas, conformadas por composites de más de 7 capas dieléctricas con diferente perfil (en función de la distancia hasta la punta) y recorridas por un cable interno de acero, hierro o cobre. La simulación de estructuras tan grandes y complejas, con software de simulación electromagnética mediante elementos finitos, es inviable desde el punto de vista de tiempo de simulación; en la práctica, **se divide la estructura del aerogenerador en sus partes principales: torre, cono nariz, nacelle y aspas**.

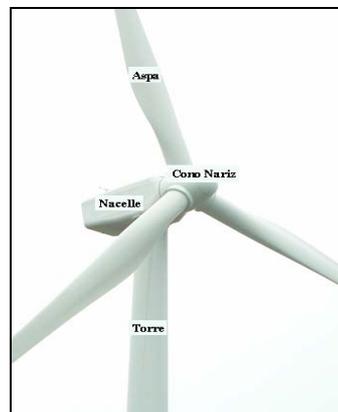


Fig. 1.3.1. Partes principales de un aerogenerador.

Una vez dividido y simplificado el problema, **se busca una aproximación analítica que prediga la interferencia máxima causada por cada parte del aerogenerador en la propagación de la señal en estudio**. Conociendo la interferencia causada por cada parte del aerogenerador de forma aislada, **se puede deducir la interferencia conjunta del aerogenerador y finalmente la del parque eólico completo**. Variables como la banda frecuencial utilizada, la polarización del campo eléctrico, el tamaño y número de aerogeneradores del parque eólico, y las posiciones relativas del transmisor, receptor y los aerogeneradores, definen cualitativa y cuantitativamente la interferencia causada por los aerogeneradores en la propagación de las ondas electromagnéticas de un determinado servicio de radiocomunicación; por otro lado, variables como la modulación empleada y la codificación de la señal, definen el impacto de la interferencia en la prestación del servicio.

Conocida la influencia de los aerogeneradores en los distintos tipos de señales electromagnéticas, y las características de las señales utilizadas por cada sistema terrenal de radio-navegación aérea, se puede analizar la influencia de los parques eólicos cercanos en la prestación de servicio de cada uno de estos sistemas.

Para abordar de forma rigurosa y ordenada la temática planteada, y para llegar a la consecución de los objetivos finales de este trabajo, **se ha dividido el documento en tres grandes bloques**: en el primero y más importante de ellos, se analiza la influencia de los parques eólicos en la propagación de las ondas electromagnéticas; en el segundo, se describen las características de funcionamiento de los distintos sistemas de radio-navegación aérea, y en el tercero y último bloque, se deduce el impacto de los aerogeneradores en la prestación de servicio de los distintos sistemas de radio-navegación aérea.

1.3.1 Análisis de la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas

En este apartado se analiza con rigor la influencia de los parques eólicos en la propagación de ondas electromagnéticas. Para ello, se comienza por **describir los fundamentos teóricos de la interferencia causada por un obstáculo en una radiocomunicación punto a punto**, para posteriormente extender estos fundamentos al análisis de la interferencia causada por un aerogenerador, y finalmente, **deducir la interferencia causada por un parque eólico completo en una radiocomunicación punto a punto o de multidifusión**. Para finalizar el apartado, **se realiza un análisis de la problemática particular de los sistemas Radar** (análisis particular de la interferencia causada por parques eólicos en la operación de sistemas Radar).

Para la descripción de los fundamentos de la interferencia causada por un obstáculo en una radiocomunicación punto a punto, **se comienza por estudiar la casuística de que el obstáculo interferente sea estático, para luego extender este estudio al análisis de la problemática particular derivada del hecho de que el obstáculo interferente esté en movimiento** (como ocurre con las palas de los aerogeneradores por ejemplo). En el estudio de la interferencia provocada por un obstáculo, **se introducen conceptos de Sección Radar**, ligados al nivel de potencia dispersada por el obstáculo (fenómeno de *scattering*, en terminología inglesa), **y conceptos de sección obstruida de las zonas de Fresnel**, ligados al nivel de pérdidas de potencia introducidas por el obstáculo por difracción. En función de estas secciones se cuantifica el impacto de un obstáculo en una radiocomunicación entre un transmisor y un receptor puntuales; en términos generales, **la Sección Radar se relaciona con la interferencia multicamino debida al scattering en obstáculos**, y la sección obstruida de las zonas de Fresnel con la interferencia debida a la difracción en obstáculos.

Cuando un obstáculo interferente se encuentra en movimiento, existe una problemática añadida respecto al caso de que este sea estático. Esta problemática, particular del **análisis de la interferencia causada por aerogeneradores en movimiento, es analizada en este trabajo mediante el diseño e implementación de novedosos algoritmos de cálculo mediante elementos finitos, que tienen en cuenta la variación temporal de la posición de los obstáculos en estudio**. En los estudios realizados, se analizan fenómenos característicos de la interferencia causada por objetos móviles: por un lado, la potencia recibida por un receptor, debida al scattering en el obstáculo, fluctúa en el tiempo (la Sección Radar de un obstáculo generalmente depende de los ángulos de incidencia y scattering; cuando el obstáculo se mueve, se producen variaciones en estos ángulos, y por tanto, en la Sección Radar del obstáculo) y sufre **dispersión frecuencial debida al efecto Doppler**, y por otro lado, la potencia recibida por el receptor, debida a la difracción en el obstáculo, es variable en el tiempo también. En el trabajo se

analizan estos efectos rigurosamente y **se refuerzan las conclusiones teóricas obtenidas mediante diversas medidas en campo.**



Fig. 1.3.1.1. Medidas en campo.
Antena transmisora.



Fig. 1.3.1.2. Medidas en campo.
Antena receptora.

El trabajo se centra principalmente en el análisis de la problemática de interferencia producida por el fenómeno del scattering en los aerogeneradores, ya que es este el problema con mayor impacto en la degradación de la prestación de los distintos servicios de radiocomunicación, por lo tanto, es tarea crucial determinar correctamente y con gran aproximación, la Sección Radar de las distintas partes que conforman un aerogenerador. En este apartado **se realiza un análisis riguroso de la Sección Radar de cada parte del aerogenerador, así como de la difracción que tiene lugar en cada una de ellas.** Cabe destacar el análisis de la Sección Radar de la torre y de las palas de un aerogenerador:

La torre de un aerogenerador se puede aproximar como un cilindro metálico de conductividad infinita; la Sección Radar de una estructura de estas características, en condiciones de campo lejano y frente de onda plano y uniforme, se calcula mediante formulación ya conocida de scattering en objetos cilíndricos. Como se apuntaba anteriormente, la Sección Radar de un obstáculo depende de la polarización del campo incidente, por lo tanto, en el trabajo **se realiza un estudio para cada tipo de polarización básica: polarización vertical (Modo TM^z) y polarización horizontal (Modo TE^z).** Las condiciones de cálculo supuestas: incidencia de un frente de onda plano y uniforme, y la condición de receptor situado en campo lejano, se aproximan muy bien para bajas frecuencias y distancias grandes entre el transmisor y la torre, y el receptor y la torre, pero dejan de ser buenas aproximaciones cuando la frecuencia de trabajo aumenta, o cuando las distancias entre el transmisor y la torre, o el receptor y la torre disminuyen (téngase en cuenta que la torre de un aerogenerador es un objeto eléctricamente muy grande a las frecuencias de estudio). Pocos son los autores que abordan el scattering de objetos eléctricamente muy grandes y analizan la dispersión de potencia provocada por la incidencia de frentes de onda esféricos y la recepción en la zona de Fresnel; en este trabajo, **y de forma innovadora, se han desarrollado e implementado algoritmos para analizar en profundidad las diferencias introducidas en la Sección Radar, por la incidencia de frentes de onda esféricos (situación más parecida a la que tiene lugar en la realidad), y por la situación de tener el receptor ubicado en la región de Fresnel.**

Las aspas o palas de un aerogenerador son estructuras muy complejas conformadas por composites de más de 7 capas dieléctricas con diferente perfil y recorridas por un cable interno de acero, hierro o cobre. Las estructuras conformadas por un conjunto de capas dieléctricas **se pueden asimilar a redes de Bragg, las cuales producen un filtrado frecuencial periódico-selectivo de la potencia que**

dispersan o refractan. El coeficiente de reflexión equivalente de una estructura de este tipo, bajo la incidencia oblicua de un frente de onda plano y uniforme, se calcula en el trabajo mediante la implementación de algoritmos conocidos de reflexión en dieléctricos.

Teniendo en cuenta que las palas están rotando, y por lo tanto, el ángulo de incidencia varía con el tiempo, y que el grosor del hueco de la pala varía desde su anclaje hasta la punta, se puede deducir que es inviable realizar un cálculo analítico aproximado del scattering o la refracción de las palas en función del tiempo; en la práctica, **se busca una cota máxima para el scattering de las palas, considerando estas como superficies de conductividad infinita**, y se calcula la variación de esta cota en el tiempo con técnicas de cálculo numérico mediante elementos finitos. En el trabajo **se plantea un algoritmo que realiza un cálculo de elementos finitos mediante el cual se obtiene la variación temporal de la potencia dispersada por las palas de un aerogenerador en rotación, se obtiene el espectro de la envolvente temporal resultante, y se calcula el ruido de fase provocado por la rotación de las palas.**

Una vez estudiadas las Secciones Radar de cada parte de un aerogenerador, en el trabajo se calcula la Sección Radar total de un aerogenerador, y finalmente la de un parque eólico completo. Para terminar, se incluye una descripción de la problemática particular de los sistemas Radar, abordando esta desde un punto de vista teórico y práctico.

1.3.2 Descripción de los sistemas terrenales de radio-navegación aérea

En este apartado, se describen y analizan los principales sistemas terrenales de radio-navegación aérea; nos referimos a **sistemas terrenales**, como aquellos que no **utilizan señales de satélite para su funcionamiento**. Los sistemas que utilizan satélites tienen sus antenas orientadas hacia el espacio, por lo tanto, la interferencia provocada por los parques eólicos en estos es despreciable. **Se estudian las particularidades de cada sistema, analizando la banda frecuencial de trabajo, la modulación empleada, y otras particularidades de cada sistema. Los principales sistemas terrenales de radio-Navegación Aérea, que han sido estudiados, son los siguientes: NDB (Non Directional Beacon), VOR (VHF Omnidirectional Range), DVOR (Doppler VHF Omnidirectional Range), DME (Distance Measurment Equipment), ILS (Instrument Landing System), MLS (Microwave Landing System), Radar Primario PSR, y Radar Secundario SSR.**

En el trabajo no se profundiza en la descripción de los sistemas cuya prestación de servicio no resulta afectada por la construcción cercana de parques eólicos, sino que **se analiza en profundidad aquellos que realmente puedan resultar vulnerables a la interferencia ocasionada por los parques eólicos; estos sistemas son el VOR, DVOR, y Radar Primario PSR.** Para estos sistemas, además del análisis teórico planteado, se realizan diversas medidas en campo. En concreto, **se realizan medidas en campo en el DVOR situado en la sierra de El Perdón en Pamplona (Navarra), y en el VOR situado en Campanas (Navarra).**



Fig. 1.3.2.1. DVOR en El Perdón (Navarra).

1.3.3 Análisis de la influencia de los parques eólicos en la prestación de servicio de sistemas terrenales de radio-navegación aérea cercanos

Como se apuntaba anteriormente, en función de las características particulares de cada uno de los sistemas de radio-navegación aérea, y conociendo como afectan los aerogeneradores a la propagación de las ondas electromagnéticas, podemos deducir que sistemas se verán afectados y cuales no. **En este apartado se utilizan las conclusiones sacadas de los dos primeros bloques para deducir el impacto de los aerogeneradores en la prestación de servicio de los distintos sistemas y poder sacar conclusiones:**

1.4 Conclusiones

A lo largo del trabajo se ha analizado la influencia de los parques eólicos en la propagación de las ondas electromagnéticas, y se ha comprobado que **la interferencia causada por los aerogeneradores en los sistemas de radiocomunicación se debe principalmente al scattering y el multipath** provocado por los aerogeneradores en las señales utilizadas por los sistemas. Se ha desarrollado un método innovador para la cuantificación de este scattering y **se ha deducido que el efecto corrector de considerar un frente de onda esférico y recepción en la región de Fresnel, consiste en una disminución de la máxima Sección Radar del aerogenerador y de su directividad de scattering, así como de un aumento del nivel y la anchura de los lóbulos laterales de scattering.** Se ha comprobado que **la directividad de scattering de los aerogeneradores es mucho mayor en el plano vertical,** debido a que es una estructura principalmente vertical (mucho más alta que ancha), y se ha deducido que **el impacto de los aerogeneradores es mayor para señales de frecuencias más altas, y para modulaciones de amplitud analógicas** (las modulaciones digitales y las modulaciones de frecuencia o fase son menos vulnerables a las interferencias). Se ha estudiado rigurosamente el scattering de las palas de un aerogenerador y se ha visto que **las estructuras conformadas por un conjunto de capas dieléctricas se pueden asimilar a redes de Bragg, las cuales producen un filtrado frecuencial periódico-selectivo de la potencia que dispersan o refractan.** Se ha analizado el efecto Doppler que tiene lugar en el movimiento de rotación de las palas, y se ha comprobado, mediante el diseño e implementación de innovadores algoritmos de cálculo mediante elementos finitos, que **la problemática particular de la interferencia causada por la rotación de las palas de los aerogeneradores consiste en la modulación de amplitud y fase de las señales electromagnéticas dispersadas, y en la dispersión frecuencial de las mismas.**

Respecto a los sistemas de radio-navegación aérea, se ha comprobado que aquellos que son potencialmente sensibles a la interferencia causada por la construcción cercana de parques eólicos, son: el VOR, el DVOR, y el Radar Primario PSR. Se ha comprobado también que la problemática principal causada por los parques eólicos en estos sistemas se debe al scattering producido en los aerogeneradores (rebotes de señal que llegan a los sistemas); por un lado, **los sistemas receptores VOR/DVOR sufrirán errores de medida del azimuth (el sistema VOR es más vulnerables a este efecto que el DVOR),** y por otro, **el sistema Radar PSR representará en pantalla objetos molestos en posiciones falsas, debido a los rebotes de los aerogeneradores que le entran por sus lóbulos secundarios.**

En términos generales, se ha podido comprobar que **para el análisis cuantitativo de la interferencia causada por los parques eólicos en un sistema de radiocomunicación, resulta de extrema importancia la frecuencia de operación del sistema, la modulación empleada, y las distancias entre el parque eólico y las antenas del sistema.** Conociendo estas variables, y mediante los conocimientos y métodos aportados con la elaboración del presente trabajo, ahora somos capaces de valorar y cuantificar la degradación producida en cualquier sistema de radiocomunicación cercano.

2. Originalidad de la temática abordada

Al comienzo del presente resumen, recalcábamos que muchos autores y entidades (públicas o privadas) habían analizado la influencia de los aerogeneradores en la prestación de determinados servicios de radiocomunicación en los últimos años y en el pasado (véase anexo 1). **Señalábamos que la gran mayoría de estos estudios estaban relacionados con el impacto de los aerogeneradores en los sistemas de televisión, y por otro lado, la falta de estudios públicos referentes al análisis de la influencia de los aerogeneradores en los sistemas de radio-navegación aérea** (estos pertenecen al ámbito privado o militar). Comentábamos que la gran mayoría de **los estudios publicados eran estudios de análisis cualitativo**, y que además, la gran parte de ellos no eran actuales, y por tanto **no analizaban la problemática de los aerogeneradores de implantación actual** (el ritmo de crecimiento del tamaño de los aerogeneradores ha sido considerablemente alto en los últimos años). Además, señalábamos también que la gran mayoría de los estudios realizados simplemente eran recopilaciones de experiencias prácticas sobre influencias negativas de los parques eólicos en los sistemas de radiocomunicación.

Teniendo en cuenta los antecedentes descritos y el punto de partida a partir del cual se inicia este proyecto, no cabe duda alguna de que **este trabajo ha cubierto y enriquecido dos grandes vacíos temáticos existentes en el campo de las telecomunicaciones de dominio público: el análisis cuantitativo y riguroso de la influencia de los aerogeneradores en movimiento en la propagación de ondas electromagnéticas, y el análisis de la influencia de los parques eólicos en la prestación de servicio de los sistemas de radio-navegación aérea.**

En este trabajo se ha analizado rigurosamente el fenómeno de scattering de objetos eléctricamente muy grandes (como lo son los aerogeneradores), y **se ha tenido que desarrollar una innovadora metodología de cálculo mediante elementos finitos para cuantificar el efecto corrector derivado de la consideración de incidencia de frentes de onda esféricos y recepción en región de Fresnel** (situación más realista posible), debido a que **en la literatura actual no se encuentran fácilmente expresiones analíticas para el cálculo del scattering bajo estas condiciones propias de obstáculos eléctricamente muy grandes.**

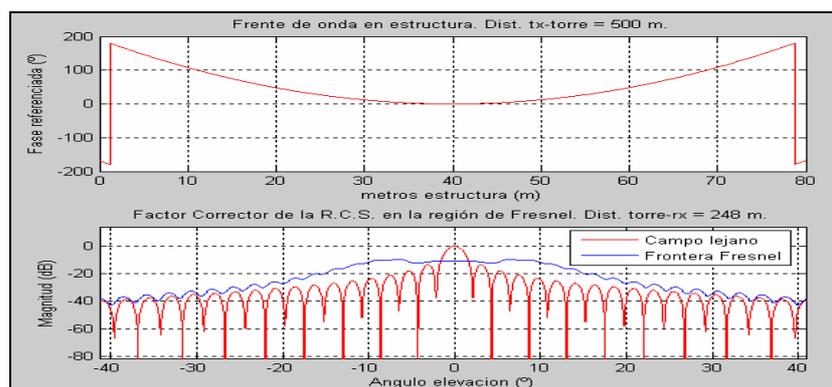
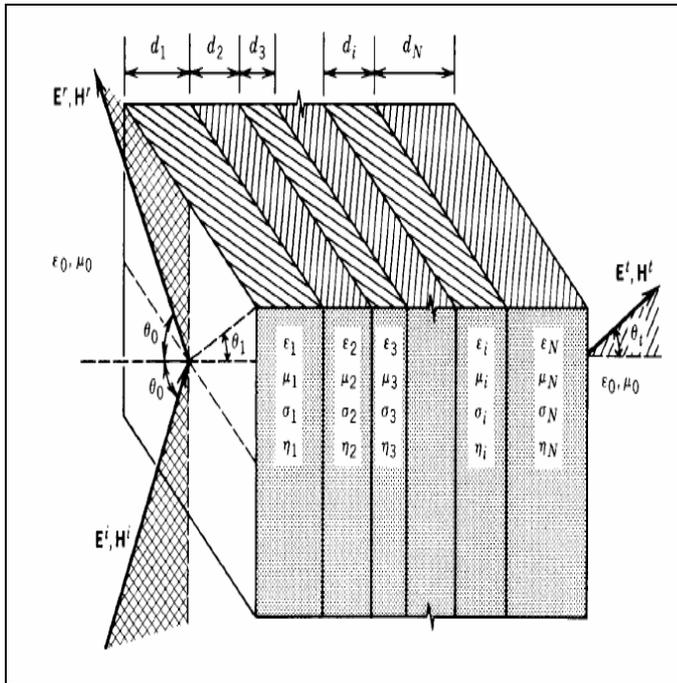


Fig. 2.1. Factor corrector de la Sección Radar de la torre para receptor en la frontera de Fresnel e incidencia de frente de onda esférico. Torre de 80m. $d_{tx-torre} = 500m$. $f=100$ MHz.

En el estudio que se ha realizado, se ha aportado la innovadora visión de considerar las palas de los aerogeneradores como estructuras conformadas por composites de capas dieléctricas (situación más realista), frente a la clásica visión de considerar las palas como superficies metálicas reflectoras que han mantenido la mayoría de los autores hasta la fecha. Se ha comprobado así que las estructuras conformadas por un conjunto de capas dieléctricas se pueden asimilar a *redes de Bragg*, las cuales producen un filtrado frecuencial periódico-selectivo de la potencia que dispersan o refractan.



```

% CARACTERIZACION capas dielectricas a la frecuencia 'f' *****
f=800; % FRECUENCIA de la onda incidente (MHz)
f=f*1e6; % Pasamos a Hz
w=2*pi*f; % Frecuencia angular
N=9; % Numero total de capas, incluyendo medio inicial y final

% Dielectrico 1 - (Vacio)
% Dielectrico 2 - (Fibra de Vidrio & poliester) - Superficie rebote
% Dielectrico 3 - (PVC)
% Dielectrico 4 - (Fibra de Vidrio & poliester)
% Dielectrico 5 - (Aire; Aproximamos por vacio)
% Dielectrico 6 - (Fibra de Vidrio & poliester)
% Dielectrico 7 - (PVC)
% Dielectrico 8 - (Fibra de Vidrio & poliester)
% Dielectrico 9 - (Vacio)

grosor=[0 0.02 0.02 0.02 0.5 0.02 0.02 0.02 0]; % Grosor (m)
tamp=[0 0.02 0.018 0.02 0 0.02 0.018 0.02 0]; % Tangente de perdidas

perm=[1 4 3 4 1 4 3 4 1]; % Permitividad relativa

% NOTA: Suponemos tamp, perm constantes en frecuencia

permeab0=1.256637e-6; % Permeabilidad magnetica vacio
perm0=8.85418781e-12; % Permitividad electrica vacio

perm=perm*perm0; % Pasamos a permitividad total

% Ahora calculamos la conductividad efectiva de cada capa de dielectrico en
% funcion de su permitividad electrica y su tangente de perdidas.

cond=tamp.*perm*w;
    
```

Fig. 2.2. Palas constituidas por composite de capas dieléctricas.

Fig. 2.3. Caracterización del composite en MatLAB®.

La problemática particular del análisis de la interferencia causada por aerogeneradores en movimiento, es analizada en este trabajo mediante el diseño e implementación de novedosos algoritmos de cálculo mediante elementos finitos, que tienen en cuenta la variación temporal de la posición de los obstáculos en estudio (movimiento de las palas), a diferencia de la mayoría de los estudios publicados hasta la fecha, que no tienen en cuenta la modulación de amplitud y fase de las señales electromagnéticas dispersadas por las palas, ni la dispersión frecuencial de las mismas, o que son estudios muy antiguos que estudian la modulación de amplitud provocada por aerogeneradores de dos palas.

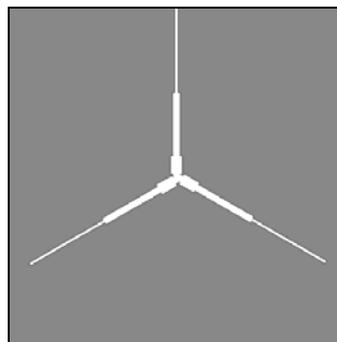


Fig. 2.4. Modelo de palas en MatLAB®.

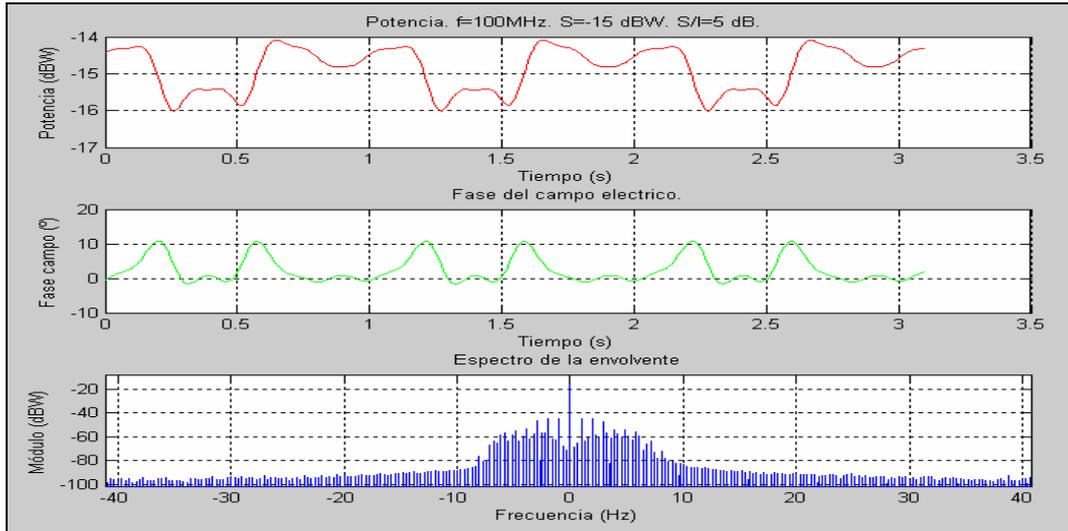


Fig. 2.5. Simulación de la potencia recibida con efecto de rotación de las palas. $f=100$ MHz. $S=-15$ dBW. $S/I_{palas}=5$ dB.

Para terminar este apartado, y con no menos importancia, cabe destacar que **un hecho muy importante de la realización de este proyecto es el refuerzo y la vinculación de la labor del Ingeniero de Telecomunicación con el creciente campo de las Energías Renovables.** Por esta razón, por la rigurosidad del estudio realizado, y por las aplicaciones prácticas de este, el trabajo ha sido **primer premio proyecto fin de carrera 2007 por la Asociación Navarra de Ingenieros de Telecomunicación (A.N.I.T.).**



Fig. 2.6. Medida del scattering de un parque eólico para el análisis de la viabilidad de situar un repetidor de TV cerca del parque eólico.

3. Resultados obtenidos

En este apartado del presente resumen, se va a tratar de mostrar los resultados más significativos del proyecto, ya que son muchos los resultados obtenidos. Se mostrarán los resultados en dos bloques diferenciados: por un lado, los resultados referentes al análisis del scattering de los aerogeneradores, y por otro, los resultados referentes al análisis del impacto de los aerogeneradores en los sistemas de radio-navegación aérea

3.1 Análisis del scattering de los aerogeneradores

En las siguientes figuras se puede observar, como ejemplo de los resultados obtenidos mediante la implementación en MatLab® de la formulación de cálculo de Sección Radar, la **Sección Radar de una torre de 80 metros de altura y 4 metros de diámetro frente al ángulo acimutal de scattering** (el ángulo acimutal de scattering está referido al ángulo acimutal de incidencia) **para las frecuencias de 100 y 500 MHz, polarización vertical, y bajo las condiciones de incidencia de frente de onda plano-uniforme, y receptor situado en la región de Fraunhofer:**

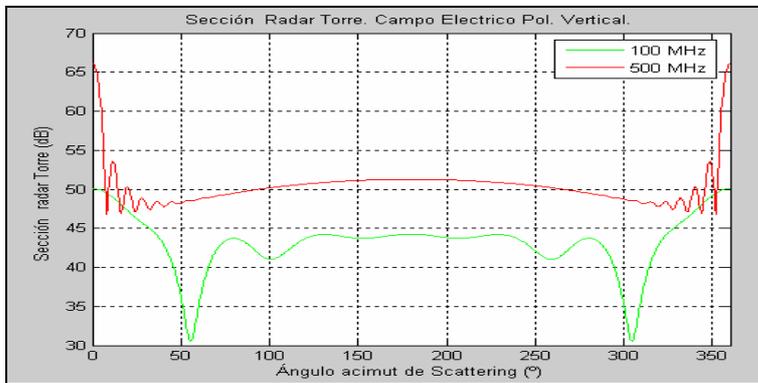


Fig. 3.1.1. Sección Radar de la torre vs. al ángulo acimutal de scattering. $f=500$ MHz. Pol. V. (gráfico polar).

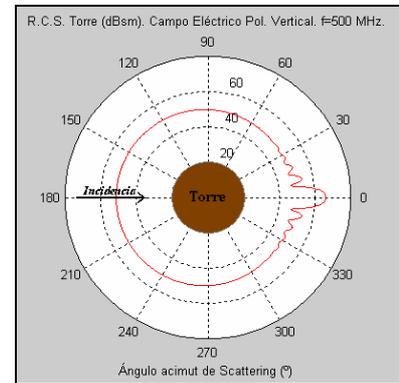


Fig. 3.1.2. Gráfico polar para $f=500$ MHz.

Se puede observar que la dirección especular de scattering en el plano horizontal se corresponde con la dirección de la onda incidente. Por otro lado, **para frecuencias más altas la torre se comporta de forma más directiva, tiene una Sección Radar máxima mayor, y un mayor número de lóbulos laterales en el diagrama espacial de scattering.** En concreto, **la dependencia frecuencial de la Sección Radar máxima de la torre, bajo las mismas condiciones, resulta:**

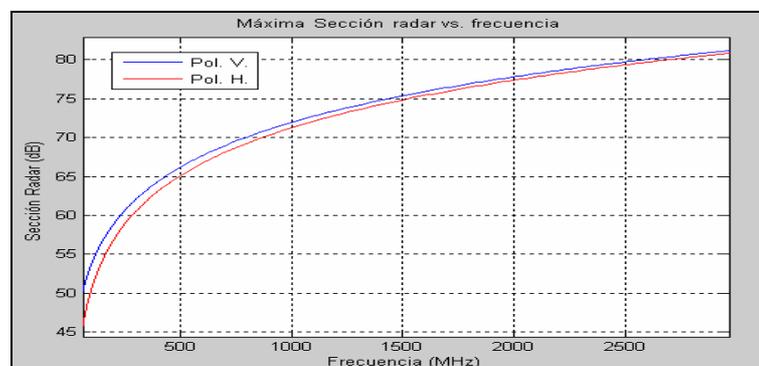


Fig. 3.1.3. Máxima Sección Radar de la torre vs. frecuencia (incidencia de frente de onda plano-uniforme y condición de campo lejano).

El efecto de considerar un frente de onda esférico (situación más realista) y situar el receptor en la región de Fresnel (tégase en cuenta que el gran tamaño de las torres hace que la región de Fresnel de estas se extienda hasta las decenas de kilómetros para frecuencias de trabajo superiores a unos 300 MHz), provoca una disminución de la máxima Sección Radar y de la directividad de la torre, y un aumento del nivel y la anchura de los lóbulos laterales. Obsérvese los siguientes resultados como ejemplo:

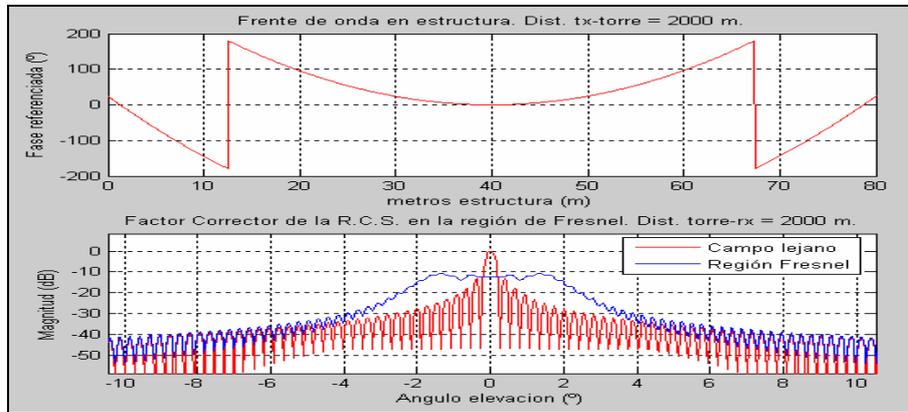


Fig. 3.1.4. Factor corrector de la R.C.S. de la torre para receptor en la región de Fresnel e incidencia de frente de onda esférico. Torre de 80m. $d_{tx-torre} = d_{rx-torre} = 2\text{Km}$. $f=0.8\text{ GHz}$.

A continuación vemos los resultados sobre el coeficiente de reflexión de las aspas, considerando estas como un composite de siete capas dieléctricas formadas por diferentes materiales:

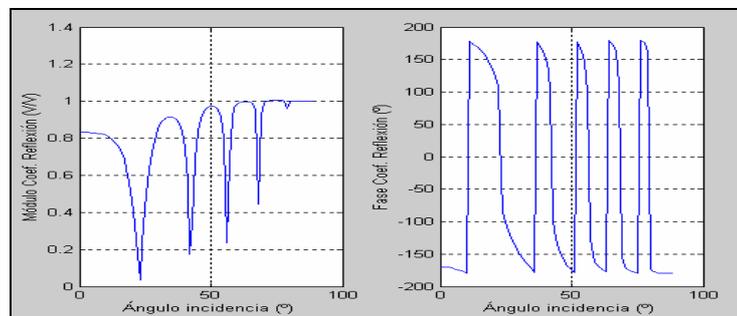


Fig. 3.1.5. Coeficiente de reflexión palas vs. ángulo incidencia. Datos: $f=800\text{MHz}$, E perpendicular, grosor hueco interno = 1 m.

Se puede apreciar, como **la estructura se comporta como un filtro periódico-selectivo**. Se puede deducir que **el número de lóbulos y la anchura de estos está relacionada con los grosores de las capas dieléctricas y la longitud de onda de trabajo; para longitudes de onda mucho mayores que los grosores de las capas dieléctricas, el efecto de filtrado (frecuencias de bajo coeficiente de reflexión) es despreciable.**

Para terminar este apartado, vemos en las siguientes figuras alguno de los resultados de la **variación temporal del scattering de las palas en rotación, calculada mediante los algoritmos de cálculo de elementos finitos desarrollados, y la comparación con las medidas de dispersión frecuencial de una portadora efectuadas en campo**. Como se puede observar, **la anchura de dispersión frecuencial calculada se ajusta satisfactoriamente a la medida realizada en campo (nótese que no se incluye la portadora en el gráfico frecuencial teórico):**

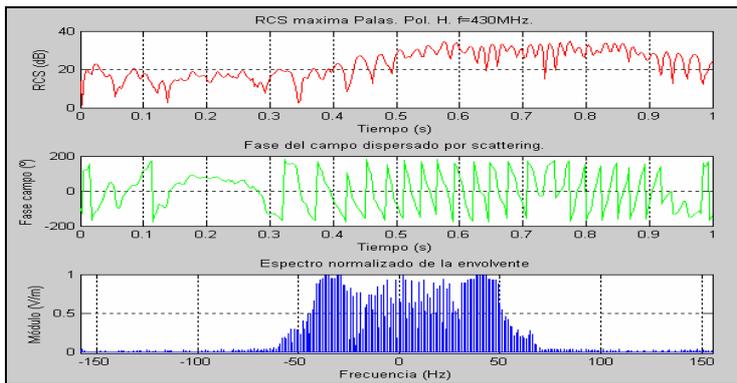


Fig. 3.1.6. Simulación rotación palas: $f=430$ MHz. Pol. H.

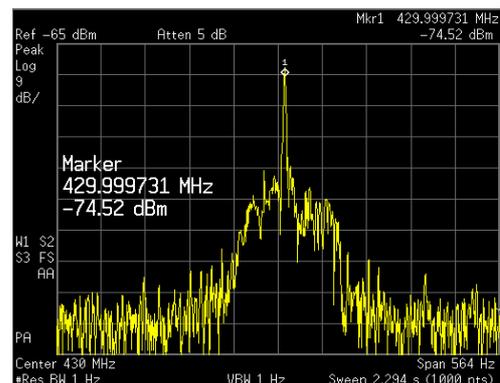


Fig. 3.1.7. Dispersión frecuencial medida.

3.2 Análisis del impacto de los aerogeneradores en los sistemas de radio-navegación aérea

En este apartado, y con animo de utilizar un lenguaje visual que resulte fácilmente entendible para el lector, se mostrarán algunos de los resultados más significativos obtenidos en el análisis de los sistemas de radio-navegación aérea *VOR* y *DVOR*; para ello, se mostrarán los espectros de las señales medidas en campo de estos sistemas, y se expondrán algunas conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo.

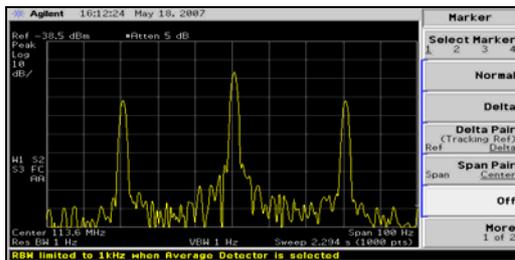


Fig. 3.2.1. Espectro *VOR* con Span de 100 Hz.

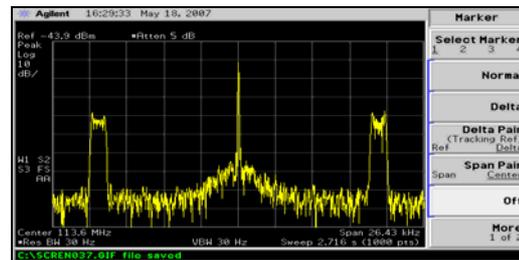


Fig. 3.2.2. Espectro *VOR* con Span de canal completo

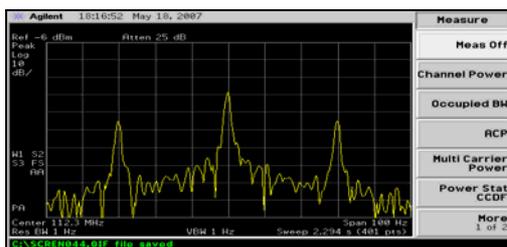


Fig. 3.2.3. Espectro *DVOR* con Span de 100 Hz.

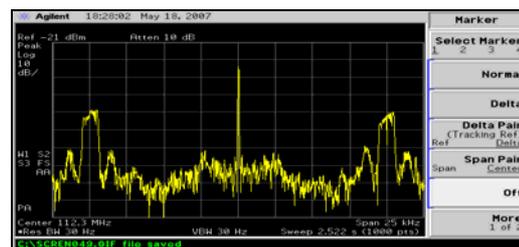


Fig. 3.2.4. Espectro *DVOR* con Span de canal completo.

Como se apuntaba anteriormente, **los sistemas *DVOR* son menos vulnerables frente al scattering en obstáculos cercanos que los sistemas *VOR***, ya que cuando en el receptor *VOR/DVOR* de una aeronave se recibe una señal emitida por una estación terrestre *VOR* junto a un rebote interferente de esta (por scattering en un obstáculo), ambas señales generalmente tendrán una información de acimut distinta (ya que la dirección del rebote es generalmente distinta que la de la transmisión directa), por lo tanto, y como la modulación de la señal dependiente en los sistemas *VOR* es AM, la degradación será mucho mayor que en el caso del sistema *DVOR*, para el cual la modulación de la señal dependiente es FM.(nótese que la modulación FM es mucho más robusta frente a interferencias).

4. Aplicabilidad práctica de los resultados

Las Energías Renovables han experimentado un gran crecimiento en los últimos años fruto de la creciente preocupación del ser humano por la conservación del medio ambiente y del mayor número de investigaciones en la materia. En concreto, **la energía eólica ha sufrido un gran crecimiento hasta la actualidad, llegando a una producción máxima de 8.375 MW/hora en nuestro país. El aumento del número de parques eólicos y del tamaño de los mismos conlleva de manera inevitable el aumento de la posibilidad de interferencia de estos en los sistemas de radiocomunicación cercanos.** Los molinos que se implantan hoy en día se componen de torres que superan ya los 80 metros de altura y palas que sobrepasan los 40 metros de longitud, por lo tanto, son estructuras potencialmente interferentes para las ondas electromagnéticas cuya longitud de onda es comparable con estos tamaños o menor, como ocurre en la mayoría de los servicios de radiocomunicación, que trabajan a frecuencias muy superiores a 3 MHz.



Fig. 4.1. Parque eólico propiedad de Acciona Energía S.A.

Este trabajo ha tenido como finalidad el análisis de la influencia de los parques eólicos de implantación actual, en la propagación de ondas electromagnéticas, y el análisis del impacto de estos parques eólicos en la prestación de servicio de sistemas terrenales de radio-navegación aérea cercanos, con el **propósito de crear el conocimiento necesario para hacer posible la coexistencia en armonía de los sistemas de radiocomunicación cercanos y la creciente implantación de sistemas de generación de energías renovables** (en su forma particular de parques eólicos), y en base a la carencia de estudios teóricos de análisis cuantitativo sobre la influencia de aerogeneradores modernos en sistemas de radiocomunicación, y a la privacidad de los estudios realizados sobre sistemas de radio-navegación aérea.

Las medidas en campo realizadas a lo largo del proyecto, en escenarios problemáticos reales pertenecientes a la infraestructura eólica de Acciona, han arrojado resultados que se aproximan en gran medida a las predicciones teóricas obtenidas con el software matemático desarrollado en MatLAB[®], por lo tanto, en la actualidad se está utilizando esta nueva herramienta desarrollada para el trabajo diario del personal del departamento de Ingeniería y proyectos de Telecomunicación de la citada empresa, permitiendo la planificación de nuevas implantaciones eólicas que coexistan en total armonía con los sistemas de radio-navegación aérea, y ahorrando a la empresa la gran inversión que supone subcontratar los servicios de asesorías técnicas externas.

Nótese que el análisis efectuado sobre la influencia de los aerogeneradores en la propagación de ondas electromagnéticas, no solo es aplicable al estudio del impacto de los aerogeneradores en la prestación de servicio de sistemas de radio-navegación aérea, sino que es aplicable a cualquier sistema de radiocomunicación. **En la actualidad se está utilizando la nueva herramienta desarrollada en el proyecto para el trabajo diario del personal del departamento de Ingeniería y proyectos de Telecomunicación de Acciona Energía S.A, para la planificación de nuevas implantaciones eólicas que coexistan en armonía con los sistemas de emisión y reemisión de señales de TV (analógica y digital), así como con los sistemas de radiodifusión, con los radioenlaces, y con los sistemas de telefonía móvil.**

Gran parte de la normativa y la legislación vigente en multitud de países, referente a la implantación de parques eólicos en la proximidad de sistemas de radio-navegación aérea, está sostenida por estudios de carácter poco cuantitativo y en muchos casos de carácter obsoleto, teniendo en cuenta las dimensiones y la forma de los aerogeneradores de implantación actual. **En algunos casos, las normativas hablan de distancias de seguridad sobredimensionadas para la construcción de infraestructuras cercanas a los sistemas de radio-navegación aérea, para así asegurar el buen funcionamiento de estos sistemas de radio-navegación frente al desconocimiento subyacente de la influencia de los aerogeneradores cercanos en estos. El conocimiento aportado por el desarrollo de este trabajo, ha servido para poder negociar (la empresa Acciona Energía S.A.) con algunas de estas entidades que controlan las normativas de este ámbito, y conseguir la implantación de parques eólicos en lugares donde hasta ahora se prohibía la construcción de ningún tipo de infraestructura. No cabe duda de que estas negociaciones positivas tienen como resultado una importante ganancia económica subyacente para la empresa.**

Para terminar, destacar que el estudio realizado ha supuesto un punto de partida para el análisis más riguroso todavía del fenómeno de la interferencia causada por los aerogeneradores en los sistemas de radiocomunicación cercanos, así pues, **en la actualidad se sigue investigando sobre el tema y desarrollando nuevas y más complejas metodologías de estudio. Actualmente se está negociando entre la Universidad Pública de Navarra y la empresa Acciona Energía S.A. una propuesta para la colaboración conjunta en la investigación de este tema.**

5. Anexos

5.1 ANEXO 1 – Artículos relacionados de dominio público

- D.L. Sengupta; T.B.A, *Electromagnetic Interferente to Televisión Reception Caused by Horizontal Axis Windmills*, Proceeding of the IEEE 1979, vol. 67, p. 1133-1142.
- J.L. Eaton B.Sc; M.I.E.E.; R.I. Black; G.H. Taylor B.A; Dip. E.E., *Interference to television reception from large wind turbines*, Surrey: BBC Research & Development 1983.
- D.L. Sengupta, *Equations for Estimating the Strength of TV Signals Scattered by Wind Turbines*, University of Detroit Mercv, 1994.
- C. Salema; C. Fernandes; L. Fauro, *TV Interferente from Wind Turbines*, Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- P.J. Van Kats; O.P.E. Pager, *Reflections of electromagnetic waves by large windturbines and their impact on UHF broadcast reception*, IEEE 1984, p. 91-99.
- D.F. Bacon, *Fixed-link wind-turbine exclusion zone method*, 2002.
- J.H. Causebrook; H.P. Palmer, *The Reflection and Scattering of televisión signals by the blades of large wind turbines*, London: IEEE 1986, p. 237-243.
- F.A. Cassara, et al., *Cross coupled phase-locked loop interference canceller for supresion of electromagnetic interference caused by wind turbine generators*, North Hollywood: Western Periodicals 1981, p. 720-725.
- Australian Government & AusWEA, *The Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Field Implications for Wind Farming in Australia*, 2004.
- Recomendación UIT-R BT. 805, *Efecto de la degradación causada a la recepción de televisión por una turbina eólica*, 1992.
- Radio Advisory Board of Canada (RABC) Canadian Wind Energy Association (CANWEA) *Technical Information On The Assessment of the Potential Impact Of Wind Turbines On Radio Communication, Radar And Seismoacoustic Systems*. October 2006.

- *WIND ENERGY AND AVIATION INTERESTS*. INTERIM GUIDELINES WIND ENERGY, DEFENCE & CIVIL AVIATION INTERESTS WORKING GROUP. ETSU W/14/00626/REP, 2002.
- *WIND TURBINES AND AVIATION INTERESTS EUROPEAN EXPERIENCE AND PRACTICE*. ETSU W/14/00624/REP. DTI PUB URN No. 03/515, 2002.
- *The Operational Effects of Wind Farm Developments on ATC Procedures For Glasgow Prestwick International Airport*. Elliott Summers Senior Air Traffic Controller. Glasgow Prestwick International Airport, 30th January 2001.
- *Radar Signatures and Relations to Radar Cross Section*. Mr P E R Galloway Roke Manor Research Ltd, Romsey, Hampshire, United Kingdom.
- *REPORT TO THE CONGRESSIONAL DEFENSE COMMITTEES. The Effect of Windmill Farms On Military Readiness 2006*. Office of the Director of Defense Research and Engineering
- *WIND TURBINES AND RADAR: OPERATIONAL EXPERIENCE AND MITIGATION MEASURES*. Report to a consortium of wind energy companies, December 2001
- *FEASIBILITY OF MITIGATING THE EFFECTS OF WINDFARMS ON PRIMARY RADAR*. ETSU W/14/00623/REP. DTI PUB URN No. 03/976, 2003.
- *WIND FARMS IMPACT ON RADAR AVIATION INTERESTS - FINAL REPORT*. FES W/14/00614/00/REP. DTI PUB URN 03/1294. Contractor QinetiQ. Prepared by Gavin J Poupart, September 2003.

5.2 ANEXO 2 – Artículos relacionados con el trabajo presentados en el simposium nacional 2007 de la unión científica internacional de radio

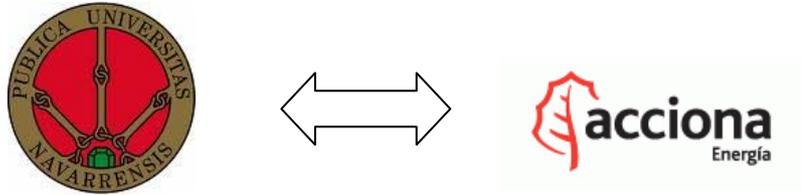
[1] “Análisis de la influencia de los parques eólicos en la transmisión de señales de radiofrecuencia”, I. Etayo, A. Satrustegui, M.J. Yábar, F.J. de Aranzadi y F. Falcone.

[2] “Estudio de propagación del campo eléctrico al atravesar un parque eólico”, A. Satrustegui, I. Etayo, M.J. Yábar, F.J. de Aranzadi y F. Falcone.

En las páginas siguientes se muestran los mismos:

5.3 ANEXO 3 – Financiación del proyecto

Como se ha dicho al principio de este resumen, este proyecto final de carrera ha sido realizado en la *Universidad Pública de Navarra* con la colaboración directa de la empresa de Energías Renovables *Acciona Energía S.A.*



El instrumental de radiocomunicación utilizado ha sido facilitado tanto por la *Universidad Pública de Navarra*, como por *Acciona Energía S.A.*. Las medidas en campo realizadas a lo largo del proyecto, han sido efectuadas en los parques eólicos propiedad de *Acciona Energía S.A.*

La financiación para la elaboración del presente proyecto ha sido efectuada por *Acciona Energía S.A.* mediante los siguientes **programas de ayuda al desarrollo de la investigación**:

- **Profit FIT-330210-2006-70**



- **Gobierno de Navarra IIP09838.RII**



- **C.D.T.I. IDI-20070185**

