

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones  
Komunikazioen Ingeniaritza Saila

# TESIS DOCTORAL

---

Modelo de canal para caracterizar la señal  
dispersada por un parque eólico en la  
banda UHF e influencia sobre la calidad de  
servicio de DVB-T

**Autora** Itziar Angulo Pita  
**Director** Dr. David de la Vega Moreno

Bilbao, Noviembre de 2012

La realización de esta tesis doctoral ha sido financiada por el Gobierno Vasco a través de una beca del Programa de Formación de Personal Investigador del Departamento de Educación, Universidades e Investigación (BFI08.230)

Además, ha contado con la colaboración del Communications Research Centre (CRC) de Canadá a través del Dr. Yiyang Wu, Adivic Technology co., Abertis Telecom, Itelazpi y Eólicas de Euskadi (hoy Iberdrola Renovables)

© Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
- Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua (UPV/EHU)  
- University of the Basque Country Press (UPV/EHU)

**ISBN: 978-84-9860-875-5**

*¿Qué gigantes? dijo Sancho Panza.*

*Aquellos que allí ves, respondió su amo, de los brazos largos, que los suelen tener algunos de casi dos leguas. Mire vuestra merced, respondió Sancho, que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas, que volteadas del viento hacen andar la piedra del molino. Bien parece, respondió Don Quijote, que no estás cursado en esto de las aventuras; ellos son gigantes, y si tienes miedo quítate de ahí, y ponte en oración en el espacio que yo voy a entrar con ellos en fiera y desigual batalla. Y diciendo esto, dio de espuelas a su caballo Rocinante, sin atender a las voces que su escudero Sancho le daba, advirtiéndole que sin duda alguna eran molinos de viento, y no gigantes aquellos que iba a acometer. Pero él iba tan puesto en que eran gigantes, que ni oía las voces de su escudero Sancho, ni echaba de ver, aunque estaba ya bien cerca, lo que eran; antes iba diciendo en voces altas: non fuyades, cobardes y viles criaturas, que un solo caballero es el que os acomete.*

**“El Ingenioso Hidalgo de Don Quijote de la Mancha” –  
Miguel de Cervantes**



Esta tesis empezó casi sin que yo me diera cuenta, cuando me quedé para irme, pero al final me seguí quedando.

Y no porque suene a tópico es menos cierto: hubiera sido imposible llevarla a cabo sin la ayuda de mis compañeros y profesores de TSR, a los que tengo que agradecer todas sus contribuciones al trabajo que aquí se recoge, desde las "¿cómo va?" a las ingratas horas de furgo, pasando por las sugerencias, las ideas dibujadas en la pizarra, la ayuda con letras y papeles, las publicaciones y congresos, las revisiones. Personas como Pablo, que siempre sabe cómo hay que hacer las cosas, y como David, que tantas veces ha defendido nuestras aportaciones en la URT (gracias también por todos los momentos cómicos "¿qué tal la tesis? - ¿qué tesis?"). Merecen una mención especial Carlos, Olatz, Nico, Iñigo y Joane, que también han sido "mis Ángeles".

Si me embarqué en esta aventura fue por el Dr. de la Vega, de quien aprendí lo que sé sobre aerogeladores y quien desde el principio confió en mi capacidad para sacar adelante esta tesis. Y también fue por David y todas las conversaciones que han ido más allá del ámbito de nuestro trabajo, David en su paciencia y su optimismo (nótese el uso de las mayúsculas). Mil gracias al Dr. de la Vega, mil gracias a David. Dos mil gracias en total por mi director de tesis, a quien le quito más reportir agradecimientos que recibílos... Espero haber acertado en éste.

En estos años he aprendido las cosas más importantes durante los cafés y las comidas thanks to my dear UE members: Carlos, Mikael, Alain, Jarí, Fran, Iñigo, Iker, Cristina, Dani, Olatz, Gocherribla, Joane y esa cosa que dice que yo le he contagiado. Ruth y sus demostraciones magistrales de sabiduría popular. Uhai, por quien mi agradecimiento va junto con mi admiración, en lo profesional y en lo personal: nunca estaré a la altura de tu dedicación. It's been funny all the way! Like a Rolling Stone! Y por supuesto Jon, a quien le debo (¡por los morros!) un capítulo de tesis, y con quien he tenido la suerte de compartir no sólo despacho y viajes bélicos sino también una forma de entender la investigación y la vida: you alternate the current way of life, mate! Zur: mila ester, mila aldia, bihotz - bihotzez.

Estudiar esta carrera me regaló la oportunidad de conocer a mis telenas preferidas: Edu, que lo vio claro desde el principio; Nadia, a quien quiero para mí cuando sea mayor; Ana, a quien le guardo siempre un hueco en mi silla y en mi corazón; Itzi, mi amiga, confidente, y compañera de todas las cosas!; y Laura, a quien sigo echando de menos cada vez que son las 11:11.

El principio de este camino lo marcaron mis padres: mis primeros profesores, y los mejores que jamás he tenido. Los que me han enseñado, entre otras millones de cosas, el valor de la constancia, el esfuerzo, y la dedicación. Mis compañeras de travesía han sido, son, y serán mis hermanas, Iru y Arán, que siempre están conmigo, aunque estén lejos. Y los que se van sumando a la familia. Como mi sobrina, a la que ya estamos esperando, y Es que llegarán...

des que tiempo nunca fallan son mis inseparables cuadrilléras, especialistas en hacer que los buenos momentos sean mejores, y los malos no lo sean tanto.

A Pedro le he reservado este último párrafo y antes de darle las gracias tengo que pedirle perdón. Primero, por incluirle en estos agradecimientos a pesar de pedirme que no lo hiciera; y después, por habérme hecho sufrir el lado menos amable de esta tesis Confío en que me dejes seguir dándole las gracias cada día. Por ser mi Ayer, mi Hoy, mi Mañana. Mi Socio y mi Cómplice. Mi Siempre.

Espero que no hayáis tenido que esperar a leer estas líneas para saber lo mucho que os lo agradezco a todos...

... y que el viento sople siempre a nuestro favor...

Itzi

Bilbao, Noviembre de 2012







## ABSTRACT

---

*The presence of a wind farm causes several effects on the electromagnetic signals that may degrade the quality of the telecommunication services provided nearby.*

*In regard to television broadcasting, these effects are notable for the analogue signal. However, a potential impact of a wind farm on digital television broadcasting had not yet been assessed.*

*Apart from that, the evaluation of the potential degradation on these services has been traditionally carried out by means of scattering models that only account for the signal scattered by the blades of a wind turbine. These classic models do not consider neither the mast contribution to the scattered signal nor the time variability due to the blade rotation or the joint influence of a wind farm composed of several turbines.*

*In this context, the first of the two main objectives of this thesis is the empirical evaluation of the degradation caused to the DVB-T digital television signals reception due to the presence of a nearby wind farm. From this measurement-based study, it can be concluded that it is in the backscattering region where the most critical reception conditions are encountered. In this zone, the propagation channel can be characterized by a discrete time-varying multipath channel.*

*Therefore, in order to determine future possible degradations on the services provided in the UHF band, the second main objective of this thesis focuses on proposing a new channel model to characterize the multipath propagation typical of the area surrounding a wind farm. This channel model is adaptable to the particular features of each case under study: relative position transmitter-wind turbine-receiver, wind turbine dimensions, maximum rotation rate, characteristics of the transmitter and receiver radiating systems, and working frequency.*

*In this way, the results obtained in this research work give answer to the studies requested by the International Telecommunications Union since the first cases of impact were detected.*



# LABURPENA

---

*Parke eolikoek hainbat efektu eragiten dute seinale elektromagnetikoetan eta, ondorioz, zenbait kasutan, inguruan eskaintzen diren telekomunikazio zerbitzuek kalitatearen degradazioa jasan dezakete.*

*Telebistari dagokionez, efektu hauek nabarmenak dira seinale analogikoaren kasuan. Aitzitik, parke eolikoek telebista digitalean izan dezaketen eragina ez da oraindik zehaztu.*

*Bestalde, oraindano telebista zerbitzuek izandako inpaktuaren ebaluazioa sakabanatze-ereduen bidez egin da. Sakabanatze-eredu klasiko hauek palek sakabanatzen duten seinalea baino ez dute adierazten; eta horrenbestez, ez dute kontuan hartzen dorreak sakabanatzen duen seinalea, ez besoen errotazio mugimenduak eragindako denbora aldakortasuna, ezta hainbat aerosorgailuz osatutako parkearen eragin bateratua ere.*

*Testuinguru honetan, ikerkuntza lan honen lehen helburu nagusia definitzen da: parke eoliko batek DVB-T sisteman eragin dezakeen harrera-degradazioaren ebaluazio enpirikoa egitea. Neurketetan oinarritutako analisi honetatik, harrera-baldintza zailenak backsckattering delako eremuan gertatzen direla ondorioztatzen da, non hedapenak lerbildere anitzeko ereduak jarraitzen duen. Eredu honen portaera denborarekin aldakorra izango da palen errotazio mugimenduaren ondorioz.*

*Horrez gain, UHF bandan igorritako zerbitzuetan gerta daitezkeen degradazioak aurreikusi ahal izateko, tesiaren bigarren helburua zehazten da: parke eoliko baten inguruan sortutako hedapen tipikoa deskribatzen duen kanal eredu berria proposatzea. Kanal eredu hau aztergai dauden kasu guztien baldintza partikularretara moldatzen da, eta kontuan hartzen du, besteak beste: transmisore-turbina-hargailu arteko kokapen erlatiboa, aerosorgailuaren tamaina, palen errotazio gehienezko abiadura, transmisore eta hargailuaren antenen ezaugarriak, eta frekuentzia.*

*Tesi honetan lortutako emaitzei esker, lehenengo kasuak antzeman zirenetik Telekomunikazioen Nazioarteko Batasunak proposatutako ikerketa eskariei erantzuna ematen zaie.*



## RESUMEN

---

*La presencia de un parque eólico provoca una serie de efectos sobre las señales electromagnéticas que pueden dar lugar a una degradación de la calidad de los servicios de telecomunicaciones proporcionados en sus cercanías.*

*En lo que respecta a la difusión de televisión, esta afección es notable en el caso de la señal analógica. Sin embargo, el efecto de un parque eólico en la difusión de televisión digital no había sido determinado hasta ahora.*

*Por otra parte, la evaluación de la posible degradación de estos servicios se ha realizado tradicionalmente mediante modelos que caracterizan la señal dispersada por las aspas del aerogenerador. Estos modelos clásicos de dispersión no contemplan ni la contribución del mástil a la señal dispersada, ni la variabilidad temporal de la señal dispersada debida a la rotación de las palas, ni la influencia conjunta de un parque eólico compuesto por varias máquinas.*

*En este contexto, se plantea el primero de los objetivos principales de esta tesis: la evaluación empírica de la degradación causada en la recepción de señales de televisión digital DVB-T debida a la presencia de un parque eólico. Del estudio realizado, basado en medidas de campo, se concluye que las condiciones de recepción más críticas se dan en la zona de backscattering, donde la propagación responde a las características de un canal multitrayecto discreto variante con el tiempo.*

*Es por ello que, de cara a poder determinar futuras posibles degradaciones de los servicios proporcionados en la banda UHF, el segundo objetivo principal de esta tesis se centra en la propuesta un nuevo modelo de canal para caracterizar la propagación multitrayecto típica en los alrededores de un parque eólico en esta banda. Este modelo de canal se adapta a las condiciones particulares de cada caso en estudio: posición relativa transmisor-turbina-receptor, dimensiones del aerogenerador, velocidad máxima de rotación de las aspas, características de los sistemas radiantes del transmisor y receptor, y frecuencia de trabajo.*

*De esta manera, los resultados obtenidos en esta tesis dan respuesta a las solicitudes de estudio realizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones desde los primeros casos de impacto detectados.*



# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS</b>	<b>1</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Energía eólica y funcionamiento básico de los aerogeneradores .....	3
1.2 Efectos de los aerogeneradores sobre las señales electromagnéticas .....	6
1.3 Análisis de la problemática y motivación de la tesis .....	7
2. OBJETIVOS.....	11
3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	14
<b>CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACIÓN</b>	<b>17</b>
1. CANAL DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE UN PARQUE EÓLICO .....	19
1.1 Zona de <i>forward scattering</i> .....	19
1.2 Zona de <i>backscattering</i> .....	19
2. INTRODUCCIÓN AL MODELADO DE DE CANAL .....	21
3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE CANAL .....	25
3.1 Fundamentos del modelo de canal propuesto.....	25
3.2 Requerimientos de la metodología de estudio .....	26
3.3 Datos empíricos a utilizar .....	26
4. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA GENERAL .....	29
4.1 Uso de la respuesta impulsional del canal para la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores.....	29
4.2 Estimación de la respuesta frecuencial del canal en la señal DVB-T .....	31
4.3 Cálculo de la respuesta impulsional del canal .....	33

---

**CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN Y PROCESADO DE DATOS** **37**

---

1. CAMPAÑA DE MEDIDAS.....	39
1.1 Objetivos de la campaña de medidas.....	39
1.2 Descripción del parque eólico y su entorno .....	40
1.3 Infraestructura de transmisión TDT.....	41
1.4 Definición de tipos de medidas .....	43
1.5 Criterios de planificación de la campaña de medidas .....	44
1.6 Parámetros de medida y datos necesarios para el análisis .....	48
1.7 Equipamiento de medida .....	50
1.8 Metodología de medida .....	54
1.9 Resumen de la campaña de medidas .....	56
2. PROCESADO Y CLASIFICACIÓN DE DATOS.....	58
2.1 Procesado de datos .....	58
2.2 Filtrado y clasificación de datos.....	62

---

**CAPÍTULO 4: INFLUENCIA SOBRE DVB-T** **65**

---

1. EVALUACIÓN EMPÍRICA DE LA CALIDAD DE RECEPCIÓN DE DVB-T .....	67
2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE PROPAGACIÓN EN LAS DIFERENTES ZONAS DE INFLUENCIA .....	68
2.1 Caracterización empírica del canal de propagación .....	68
2.2 Parametrización de las características del canal de propagación .....	70
3. ANÁLISIS DE LOS UMBRALES DE C/N NECESARIOS PARA RECEPCIÓN QEF.....	77
3.1 Región de <i>backscattering</i> .....	77
3.2 Región de <i>forward scattering</i> .....	79
3.3 Región de <i>forward-backward scattering</i> .....	80
4. CONCLUSIONES.....	82



---

**CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DISPERSADA POR LOS AEROGENERADORES 83**

---

1. CARACTERIZACIÓN EMPÍRICA DE SEÑALES DISPERSADAS POR LOS AEROGENERADORES .....	85
1.1 Variabilidad de las señales dispersadas debida a la rotación de las palas del aerogenerador .....	85
1.2 Variabilidad de las señales dispersadas debida al cambio de ángulo de ataque de las aspas .....	87
1.3 Variabilidad de las señales dispersadas debida al cambio de orientación del rotor.....	90
1.4 Conclusiones.....	93
2. CARACTERIZACIÓN DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LOS AEROGENERADORES MEDIANTE SIMULACIONES.....	95
2.1 Óptica física para estimación de RCS.....	95
2.2 Condiciones de simulación .....	96
2.3 Resultados de las simulaciones .....	97
2.4 Conclusiones.....	102

---

**CAPÍTULO 6: MODELO DE DISPERSIÓN 105**

---

1. MODELOS DE DISPERSIÓN DE SEÑAL EN LOS AEROGENERADORES .....	107
1.1 Recomendación UIT-R BT.805 .....	107
1.2 Recomendación UIT-R BT.1893 .....	109
1.3 Modelo de Sengupta .....	112
1.4 Modelo del Departamento de Investigación de BBC .....	115
1.5 Modelo de Van Kats .....	116
1.6 Comparativa de los modelos teóricos de dispersión. Principales limitaciones. ....	120
2. EVALUACIÓN EMPÍRICA DE LOS MODELOS TEÓRICOS DE DISPERSIÓN.....	126
2.1 Selección de medidas para la comparativa .....	126
2.2 Herramienta de simulación .....	127

2.3	Estudio del error de predicción de los modelos de dispersión.....	130
2.4	Conclusiones.....	137
3.	NUEVO MODELO DE DISPERSIÓN .....	139
3.1	Cálculo de la sección radar biestática del cilindro .....	139
3.2	Efectos de campo cercano.....	144
3.3	Modelo de dispersión TSR .....	148
4.	CONCLUSIONES .....	151

---

**CAPÍTULO 7: CARACTERIZACIÓN DOPPLER** **155**

---

1.	ESTIMACIÓN ESPECTRAL DE POTENCIA DOPPLER .....	157
2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECTROS DOPPLER .....	160
2.1	Modelos de espectro Doppler existentes.....	160
2.2	Caracterización del espectro Doppler debido a la rotación de las aspas	162
3.	EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS ESPECTROS DOPPLER EN SEÑALES OFDM .....	171
3.1	Selección de condiciones y parámetros de simulación .....	171
3.2	Simulación de curvas BER frente a SNR .....	172
3.3	Análisis de los resultados.....	173
4.	SELECCIÓN DE ESPECTROS DOPPLER PARA EL MODELO DE CANAL .....	181
5.	CONCLUSIONES .....	183

---

**CAPÍTULO 8: MODELO DE CANAL DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE PARQUES EÓLICOS** **185**

---

1.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE CANAL.....	187
1.1	Datos de partida .....	188
2.	PROPUESTA DEL MODELO DE CANAL .....	190
2.1	Número de trayectos.....	190
2.2	Retardos relativos de los trayectos .....	190
2.3	Amplitud media de los trayectos.....	191

2.4 Espectro Doppler .....	193
3. CONCLUSIONES .....	195

---

<b>CAPÍTULO 9: APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>197</b>
--	------------

---

1. APORTACIONES DE LA TESIS .....	199
2. LÍNEAS FUTURAS .....	204
3. DIFUSIÓN DE RESULTADOS .....	206
3.1 Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT .....	206
3.2 Publicaciones internacionales .....	206
3.3 Congresos Internacionales .....	208
3.4 Jornadas de trabajo de la UIT-R.....	210
3.5 Congresos nacionales .....	212

---

<b>REFERENCIAS Y GLOSARIO</b>	<b>213</b>
-------------------------------	------------

---

REFERENCIAS .....	215
GLOSARIO .....	228

---

<b>ANEXOS</b>	<b>229</b>
---------------	------------

---

ANEXO I: Coordenadas de los aerogeneradores y otros centros .....	231
ANEXO II: Ejemplo de ficha de planificación.....	233
ANEXO III: Coordenadas de las localizaciones de medida .....	236
ANEXO IV: Configuración de las simulaciones BER vs SNR .....	238
ANEXO V: Curvas BER vs SNR correspondientes al canal medio .....	247

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

---

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS** **1**

---

Figura 1.1. Evolución de la potencia eólica acumulada a nivel mundial. 2001-2011 [1] .....	4
Figura 1.2. Estructura típica de un aerogenerador de eje horizontal [3]-[4] .....	5
Figura 1.3. Curva para la relación de protección entre señal directa y señal reflejada en función del retardo entre ambas para la Nota 4 [44] .....	8

---

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACIÓN** **17**

---

Figura 2.1. Ejemplo de situación de señales dispersadas por un parque eólico en la zona de retro-dispersión .....	20
Figura 2.2. Ejemplo de respuesta impulsional variante en el tiempo .....	22
Figura 2.3. Funciones de Bello.....	22
Figura 2.4. Ejemplo de respuesta impulsional del canal en presencia de un parque eólico .....	30
Figura 2.5. Patrón de inserción de portadoras piloto en la estructura de trama DVB-T [72] .....	31
Figura 2.6. Definición de las diferentes ventanas consideradas en el estudio.....	35
Figura 2.7. Transformada de las diferentes ventanas consideradas en el estudio	35

---

## **CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN Y PROCESADO DE DATOS** **37**

---

Figura 3.1. Vista aérea de los transmisores de TDT y otras torres de telecomunicación en Oiz .....	40
Figura 3.2. Ubicación del parque eólico Oiz y los transmisores TDT sobre base digital del terreno.....	41
Figura 3.3. Sistemas radiantes de TDT en Oiz: Itelazpi (izq.) y Abertis-Telecom (drcha.) .....	42
Figura 3.4. Perfil del terreno con la ubicación de los transmisores TDT y los aerogeneradores más próximos.....	43

Figura 3.5. Vista aérea con la ubicación del parque eólico y los puntos de recepción para la caracterización de la señal dispersada .....	46
Figura 3.6. Vista aérea con la ubicación del parque eólico y los puntos de recepción para la evaluación de la calidad del servicio de DVB-T.....	47
Figura 3.7. Esquema del sistema de medidas .....	50
Figura 3.8. Imagen y diagrama de radiación de la antena Televés Ref. 1125 .....	51
Figura 3.9. Imagen y diagrama de radiación de la antena Televés Ref. 1030 .....	52
Figura 3.10. Unidad móvil de medidas.....	53
Figura 3.11. Filmación de las condiciones de funcionamiento del parque .....	53
Figura 3.12. Esquema general del procesado de datos .....	60

---

<b>CAPÍTULO 4: INFLUENCIA SOBRE DVB-T</b>	<b>65</b>
---	-----------

---

Figura 4.1. Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de <i>backscattering</i> : aerogeneradores estáticos .....	69
Figura 4.2. Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de <i>backscattering</i> : aerogeneradores con aspas en movimiento .....	69
Figura 4.3. Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de <i>forward scattering</i> .....	70
Figura 4.4. Región de <i>backscattering</i> . BER después de Viterbi en función de la relación portadora a ruido (C/N).....	77
Figura 4.5. Región de <i>backscattering</i> . Valores de C/N umbral en función de las características del canal multitrayecto.....	78
Figura 4.6. Región de <i>forward scattering</i> . BER después de Viterbi en función de la relación portadora a ruido (C/N).....	80
Figura 4.7. Región de <i>forward-backward scattering</i> frente a región de <i>backscattering</i> . Valores de C/N umbral en función de las características del canal multitrayecto.....	81

---

<b>CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DISPERSADA POR LOS AEROGENERADORES</b>	<b>83</b>
---	-----------

---

Figura 5.1. Variación temporal de la señal dispersada por la turbina A28 (a) Palas estáticas (b) Palas en rotación.....	86
Figura 5.2. Caso 1. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de <i>pitch</i> .....	87
Figura 5.3. Caso 1. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas en rotación (b) Aspas con variación del ángulo de ataque..	88

Figura 5.4. Caso 2. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de <i>pitch</i> .....	89
Figura 5.5. Caso 2. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas quietas (b) Aspas con variación del ángulo de ataque.....	90
Figura 5.6. Caso 3. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de <i>yaw</i> . (Izq.) Posición inicial (Dcha.) Posición final .....	91
Figura 5.7. Caso 3. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas rotando (b) Cambio en la orientación del rotor 90° en sentido horario .....	91
Figura 5.8. Caso 4. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de <i>yaw</i> .....	92
Figura 5.9. Caso 4. Variación de las señales dispersadas por los aerogeneradores A30 (arriba) y A28 (abajo). .....	93
Figura 5.10. Sistema de coordenadas esféricas usado para especificar las direcciones de incidencia y de observación .....	96
Figura 5.11. Diagrama de dispersión (dBsm) del mástil para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ , $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ ) .....	98
Figura 5.12. Posiciones de las palas utilizadas para las simulaciones .....	98
Figura 5.13. Diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en posición 000 para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ , $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ ).....	100
Figura 5.14. Diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en posición 000 para incidencia lateral ( $\phi_i=90^\circ$ , $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=90^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ ).....	100
Figura 5.15. Comparativa del diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en cuatro posiciones para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ , $\theta_i=82^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=90^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ ) .....	100
Figura 5.16. Diagrama de dispersión (dBsm) del aerogenerador en posición 000 para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ , $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ ) .....	101
Figura 5.17. Comparativa de diagramas de dispersión (dBsm) del aerog. y sus elementos para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ , $\theta_i=82^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=97^\circ$ ) .....	102

---

## CAPÍTULO 6: MODELO DE DISPERSIÓN

105

Figura 6.1. Modelo simplificado y regiones de dispersión según la Rec. UIT-R BT.805 [44] .....	108
--	-----

Figura 6.2.	Geometría transmisor-turbina-receptor Rec. UIT-R BT.1893 [104] ..	110
Figura 6.3.	Geometría del factor de dispersión ideal según Sengupta [40] .....	113
Figura 6.4.	Geometría del trayecto según el modelo de BBC [41] .....	115
Figura 6.5.	Geometría de reflexión para el cálculo de C/I de Van Kats [42] .....	117
Figura 6.6.	Zonas de coordinación e interferencia según Van Kats [42] .....	118
Figura 6.7.	Relación entre las geometrías de los modelos propuestos por Sengupta (arriba), BBC (abajo izda.) y Van Kats (abajo dcha.) .....	120
Figura 6.8.	Modelos NASA/DOE MOD-0A 1977-1979 (izq) y NASA/DOE MOD-2 1982 (drcha) .....	125
Figura 6.9.	Método general de aplicación de los modelos de dispersión .....	128
Figura 6.10.	Ejemplo de resultado proporcionado por la herramienta $W_i^2$ .....	129
Figura 6.11.	Ejemplo de variación temporal de C/I, mediano y percentil 5 .....	133
Figura 6.12.	Ejemplo de variación temporal de C/I y resultados de las simulaciones de los modelos .....	134
Figura 6.13.	Medidas de C/I para diferentes orientaciones del rotor de un mismo aerogenerador en un mismo punto de recepción y resultados de las simulaciones de los modelos.....	135
Figura 6.14.	Simulaciones de C/I debidas al A30 según el Rec. UIT-R BT.1893 para el punto de recepción 4 en función de la dirección del viento .....	136
Figura 6.15.	Geometría del cilindro elíptico [118] .....	140
Figura 6.16.	Variación del diagrama de dispersión según la expresión modificada de Siegel en el plano horizontal $\theta_i=\theta_r=90^\circ$ .....	142
Figura 6.17.	Variación del diagrama de dispersión (RCS, dBsm) según la expresión modificada de Siegel en el plano vertical $\phi_r=0^\circ$ .....	143
Figura 6.18.	Evaluación numérica de los criterios de Welsh y Van Lil para campo cercano .....	145
Figura 6.19.	Ejemplo de efectos de campo cercano en patrones de RCS [126] ....	146
Figura 6.20.	Patrón de RCS en campo cercano de un cilindro conductor [140]....	147

---

## CAPÍTULO 7: CARACTERIZACIÓN DOPPLER

---

155

Figura 7.1.	Geometría del Doppler biestático en el plano horizontal .....	163
Figura 7.2.	Ejemplo 1: PSD Doppler correspondiente al aerogenerador A28 .....	164
Figura 7.3.	Ejemplo 2: PSD Doppler correspondiente al aerogenerador A27 .....	164
Figura 7.4.	Ejemplo 3: PSD Doppler estrecha correspondiente al aerogenerador A28, no ajustable con $S_\delta(f)$ .....	166
Figura 7.5.	Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 1 tras primer ajuste con el modelo $S_\delta(f)$ .....	167

Figura 7.6. Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 2 tras primer ajuste con el modelo $S_{\delta}(f)$ .....	168
Figura 7.7. Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 3 tras primer ajuste con el modelo $S_{no_{\delta}}(f)$ .....	168
Figura 7.8. Ejemplo 4: PSD Doppler ancha correspondiente al aerogenerador A28, con los límites de frecuencia calculados (magenta) y teóricos máximos (verde) .....	168
Figura 7.9. Proceso para la caracterización de las PSD Doppler estimadas .....	170
Figura 7.10. Curvas BER frente a SNR de los canales bajo, medio y alto en condiciones estáticas (—) y con espectro “Sel07” estimado (- - -)....	174
Figura 7.11. Curvas BER frente a SNR para el caso estático y para los espectros Doppler estimados “Sel 10” y “Sel 03” (canal medio) .....	175
Figura 7.12. Diferencias en SNR con respecto al caso estático ( $\Delta SNR$ ) en función de la anchura espectral ( $\Delta f$ ) .....	176
Figura 7.13. Diferencias en SNR con respecto al caso estático ( $\Delta SNR$ ) en función de la anchura espectral ( $\Delta f$ ) y sus valores $Promedio\{c,g\}$ .....	177
Figura 7.14. Curvas BER frente a SNR sobre canal medio de los ajustes exponenciales seleccionados para el modelo de canal.....	182

---

## ANEXOS

229

---

Figura A.1. Ejemplo de vista aérea en la ficha de planificación (punto I).....	233
Figura A.2. Ejemplo de gráfica de retardos en la ficha de planificación (punto I, Itelazpi).....	234
Figura A.3. Ejemplo de gráfica de retardos en la ficha de planificación (punto I, Abertis-Telecom) .....	235
Figura A.4. Selección 01: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	239
Figura A.5. Selección 02: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	239
Figura A.6. Selección 03: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	239
Figura A.7. Selección 04: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	240
Figura A.8. Selección 05: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	240
Figura A.9. Selección 06: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	240
Figura A.10. Selección 07: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	241
Figura A.11. Selección 08: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	241
Figura A.12. Selección 09: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	241
Figura A.13. Selección 10: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	242
Figura A.14. Selección 11: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	242
Figura A.15. Selección 12: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	242
Figura A.16. Selección 13: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	243



Figura A.17. Selección 14: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	243
Figura A.18. Selección 15: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	243
Figura A.19. Selección 16: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	244
Figura A.20. Selección 17: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	244
Figura A.21. Selección 18: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	244
Figura A.22. Selección 19: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	245
Figura A.23. Selección 20: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	245
Figura A.24. Selección 21: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	245
Figura A.25. Selección 22: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	246
Figura A.26. Selección 23: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	246
Figura A.27. Selección 24: espectro Doppler y ajuste exponencial .....	246
Figura A.28. Selección 01: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	247
Figura A.29. Selección 02: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	247
Figura A.30. Selección 03: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	248
Figura A.31. Selección 04: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	248
Figura A.32. Selección 05: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	249
Figura A.33. Selección 06: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	249
Figura A.34. Selección 07: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	250
Figura A.35. Selección 08: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	250
Figura A.36. Selección 09: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	251
Figura A.37. Selección 10: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	251
Figura A.38. Selección 11: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	252
Figura A.39. Selección 12: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	252
Figura A.40. Selección 13: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	253
Figura A.41. Selección 14: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	253
Figura A.42. Selección 15: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	254
Figura A.43. Selección 16: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	254
Figura A.44. Selección 17: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	255
Figura A.45. Selección 18: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	255
Figura A.46. Selección 19: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	256
Figura A.47. Selección 20: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	256
Figura A.48. Selección 21: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	257
Figura A.49. Selección 22: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	257
Figura A.50. Selección 23: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	258
Figura A.51. Selección 24: curvas BER frente a SNR para canal medio .....	258

# ÍNDICE DE TABLAS

---

---

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACIÓN** **17**

---

Tabla 2.1.	Modelo de canal TU-6 .....	24
Tabla 2.2.	Configuración del sistema DVB-T utilizada en España .....	32

---

## **CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN Y PROCESADO DE DATOS** **37**

---

Tabla 3.1.	Características de los modelos de aerogenerador en estudio .....	41
Tabla 3.2.	Características de los centros transmisores de TDT en Oiz .....	42
Tabla 3.3.	Parámetros de configuración del equipo de medida .....	54
Tabla 3.4.	Datos asociados a cada captura del espectro frecuencial en la campaña de medidas .....	57
Tabla 3.5.	Datos adicionales asociados a cada captura del espectro frecuencial tras el procesado .....	63

---

## **CAPÍTULO 4: INFLUENCIA SOBRE DVB-T** **65**

---

Tabla 4.1.	Incremento máximo de los umbrales de C/N sobre el umbral de C/N teórico de un canal Rice .....	79
------------	--	----

---

## **CAPÍTULO 6: MODELO DE DISPERSIÓN** **105**

---

Tabla 6.1.	Distribución de muestras para la comparativa entre los diferentes aerogeneradores .....	127
Tabla 6.2.	Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión .....	131
Tabla 6.3.	Distribución del error medio de predicción para cada uno de los aerogeneradores .....	132
Tabla 6.4.	Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión respecto al límite inferior de la medida de C/I .....	133

Tabla 6.5.	Límites de error normalizado del 10% de la expresión aproximada de Siegel .....	143
Tabla 6.6.	Aplicabilidad de la expresión simplificada de Siegel .....	144
Tabla 6.7.	Modelo de dispersión TSR de un aerogenerador en la banda UHF ..	148
Tabla 6.8.	Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión incluyendo el modelo TSR.....	149
Tabla 6.9.	Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión por localización .....	150
Tabla 6.10.	Resumen del modelo de dispersión TSR de un aerogenerador en la banda UHF en condiciones de campo cercano .....	151

---

<b>CAPÍTULO 7: CARACTERIZACIÓN DOPPLER</b>	<b>155</b>
--	------------

---

Tabla 7.1.	Ejemplo de efecto de la anchura espectral y la densidad espectral de potencia en las frecuencias mayores .....	177
Tabla 7.2.	Relaciones entre anchura espectral, densidad espectral de potencia en frecuencias mayores y diferencias en SNR con respecto al caso estático .....	178
Tabla 7.3.	Ejemplo de efecto del coeficiente de asimetría .....	179
Tabla 7.4.	Porcentaje de medidas en función de la posible degradación de la calidad de recepción y de la bondad del ajuste exponencial .....	180
Tabla 7.5.	Parámetros de ajuste de las PSDs seleccionadas para el modelo de canal .....	181
Tabla 7.6.	Espectros Doppler representativos para el modelo de canal .....	182

---

<b>CAPÍTULO 8: MODELO DE CANAL DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE PARQUES EÓLICOS</b>	<b>185</b>
---	------------

---

Tabla 8.1.	Datos de partida para adaptar el modelo de canal a un caso en estudio.....	188
Tabla 8.2.	Datos obtenidos a partir de los datos de partida recogidos en la Tabla 8.1 .....	189
Tabla 8.3.	Límites de aplicabilidad del modelo de dispersión TSR.....	191
Tabla 8.4.	Espectros Doppler representativos para el modelo de canal .....	194

---

**CAPÍTULO 9: APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS** **197**

---

Tabla 9.1. Conclusiones de la evaluación empírica de la degradación en los umbrales de recepción de DVB-T .....	200
---	-----

---

**ANEXOS** **229**

---

Tabla A.1. Coordenadas de los aerogeneradores del Parque Eólico Oiz I.....	231
Tabla A.2. Coordenadas de los aerogeneradores del Parque Eólico Oiz II.....	232
Tabla A.3. Coordenadas de los otros centros de telecomunicación en Oiz .....	232
Tabla A.4. Ejemplo de ficha de planificación.....	233
Tabla A.5. Información relativa a los aerogeneradores en estudio (punto I, Itelazpi).....	234
Tabla A.6. Información relativa a los aerogeneradores en estudio (punto I, Abertis-Telecom).....	235
Tabla A.7. Coordenadas de las localizaciones de medida para el análisis del canal de propagación.....	236
Tabla A.8. Coordenadas de las localizaciones de medida para el análisis de la calidad de DVB-T .....	237
Tabla A.9. Combinaciones de amplitudes-retardos utilizadas para las simulaciones de las curvas BER frente a SNR .....	238
Tabla A.10. Parámetros de los espectros Doppler seleccionados.....	259

*The experimenter who does not know what he is looking for will not understand what he finds.*

*- Claude Bernard*

---

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS**

---

El presente capítulo recoge algunos aspectos básicos sobre energía eólica y funcionamiento de los aerogeneradores para introducir la terminología utilizada a lo largo del documento. Además recopila teoría básica sobre dispersión electromagnética en la estructura de las turbinas y los efectos que puede provocar ésta en los diferentes servicios de telecomunicaciones. Posteriormente se desglosan los objetivos de la tesis y se describe la organización del documento.



# 1. INTRODUCCIÓN

---

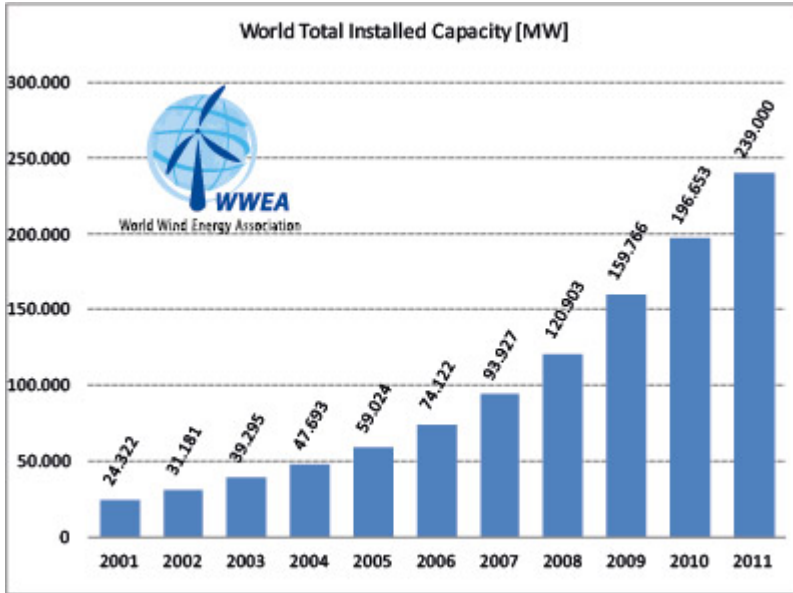
A finales de los años 70, coincidiendo con el inicio de la industria eólica moderna, comenzaron a producirse situaciones de interferencia cuando un parque eólico era instalado cerca de un transmisor de televisión o de los receptores de los usuarios. Desde entonces y hasta hoy, se han desarrollado múltiples estudios para tratar de caracterizar este fenómeno.

Con objeto de contextualizar el trabajo recogido en esta tesis, esta introducción describe el funcionamiento básico de la energía eólica y su situación actual. Posteriormente se analiza brevemente cómo distorsionan los aerogeneradores la señal electromagnética, para finalmente señalar cuáles son las circunstancias que motivan la realización del estudio aquí presentado.

## 1.1 Energía eólica y funcionamiento básico de los aerogeneradores

La creciente preocupación sobre el cambio climático, junto con el posible agotamiento y el alto precio de los combustibles fósiles (en especial el petróleo y el gas natural), está promoviendo un esfuerzo global en el desarrollo e implantación de fuentes de energía renovables. En este contexto, la energía eólica está creciendo a un ritmo anual del 30% a nivel mundial, de manera que en 2011 se alcanzó una potencia total instalada de 239 GW [1].

Al estudiar la tendencia de este crecimiento en la última década, se observa que la potencia eólica instalada se dobla cada tres años, lo cual demuestra la apuesta firme de los gobiernos por las energías renovables (ver Figura 1.1). En la Unión Europea, el Consejo de marzo de 2007 en Bruselas aprobó un plan energético obligatorio con el objetivo de producir el 20% de la energía a partir de fuentes renovables para el año 2020. Según un análisis realizado por la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA), la UE superará este objetivo gracias a que países como España o Alemania esperan estar varios puntos porcentuales por encima del porcentaje pactado, compensando así a países como Italia que parecen no estar en disposición de alcanzar este objetivo para 2020 [2]. Basándose en el desarrollo constante de la tecnología y en futuras políticas de apoyo a la energía eólica, la Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA) estima que se podría llegar a una capacidad eólica instalada de 1.900.000 MW hacia el año 2020.



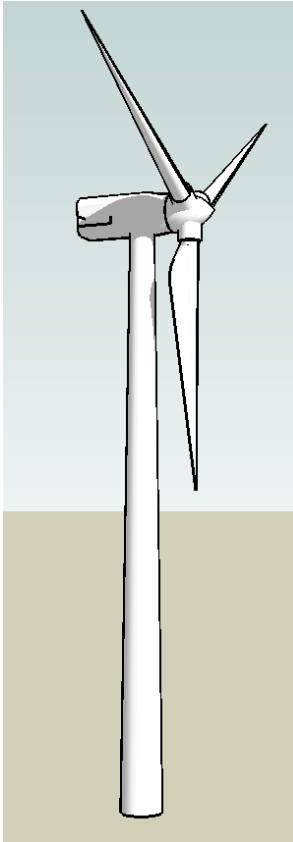
**Figura 1.1. Evolución de la potencia eólica acumulada a nivel mundial. 2001-2011 [1]**

Los aerogeneradores más habituales en las instalaciones actuales son los de eje horizontal, cuya estructura se compone de un mástil o torre, una góndola o nacelle, y el rotor [3]. La Figura 1.2 muestra una descripción más detallada de los elementos que conforman el aerogenerador.

La energía cinética del viento se convierte en energía eléctrica a través de la rotación de las aspas, que hacen girar un eje conectado a un generador en el interior de la góndola. Con el objetivo de obtener el mayor aprovechamiento de la energía, el rotor ha de orientarse adecuadamente con respecto a la dirección del viento. Para ello, los aerogeneradores actuales disponen de motores de viraje o *yaw* que dirigen la orientación de la nacelle a partir de la información obtenida de una veleta situada en su parte superior.

Por otra parte, los aerogeneradores están generalmente diseñados para rendir al máximo a velocidades de viento alrededor de 15 m/s. En caso de vientos más fuertes, el control de potencia del aerogenerador hace girar las palas del rotor alrededor de su eje longitudinal, variando así el ángulo de ataque de las aspas frente al viento (*pitch*), es decir, reduciendo el área de la pala que se enfrenta al viento y evitando así daños en el aerogenerador [3],[4].





Mástil o torre: normalmente es una estructura tubular de acero en forma de cono truncado. La torre se fabrica a partir de láminas de acero planas de algunos centímetros de espesor que son curvadas y soldadas entre sí hasta formar anillos. Estos anillos son a su vez soldados entre sí hasta obtener la torre de la altura deseada. Para los parques eólicos en tierra (*on-shore*), esta altura suele ser de entre 40 m – 80 m.

Góndola o nacelle: estructura metálica que contiene en su interior la maquinaria y componentes clave del aerogenerador.

Rotor: conjunto formado por las palas y el eje al que van unidas, a través de una pieza llamada buje. La mayor parte de los aerogeneradores que se instalan actualmente son modelo tripala, que ha demostrado ser la solución más estable/equilibrada desde el punto de vista dinámico y económicamente más eficaz que los sistemas con mayor número de palas. La longitud habitual de las palas varía entre 20 m – 40 m. Suelen estar fabricadas en fibra de vidrio con refuerzo de poliéster o epoxy. En su interior suelen incluir un elemento en forma de cable metálico como sistema de protección contra rayos. El plano de rotación suele estar inclinado  $6^{\circ}$ - $8^{\circ}$  para evitar el impacto de las palas con la torre.

**Figura 1.2. Estructura típica de un aerogenerador de eje horizontal [3]-[4]**

De esto se deduce que el mástil es el único elemento que permanece estático en el aerogenerador. Las aspas realizan el movimiento de rotación cuando la turbina está en régimen de funcionamiento y además pueden variar su ángulo de ataque (*pitch*) para controlar la potencia de salida, mientras que la nacelle se orienta en función de la dirección del viento (*yaw*).

Los aerogeneradores son, por lo tanto, grandes estructuras compuestas por partes metálicas y no metálicas en continuo movimiento. Esto provoca que produzcan una serie de efectos sobre las señales electromagnéticas que pueden llegar a afectar la calidad de los servicios de telecomunicaciones.

## 1.2 Efectos de los aerogeneradores sobre las señales electromagnéticas

Cuando una onda electromagnética alcanza un cuerpo, induce cargas y corrientes tanto en el interior de ese cuerpo como en su superficie. A frecuencias de microondas, incluso un metal no excesivamente buen conductor como el acero se comporta de manera similar a un conductor perfecto. Es más, incluso en el caso de trabajar con materiales dieléctricos, es suficiente con considerar las cargas y corrientes inducidas en su superficie [5].

Por lo tanto, la onda incidente induce corrientes que a su vez re-radian energía en varias direcciones. La distribución espacial de energía depende del tamaño, la forma y la composición del obstáculo, y en la frecuencia y naturaleza de la onda incidente [5],[6]. En realidad el mecanismo de dispersión electromagnética o *scattering* es un proceso complejo que incluye reflexiones especulares, interacciones múltiples, difracciones, ondas de superficie, y efectos de borde [5],[6].

Cuando la dirección de la señal dispersada es hacia la fuente de radiación, se denomina dispersión monoestática. Por el contrario, dispersión biestática es aquella en la cual la dirección de dispersión es cualquiera salvo la monoestática. Un caso concreto de dispersión biestática se da en la región de dispersión hacia delante, cuando el ángulo biestático es aproximadamente  $180^\circ$  [5].

En este contexto, el campo total en un determinado punto de observación debido a la señal re-radiada por los campos inducidos en el obstáculo está compuesto por la suma de los campos directo y dispersado. En general, la dispersión hacia delante o *forward scattering* es mayor que la retro-dispersión o *backscattering*. Sin embargo, la señal dispersada hacia delante está prácticamente desfasada con respecto a la señal directa, y por lo tanto se produce una cancelación con el campo directo, creando una zona de sombra tras el obstáculo. En general, el campo total no se anula completamente en la zona de sombra. A grandes distancias desde el obstáculo, la sombra se vuelve más profunda pero su anchura angular disminuye, de manera que la sombra creada por los campos biestáticos es difícil de detectar [5].

En el caso de los aerogeneradores, además, las características frecuenciales de la señal dispersada estarán distorsionadas debido al efecto Doppler. Como consecuencia de ello, se producirá en el espectro de la señal un ensanchamiento que dependerá no sólo de la velocidad de rotación angular de las aspas sino también de la longitud de las mismas, de la geometría entre las posiciones de

transmisor, turbina y receptor, y de la orientación relativa de la nacelle con respecto al transmisor y receptor.

En resumen, un aerogenerador puede dar lugar a una señal dispersada de naturaleza dinámica que estará modulada tanto en módulo y fase como en frecuencia debido a la rotación de las aspas [7],[8]. Las características temporales y frecuenciales de esta señal dispersada dependerán de múltiples factores. Algunos de ellos son fijos, tales como la distancia hasta el transmisor o las dimensiones y materiales de la turbina, mientras que otros serán variables en el tiempo, tales como la orientación de la nacelle o la velocidad de rotación de las palas.

Este tipo de distorsiones de la señal transmitida hacen que algunos servicios de radiocomunicaciones puedan verse afectados por la presencia de parques eólicos. Algunos de los servicios que pueden verse degradados son los radares de tráfico aéreo [9]-[15], radares meteorológicos [16]-[22], radares marítimos [23]-[26], sistemas de navegación aeronáutica como VOR [27]-[28] e ILS [29]-[30], radioenlaces de servicio fijo [31]-[33] y servicios de radiodifusión como la televisión terrestre [31],[34]-[43].

En cuanto a la difusión de televisión, los primeros casos de interferencia en la recepción de televisión analógica empezaron a darse a finales de los años 70 cuando un parque eólico era instalado en las cercanías de un transmisor de televisión. En estas situaciones, en la pantalla de televisión se pueden observar imágenes secundarias o fantasmas, que dependen de la amplitud y el retardo relativo entre la señal procedente del transmisor y las señales dispersadas. Además, grandes señales dispersadas con retardos pequeños pueden causar pérdida de color y detalle, parpadeo en la imagen, zumbidos en el sonido, y errores en las páginas de Teletexto [37],[43].

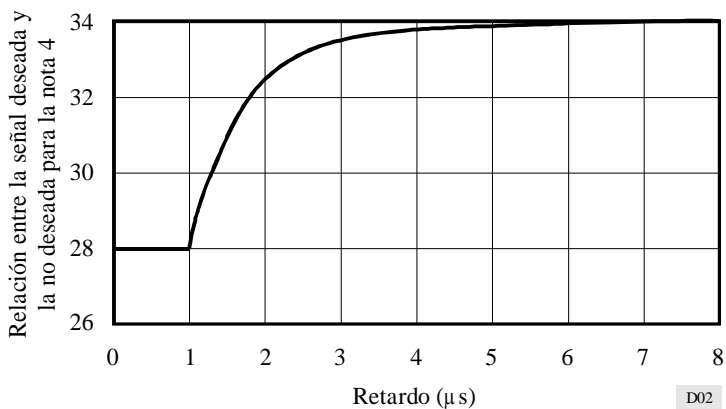
### **1.3 Análisis de la problemática y motivación de la tesis**

La detección de una posible degradación de la calidad de algún servicio de radiocomunicación tras la implantación de un parque eólico crea una situación de conflicto entre las partes afectadas. Las soluciones a posteriori, que podrían consistir en modificar la configuración del parque eólico o en un cambio de los emplazamientos utilizados para la difusión y transporte de los servicios, son costosas tanto económicamente como en tiempo de ejecución. Por ello es deseable disponer de modelos y algoritmos que permitan predecir estas situaciones antes de la instalación de nuevas turbinas eólicas o transmisores de

radiocomunicación y de esta manera buscar alternativas que faciliten la coexistencia de ambos servicios.

Esta tesis se centra en la banda UHF (300 MHz a 3 GHz), dentro de la cual se encuentran alojados los servicios de difusión de televisión terrestre. Al inicio de esta tesis, la única regulación en cuanto a la influencia de los aerogeneradores sobre la calidad de recepción de televisión se recogía en la recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones Rec. UIT-R BT.805 [44]. Esta recomendación plantea un método simplificado para evaluar la degradación causada a la recepción de televisión analógica por una turbina eólica. Este método propone, para cada uno de los puntos de recepción, calcular la intensidad de campo no deseada (debida a la dispersión sobre el aerogenerador) utilizando el modelo de dispersión proporcionado (descrito en el Capítulo 6 – Sección 1.1). Para ello han de tenerse en cuenta las características de los trayectos transmisor-turbina y turbina-receptor. Después, considerando la discriminación debida a la directividad de la antena receptora [45], se calcula la relación entre las señales deseada (procedente del transmisor) y no deseada.

El criterio para determinar el nivel de degradación de la señal procede de la Recomendación UIT-R BT.500 “Metodología para la evaluación subjetiva de la calidad de las imágenes de televisión” [46]. Así, para conseguir una categoría de evaluación de calidad y degradación de imagen correspondiente a la Nota 4 (calidad de imagen buena y una degradación de la imagen perceptible pero no molesta), la relación requerida entre la señal deseada y la no deseada en función del retardo entre ambas viene dada por la Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Curva para la relación de protección entre señal directa y señal reflejada en función del retardo entre ambas para la Nota 4 [44]

Sin embargo, desde la propia recomendación, se solicita que se realicen más trabajos para determinar la degradación que podría causar la instalación de un parque eólico compuesto por varias máquinas, así como que se estudien las propiedades temporales de la degradación causada por una turbina eólica [44].

En esta misma línea, la Cuestión UIT-R 69-1/6 “Condiciones para un servicio de televisión satisfactorio en presencia de señales reflejadas” [47] solicita el estudio de diversos aspectos de una manera más detallada. En concreto, considerando

- *que las señales reflejadas pueden tener un efecto distinto sobre las señales de televisión analógica y digital;*
- *que las señales reflejadas pueden tener efectos diferentes dependiendo de los diversos sistemas de modulación digital*

decide poner a estudio las siguientes cuestiones, de manera que los resultados de futuros estudios se incluyan en una o más recomendaciones:

- *¿Qué valor de la relación “señal directa/señal reflejada retardada” es necesario, para obtener una recepción de televisión de calidad satisfactoria, incluidos servicios de radiodifusión adicionales, teniendo en cuenta:*
  - *el desplazamiento de las señales reflejadas con respecto a las imágenes deseadas;*
  - *la variabilidad de las señales reflejadas, debida al movimiento de objetos reflectores, tales como aviones, turbinas eólicas, etc.;*
- *¿Cuál es la diferencia entre los efectos de las señales reflejadas en la recepción de la televisión analógica y digital?*
- *¿Cuál es el margen de multitrayecto necesario para compensar las turbinas eólicas cuando se establecen las relaciones recomendadas y la mínima intensidad de campo para la planificación de los servicios de radiodifusión de TV digital terrenal?*

En este contexto, dentro del Grupo de Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones (TSR) de la UPV/EHU se plantea una línea de investigación cuyo objetivo principal es la caracterización empírica de la influencia de los aerogeneradores en la calidad de los servicios de telecomunicaciones en la banda UHF, centrándose en la difusión de televisión digital terrestre, buscando así dar respuesta a algunas de las cuestiones anteriores.

Por una parte, se busca *evaluar* de forma empírica la potencial *degradación* que pueda causar un parque eólico sobre el *servicio de televisión digital DVB-T*.

Esta degradación ha de relacionarse, tal y como se solicita desde la UIT, con las relaciones de “señal directa/señal reflejada retardada” de un parque eólico compuesto por varias máquinas, así como con la variabilidad de estas señales reflejadas debida al movimiento de las turbinas eólicas.

Por otra parte, se decide *desarrollar un modelo de canal* que contemple las señales dispersadas por los múltiples aerogeneradores que puedan conformar un parque eólico, así como la variabilidad de las mismas debida a la rotación de las aspas. Disponer de un modelo de canal permitirá evaluar la posible degradación de un determinado parque eólico en cualquier servicio de radiocomunicación ofrecido en la banda UHF.

## 2. OBJETIVOS

---

El **objetivo principal** de la tesis es doble: por una parte, la evaluación de la degradación de la calidad del servicio de difusión de televisión digital terrestre según el estándar DVB-T debida a la presencia de un parque eólico; y por otra, la obtención de un modelo de canal para la caracterización de la influencia de los aerogeneradores en la calidad de los servicios de telecomunicaciones en la banda UHF. Además, se busca que el estudio tenga un enfoque fundamentalmente empírico.

Los **objetivos parciales** que se han definido para la consecución del objetivo principal son los siguientes:

### **Definición de la metodología del análisis empírico para la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores**

---

Es necesario definir una metodología de análisis que permita, a partir de la medida de señales reales, la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores. La definición de la metodología debe establecer las bases de un análisis que consiga determinar los aspectos más influyentes en el complejo proceso de dispersión y cuantificar su influencia sobre las propiedades de señal dispersada. De esta manera se puede modelizar el fenómeno y estimar las características de la señal dispersada en nuevas situaciones.

La validación de la metodología propuesta requiere su aplicación sobre datos empíricos, obtenidos a partir de la planificación y desarrollo de una campaña de medidas específica para el trabajo recogido en esta tesis. El resultado de esta campaña de medidas será una base de datos empíricos que permita, por una parte, la obtención de un modelo de canal que caracterice el fenómeno, y por otra, determine la posible degradación que este entorno puede provocar en la calidad de recepción del servicio de DVB-T. El posterior procesado, filtrado y clasificación de los datos necesarios para la validación requerirá el diseño de software específico.

## **Evaluación empírica del impacto de un parque eólico en la calidad de recepción del servicio de DVB-T**

---

El análisis de la degradación causada en la recepción de DVB-T debida a la presencia de un parque eólico se basa en la evaluación de los umbrales de relación portadora a ruido (C/N) para recepción casi libre de errores (QEF). Esta degradación se debe relacionar con las características propias del canal de propagación. La evaluación realizada permitirá determinar cuáles son los factores que hacen que el canal de propagación sea más exigente en términos de C/N umbral que los canales usados para testear el estándar.

## **Caracterización de la naturaleza de la señal dispersada por un parque eólico**

---

El análisis de las características de las señales dispersadas por un parque eólico, obtenidas de un caso de estudio real, permite determinar la influencia de los diferentes movimientos del aerogenerador en la señal dispersada.

Además se debe realizar una caracterización del diagrama de dispersión del aerogenerador basado en simulaciones de métodos de alta frecuencia, de manera que se pueda identificar la importancia relativa de los diferentes componentes del aerogenerador en la señal dispersada.

## **Obtención de un nuevo modelo de dispersión de señal para los aerogeneradores en la banda UHF**

---

El primer paso dentro de este objetivo parcial se centra en el estudio de los modelos teóricos propuestos por diferentes autores para estimar la señal dispersada por un aerogenerador en la banda UHF. Con este estudio se pretende determinar las limitaciones que presentan los modelos existentes, tanto a nivel teórico como mediante la comparación de los resultados que proporcionan los modelos con medidas de señal dispersada por los aerogeneradores.

Posteriormente, es necesario proponer un modelo de dispersión que tenga en cuenta las limitaciones de los modelos teóricos existentes y que se adapte a las características de los aerogeneradores actuales.



### **Caracterización del espectro Doppler de las variaciones temporales de la señal dispersada debidas a la rotación de las aspas**

---

La variabilidad temporal de la señal dispersada por los aerogeneradores puede representarse mediante la caracterización de los espectros Doppler correspondientes. Para ello se deben obtener los espectros Doppler a partir de los datos empíricos disponibles, buscar su caracterización a través de curvas de ajuste, y determinar cuáles pueden ser más representativos o críticos de cara a la propuesta de modelo de canal.

### **Propuesta de un modelo de canal que caracterice el canal de propagación en presencia de un parque eólico**

---

Finalmente, y basándose en los resultados obtenidos tras la consecución de los objetivos parciales anteriormente descritos, se busca proponer un modelo de canal que permita evaluar la posible degradación de la calidad de cualquier servicio de telecomunicaciones ofrecido en la banda UHF que pueda verse afectado por la presencia de un parque eólico.

### 3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

---

La presente tesis queda dividida en una serie de capítulos que recogen los resultados correspondientes a los objetivos parciales anteriormente presentados.

En este *Capítulo 1 – Introducción y objeto de la tesis* se ha descrito la terminología propia de la tecnología eólica y se ha presentado la problemática del impacto de los parques eólicos en los servicios de telecomunicaciones, así como se han desglosado los objetivos de la tesis y detallado la organización del documento.

El *Capítulo 2 – Metodología para la caracterización del canal de propagación* incluye la descripción del canal de propagación en presencia de un parque eólico, el planteamiento de modelo de canal que busca esta tesis, y la definición de la metodología de análisis desarrollada para conseguirlo.

El *Capítulo 3 – Obtención y procesado de datos* detalla la planificación y el desarrollo de las campañas de medidas de las cuales se obtienen los datos necesarios para el trabajo posterior. Este capítulo incluye también la descripción del procesado, filtrado y clasificación de estos datos.

El *Capítulo 4 – Influencia sobre DVB-T* presenta la evaluación empírica de la degradación de calidad de recepción de DVB-T en presencia de un parque eólico. Para relacionar los incrementos obtenidos en los umbrales de recepción con el canal de propagación correspondiente, se analiza cómo caracterizar el canal multitrayecto mediante los parámetros necesarios.

El *Capítulo 5 – Caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores* comienza con la evaluación de las señales dispersadas obtenidas en la campaña de medidas. Esta caracterización nos permite determinar la influencia de los diferentes movimientos del aerogenerador en la señal dispersada. Posteriormente, la caracterización del diagrama de dispersión del aerogenerador mediante simulaciones permite identificar la importancia del mástil en la señal dispersada por el aerogenerador completo.

El *Capítulo 6 – Modelo de dispersión* comienza con la descripción del estado del arte de los modelos propuestos por diferentes autores para estimar la señal dispersada por un aerogenerador en la banda UHF, indicando las limitaciones que presentan y que justifican la necesidad de un nuevo modelo de dispersión. Estas limitaciones se reflejan también en la evaluación de los errores de predicción proporcionados por los modelos teóricos al enfrentarlos a las medidas realizadas.

Considerando tanto estos resultados como los obtenidos en el capítulo anterior, se toma la contribución del mástil como la base de la propuesta del nuevo modelo de dispersión incluida al final del capítulo, que se ve validada tras su comparativa con los datos empíricos.

El *Capítulo 7 – Caracterización Doppler* comienza detallando el proceso para la estimación espectral de potencia Doppler a partir de las medidas realizadas, así como la caracterización de los espectros Doppler a partir de modelos de ajuste. Además, con objeto de identificar los espectros más representativos o críticos de cara a una posible degradación de un servicio con modulación OFDM, se realizan simulaciones de curvas BER frente a SNR utilizando una selección de los espectros Doppler obtenidos. Por último, se realiza un análisis de los resultados en función de las características de los espectros Doppler cuyo comportamiento se ha simulado. Este análisis nos permite seleccionar los espectros Doppler representativos que serán utilizados en el modelo de canal propuesto.

El *Capítulo 8 – Modelo de canal de propagación en presencia de parques eólicos* se basa en las conclusiones obtenidas en los Capítulos 6 y 7 para resumir las características del modelo de canal propuesto así como su modo de aplicación.

Por último, el *Capítulo 9 – Aportaciones de la tesis y líneas futuras* reúne las aportaciones más significativas de la tesis y la difusión de los resultados obtenidos, y plantea la posibilidad de continuar con el trabajo realizado mediante diversas líneas futuras.

En la parte final del documento se recopilan en *Referencias y Glosario* las citas bibliográficas referenciadas a lo largo del documento y los acrónimos utilizados. También se recogen los *Anexos* con información detallada sobre la campaña de medidas e información adicional sobre la configuración de las simulaciones de BER frente a SNR descritas en el Capítulo 7.



*Most men and women, by birth or nature, lack the means to advance in wealth and power, but all have the ability to advance in knowledge*

*- Pythagoras*

---

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACIÓN**

---

En este capítulo se define la metodología general a aplicar para la caracterización del canal de propagación en presencia de un parque eólico. En primer lugar se describen las características del canal de propagación en el caso de estudio, para posteriormente incluir una breve introducción a los modelos de canal. A continuación se exponen los requerimientos a considerar tanto en la definición de la metodología, como en la selección de los datos empíricos que serán la base del análisis. Posteriormente se valoran diferentes alternativas en cuanto al tipo de medidas a realizar. Por último, se define la metodología general, basada en el uso de la respuesta impulsional del canal para la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores. Además se detalla el modo de estimación de la respuesta impulsional del canal a partir de señales del servicio DVB-T.



# 1. CANAL DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE UN PARQUE EÓLICO

---

El canal de propagación actúa como un filtro variante en el tiempo y en la frecuencia, distorsionando la señal transmitida [48]. El canal de propagación que se busca caracterizar en esta tesis es el que se produce en caso de recepción estática en un entorno rural o semi-urbano, en las cercanías de un parque eólico. Teniendo en cuenta los efectos de los aerogeneradores sobre las señales electromagnéticas comentados en el Capítulo 1 - Sección 1.2, el canal de propagación presenta unas características diferentes en caso de que el receptor se encuentre en la zona de dispersión hacia delante (*forward scattering*) o en la zona de retro-dispersión (*backscattering*) [49].

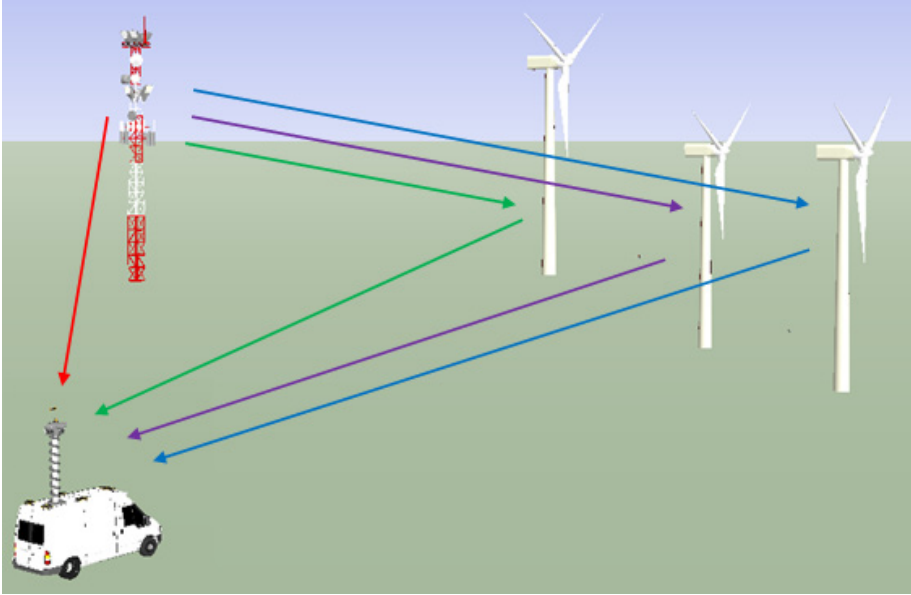
## 1.1 Zona de *forward scattering*

La zona de dispersión hacia delante se caracteriza por estar la posición del receptor en línea con el transmisor y el parque eólico. En estas situaciones, los retardos relativos de las señales dispersadas tienden a cero, de manera que se solapan en el tiempo con la señal directa del transmisor. Dado que en esa zona la señal dispersada está prácticamente en contrafase con respecto a la señal directa, se crea una zona de intensidad reducida o zona de sombra [5],[49].

La potencia recibida en la zona de *forward scattering* sufre variaciones temporales debidas a la rotación de las aspas [50]-[53]. Sin embargo, tal y como se demuestra posteriormente en el Capítulo 4, el efecto de las señales dispersadas sobre la calidad de recepción de DVB-T en esta zona parece despreciable más allá de la reducción de potencia propia de la zona de sombra [49]. Es por ello que el modelo de canal propuesto en esta tesis se centra en la llamada zona de retro-dispersión o *backscattering*.

## 1.2 Zona de *backscattering*

En la zona de *backscattering*, debido a la dispersión de la señal sobre la estructura de los aerogeneradores, en recepción se obtienen réplicas de la señal de transmisión, pero atenuadas, retardadas y con distinta fase respecto a la señal directa [54]. Una representación gráfica de este fenómeno se puede observar en la Figura 2.1.



**Figura 2.1. Ejemplo de situación de señales dispersadas por un parque eólico en la zona de retro-dispersión**

Es decir, nos encontramos en una situación de canal multirraya discreto, en la cual se puede discriminar una componente multicamino por cada uno de los aerogeneradores que componen el parque eólico. Además, el retardo de estas componentes será fijo para una posición determinada del receptor.

La amplitud de cada una de estas componentes dependerá de una serie de factores fijos como las distancias transmisor-aerogenerador y aerogenerador-receptor o las dimensiones y materiales de fabricación de la turbina, así como de un conjunto de factores variables tales como la orientación de la nacelle o la velocidad de rotación de las aspas.

La rotación de las aspas provocará, además, que cada una de estas componentes tenga cierta variabilidad temporal que puede ser caracterizada por su espectro Doppler.



## 2. INTRODUCCIÓN AL MODELADO DE DE CANAL

---

Un modelo de canal es una representación en forma matemática o algorítmica de las características de transferencia de un canal. Normalmente esta representación no se basa en los fenómenos físicos subyacentes sino en el ajuste de observaciones empíricas externas [55].

La definición de modelos de canal desarrolla un papel fundamental, ya que, por un lado, éstos son utilizados para testear nuevos sistemas de comunicaciones, y por otro, son necesarios para la planificación y desarrollo de las nuevas redes de radiodifusión basados en esos estándares [56].

Los modelos de canal han evolucionado al mismo ritmo que los sistemas para los que han sido testeados. Por ejemplo, para la evaluación de los sistemas de primera generación, se definieron modelos de canal de banda estrecha, es decir, sistemas donde simplemente se describe la atenuación entre el transmisor y el receptor. Sin embargo, los nuevos sistemas requieren la utilización de modelos de canal de banda ancha, donde se describa la selectividad en frecuencia o la variabilidad del canal en entornos variantes con el tiempo [56],[57].

La función básica que caracteriza al canal de banda ancha es su respuesta impulsional variante en el tiempo,  $h(t,\tau)$ . La respuesta impulsional variante en el tiempo es por tanto una función bidimensional, en la cual  $t$  representa el tiempo de observación y  $\tau$  el retardo de las diferentes componentes que conforman el canal, medido a partir de la primera señal perceptible que llega al receptor [55]. La representación gráfica de un ejemplo de respuesta impulsional variante en el tiempo se muestra en la Figura 2.2.

A través de transformaciones de Fourier de esta función básica  $h(t,\tau)$  se obtienen las conocidas como funciones de Bello, que proporcionan diferentes formas de analizar la variabilidad del canal en función de cuatro variables: el tiempo de observación  $t$ , el retardo  $\tau$ , la frecuencia  $f$  y la frecuencia Doppler  $\nu$  [58]. Así, la respuesta frecuencial variante con el tiempo  $T(f,t)$  se obtiene mediante transformada de Fourier de la respuesta impulsional variante en el tiempo  $h(t,\tau)$  con respecto a la variable de retardo  $\tau$ . Si se realiza la transformada de Fourier de la respuesta impulsional variante en el tiempo  $h(t,\tau)$  con respecto al tiempo de observación  $t$ , se obtiene el espectro Doppler de cada uno de los trayectos en la función respuesta al impulso Doppler variante o función *scattering*  $S(\tau,\nu)$ . Por último, transformando bien  $S(\tau,\nu)$  o  $T(f,t)$  con respecto a  $\tau$  o  $t$  respectivamente, se obtiene  $H(f,\nu)$ , que relaciona el espectro Doppler correspondiente a cada

componente frecuencial. A modo de resumen, en la Figura 2.3 se exponen las cuatro funciones definidas por Bello y sus respectivas relaciones [58]-[61].

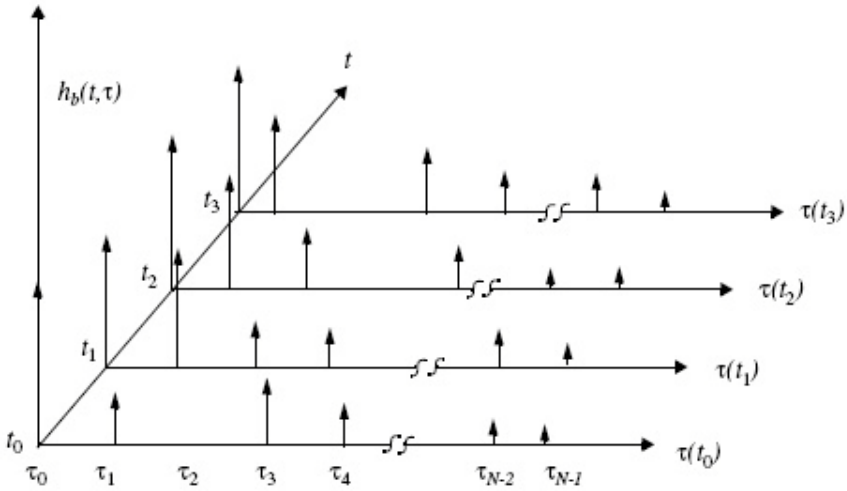


Figura 2.2. Ejemplo de respuesta impulsional variante en el tiempo

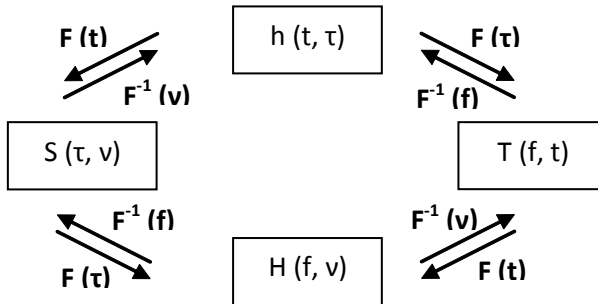


Figura 2.3. Funciones de Bello

Típicamente, en entornos inalámbricos interiores o móviles se dan situaciones de canal multitrayecto, en los cuales las señales llegan a través de diferentes trayectos con distintas atenuaciones y retardos, combinándose en la antena receptora de manera constructiva o destructiva. Además, si la longitud de los trayectos o la geometría del entorno cambian debido a variaciones en el medio de transmisión o al movimiento relativo de las antenas, la señal puede sufrir fluctuaciones importantes [55].

En términos generales, el canal multitrayecto produce dos tipos de efectos [55]:

- Ensanchamiento temporal (en retardo,  $\tau$ ) debido a la presencia de múltiples trayectos.
- Un comportamiento variante con el tiempo (variaciones en instantes de tiempo  $t$ ) del canal debido al movimiento del receptor o variaciones en el entorno.

Dentro de los canales multitrayecto, se distinguen los canales multitrayecto difusos y los canales multitrayecto discretos [55].

- Los canales multitrayecto difusos tienen lugar habitualmente en entornos urbanos densos, donde se produce un gran número de reflexiones no distinguibles entre sí.
- Los canales multitrayecto discretos se caracterizan por un número de componentes multicamino relativamente pequeño. Estas componentes son debidas a reflexiones en el entorno de propagación, habitualmente de tipo rural o en áreas abiertas.

Normalmente, para representar un canal de este último tipo se utilizan modelos de canal *Tapped Delay-Line* (TDL). Por una parte, para caracterizar la influencia del multicamino se definen una serie de trayectos discretos, cada uno de los cuales tiene asignado un retardo y un nivel de atenuación que pretende representar la distorsión debida a las reflexiones, difracciones o cancelaciones. Por otra parte, a cada trayecto se le asocia un espectro Doppler que es el encargado de representar la variabilidad del canal debida al movimiento, bien del receptor o transmisor, o bien del entorno de propagación [55]-[59]. Normalmente se supone además que los diferentes trayectos están incorrelados entre sí [60],[61].

Un ejemplo típico de modelo de canal para caracterizar la propagación en entornos urbanos es el TU-6 (ver Tabla 2.1), definido para las tecnologías GSM y aún hoy en día ampliamente utilizado [62].

Sin embargo, los modelos de canal normalmente empleados presentan una desventaja. Si bien pretenden caracterizar la propagación en un tipo de entorno concreto, parece difícil que un modelo obtenido a partir de unas medidas realizadas en un lugar determinado se adapte a las características de otra situación diferente, aunque ambos puedan ser considerados escenarios del mismo tipo [56]. Esta es una limitación que el modelo de canal propuesto en esta tesis pretende

evitar, gracias a un modelo que se adapta a las características concretas de cada caso en estudio, tal y como se recoge en el siguiente apartado.

**Tabla 2.1. Modelo de canal TU-6**

<b>Num. Trayecto</b>	<b>Retardo (<math>\mu s</math>)</b>	<b>Amplitud (dB)</b>	<b>Espectro Doppler</b>
1	0	-3	Jakes (clásico)
2	0,2	0	Jakes (clásico)
3	0,5	-2	Jakes (clásico)
4	1,6	-6	Jakes (clásico)
5	2,3	-8	Jakes (clásico)
6	5,0	-10	Jakes (clásico)

### 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE CANAL

---

#### 3.1 Fundamentos del modelo de canal propuesto

La peculiaridad de las características de propagación en las cercanías de un parque eólico permite proponer no un modelo de canal único sino un método para obtener un modelo de canal específico para cada caso en estudio.

En concreto, para un determinado transmisor que pudiera estar potencialmente afectado por la instalación de un parque eólico, y para cada uno de los puntos de recepción incluidos dentro de su zona de cobertura, se obtendría un modelo de canal de tipo TDL, definiendo:

- El número de componentes multitrayecto, dado por el número de aerogeneradores que conformen el parque eólico.
- El retardo de cada una de estas componentes, obtenido a partir de la diferencia en distancia entre los trayectos directo (transmisor-receptor) e indirecto (transmisor-turbina-receptor).
- La amplitud de cada una de las componentes multicamino, correspondiente a la potencia media de la señal dispersada por el aerogenerador y captada en el punto de recepción. La caracterización de la dispersión se realiza mediante modelos de dispersión que relacionan la señal incidente en el aerogenerador con la señal dispersada en todas las direcciones. La amplitud media de cada trayecto dependerá, por tanto, de la frecuencia de transmisión, las dimensiones del aerogenerador y la disposición relativa entre transmisor, aerogenerador y receptor.
- El espectro Doppler que caracterice la distribución espectral de la potencia de la señal dispersada, y permita por tanto determinar la variabilidad temporal de cada una de las componentes multicamino.

Para poder proponer un modelo de canal según lo anteriormente expuesto, es necesario definir una metodología de estudio que permita obtener un modelo de dispersión adaptado a las tipologías de los aerogeneradores actuales y la caracterización del espectro Doppler debido a la rotación de las aspas. Además, aunque el estudio presentado tiene una importante base teórica, se busca que la metodología tenga un enfoque fundamentalmente empírico, por lo que ha de definirse el tipo de medidas a realizar.

## 3.2 Requerimientos de la metodología de estudio

La definición de la metodología debe contemplar, al menos, los siguientes requerimientos:

- Es necesario poder discriminar la señal dispersada por cada uno de los diferentes aerogeneradores que forman un parque eólico.
- Se debe poder analizar la importancia de la geometría relativa entre transmisor-turbina-receptor. Además, la caracterización del diagrama de dispersión debe realizarse tanto en el plano horizontal (variación con el ángulo de acimut) como en el vertical (variación con el ángulo de elevación).
- Se necesita poder diferenciar el efecto de las partes estáticas y móviles del aerogenerador. Como se ha comentado anteriormente, mientras que el mástil se mantiene estático, la nacelle gira para orientarse en función de la dirección del viento y las aspas rotan para generar la energía eléctrica.

## 3.3 Datos empíricos a utilizar

La primera alternativa a valorar es si realizar medidas utilizando modelos a escala de aerogeneradores, como plantean los estudios recogido en [35] y [63], o recoger datos de campo alrededor de la instalación de un parque eólico real, tal y como se ha hecho en estudios como el presentado en [37].

La ventaja principal de utilizar modelos a escala es que se puede orientar libremente el aerogenerador o incluso medir la influencia de las distintas partes del aerogenerador por separado, todo ello en un ambiente controlado dentro de una cámara anecoica. Sin embargo, esto supone utilizar una frecuencia de transmisión que mantenga la proporción del modelo con la longitud de onda de la banda que realmente se quiere estudiar, por lo que las medidas no se pueden realizar directamente en la banda UHF. Además, la conductividad de los materiales que no son altamente conductores (el caso de las aspas para un aerogenerador) también debe escalarse para conseguir una representación precisa de los campos electromagnéticos [64],[65]. Por tanto, los modelos a escala, el equipamiento y la infraestructura necesarios son de muy alto coste.

Frente a esta opción, se pueden realizar medidas de señal dispersada alrededor de un parque eólico real. La principal desventaja es que el parque eólico normalmente estará formado por más de una máquina, lo que obliga a definir una metodología que permita discriminar el efecto de la señal dispersada en cada uno de los aerogeneradores. Además, el movimiento y orientación de las turbinas

serán, en general, dependientes de las condiciones de viento, y por lo tanto incontrolables. El primero de los inconvenientes comentado se puede solucionar seleccionando el tipo de señal a medir. Además, con la colaboración de la empresa promotora del parque, es posible realizar una serie de medidas controlando los movimientos de un aerogenerador, tal y como se explica en el Capítulo 3. La ventaja principal de medir en los alrededores de un parque eólico instalado es que asegura la aplicabilidad de los resultados a casos reales, ya que las medidas pueden realizarse en la banda de frecuencias de interés, y la estructura del aerogenerador en diseño, tamaño y materiales corresponde a un modelo comercial actual. Dado que uno de los objetivos planteados es realizar un estudio empírico que pueda ofrecer resultados aplicables a garantizar la coexistencia de los parques eólicos y los servicios de telecomunicaciones en la banda UHF, se considera más interesante *realizar las medidas* en condiciones reales, *en las cercanías de un parque eólico*.

En cuanto a la infraestructura de transmisión a utilizar, cabe la posibilidad de diseñar un sistema de transmisión y recepción propio (en la bibliografía se presentan varios ejemplos, como un sistema basado en un radar móvil [11] o un transmisor de prueba en la banda de UHF [43]), o utilizar la infraestructura de un servicio de difusión real. La principal ventaja de la primera opción sería disponer de sistemas de transmisión y recepción móviles e independientes entre sí, de manera que se pudiera caracterizar la dispersión de señales sobre un rango amplio de geometrías relativas entre transmisor, aerogenerador y receptor. Sin embargo, esto supone duplicar la infraestructura y el equipamiento necesarios, y con ello el coste de la campaña de medidas. Además, la altura del sistema radiante de este tipo de sistema de transmisión móvil típicamente no superaría los 6 m, lo que no parece adecuado para conseguir que la señal incida en toda la estructura de un aerogenerador de más de 50 m de altura con suficiente potencia. En este sentido resulta más adecuado utilizar la *infraestructura de un servicio de difusión real* que se encuentre cercana al parque eólico.

Por último es necesario definir la señal a transmitir. Para la caracterización detallada de la señal dispersada lo más adecuado sería disponer de una señal con una forma de onda conocida en el receptor que permitiera medir la respuesta impulsional del canal radioeléctrico, siguiendo la filosofía de las sondas de canal (*channel sounder*). El tipo más utilizado son señales formadas por una portadora modulada por secuencias binarias pseudo-aleatorias (PRBS) [66], de manera que la autocorrelación de estas secuencias permita la detección de cada componente multitrayecto de la señal recibida. A pesar de que esta señal sería ideal para la caracterización de la señal dispersada, su inserción en la infraestructura existente

es costosa debido a que podría suponer cortes en el servicio proporcionado, la modificación de equipos de transmisión o la obtención de una licencia de transmisión en un canal libre, entre otras. Es por ello que se opta por utilizar los servicios de difusión existentes, para evitar además limitaciones en cuanto a la duración de la campaña de medidas.

En el momento de realizar la campaña de medidas todavía no se había producido el cese de la transmisión de televisión analógica, por lo que existía la posibilidad de utilizar medidas de la señal PAL para evaluar la influencia del parque eólico. Tal y como se recoge en la Recomendación UIT-R BT.1439 “Métodos de medición aplicables en los estudios de televisión analógica y el sistema de televisión analógica global” [67], las líneas VIT de test incluidas dentro de la señal de televisión permiten realizar medidas de distorsión de la señal en banda base [68]. Esta metodología ha sido utilizada en estudios previos como el recogido en [37]. Sin embargo, presenta algunas limitaciones que impiden satisfacer los requerimientos recogidos en el apartado anterior. Por una parte, se debe demodular la señal, lo cual incluye un filtrado de la misma que puede degradar la propia distorsión que se desea analizar. Por otra parte, resulta complicado discernir las señales procedentes de los diferentes aerogeneradores que forman el parque eólico.

Por ello, se opta por utilizar la *respuesta impulsional del canal* que proporciona la señal de televisión digital terrestre (según el *estándar DVB-T*) [69], tal y como se comenta en el siguiente apartado, ya que permite realizar una caracterización del canal multitrayecto similar a la planteada para una sonda de canal, aunque con menor resolución.



## 4. DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA GENERAL

---

La metodología de estudio definida se basa, tal y como se ha justificado en el apartado anterior, en la medición de señales reales del servicio DVB-T transmitidas en las cercanías de un parque eólico. El presente apartado recoge la metodología general para obtener los datos que suponen la base del análisis posterior. La metodología particular aplicable a cada uno de los estudios a realizar (modelo de dispersión, estimación y caracterización de espectros Doppler y evaluación de calidad de DVB-T) se describe en los capítulos correspondientes.

### 4.1 Uso de la respuesta impulsional del canal para la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores

La amplitud y la variación de las señales dispersadas se pueden observar utilizando la respuesta impulsional del canal [37],[48],[54],[69]. En el caso en estudio, debido a la dispersión de señal en los aerogeneradores, junto con la señal directamente transmitida llegan al receptor réplicas retardadas en el tiempo, atenuadas y desfasadas, de manera que la respuesta impulsional del canal teórica en el dominio discreto para un cierto instante de tiempo  $h[l]$  viene dada por la Ecuación (2.1):

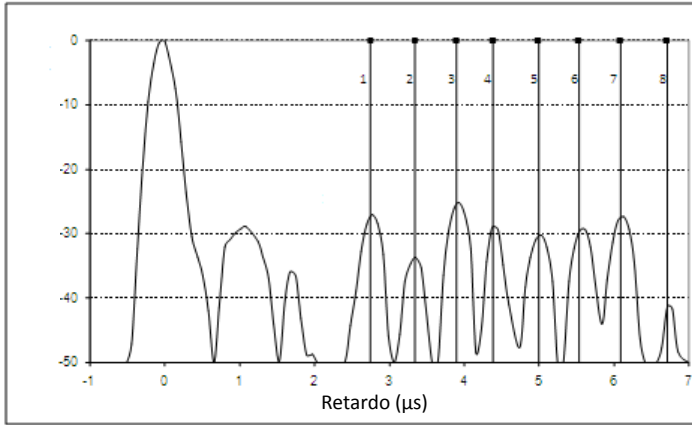
$$h[l] = \delta[l] + \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot \delta[l - \tau_i] \quad (2.1)$$

Donde  $M$  es el número total de ecos,  $\alpha_i$  representa la amplitud y el desplazamiento de fase del eco del trayecto  $i$ -ésimo,  $\tau_i$  representa el retardo del eco del trayecto  $i$ -ésimo y  $\delta[l]$  es la función de impulso unitario o delta de Dirac.

La Figura 2.4 muestra una respuesta impulsional de canal típica de una situación multitrayecto debida a la dispersión de señal en un parque eólico. Como se puede observar, la respuesta impulsional está compuesta por un rayo directo procedente del transmisor y una serie de ecos debidos a las turbinas [69].

Las líneas verticales representan los retardos teóricos de las señales dispersadas, que pueden calcularse a partir de la ubicación del transmisor, el receptor y cada una de las turbinas del parque eólico. Esto permite relacionar cada uno de los ecos con el aerogenerador correspondiente.

Una de las limitaciones de esta metodología es que requiere que la separación entre los retardos de turbinas consecutivas sea lo suficientemente grande como para poder discriminar las señales procedentes de cada una de ellas en la respuesta impulsional. Por ello esta metodología sólo permite la caracterización de la señal dispersada en la zona de *backward scattering* del aerogenerador, ya que en la zona de *forward scattering* las réplicas procedentes de los aerogeneradores se superponen con la señal directa del transmisor.



**Figura 2.4. Ejemplo de respuesta impulsional del canal en presencia de un parque eólico**

Mediante la estimación de respuestas impulsionales sucesivas en el tiempo, obtenemos la versión en el dominio discreto  $h[n, l]$  de la respuesta impulsional variante en el tiempo  $h(t, \tau)$  definida por Bello, de manera que  $n$  representa el instante de observación y  $l$  el retardo discreto [58]. De igual manera, realizando la transformada de Fourier de la respuesta impulsional variante  $h[n, l]$  con respecto a la variable de observación  $n$ , se obtiene el espectro Doppler de cada uno de los trayectos en la función respuesta al impulso Doppler variante  $S[m, l]$ .

La ventaja del canal de propagación en estudio es que los retardos de las diferentes componentes multitrayecto son fijos y conocidos. De esta manera, no es necesario trabajar con las matrices bidimensionales completas que supone considerar las funciones de Bello [58], sino que podemos ceñirnos a cada uno de los trayectos debidos a la señal dispersada en las diferentes turbinas, los cuales se corresponden con un valor concreto de retardo  $l$ , estable a lo largo del tiempo de observación  $n$ . Al detectar la contribución de una determinada turbina a lo largo de respuestas impulsionales sucesivas, se obtiene la evolución temporal de la señal dispersada por esa turbina y se puede relacionar con sus condiciones de

funcionamiento concretas (aspas en rotación o paradas, orientación del rotor, etc.). Realizando la transformada de Fourier de la señal dispersada compleja, se obtiene el espectro Doppler correspondiente al movimiento de ese aerogenerador en concreto.

### 4.2 Estimación de la respuesta frecuencial del canal en la señal DVB-T

La respuesta frecuencial del canal se puede obtener a partir de la señal de DVB-T gracias a las señales adicionales que se insertan en transmisión para su uso durante la fase de sincronización y equalización en el receptor. Estos símbolos OFDM con información constante y conocida son las portadoras piloto, y permiten la estimación de la respuesta del canal tanto en el dominio frecuencial como en el temporal [54],[70],[71].

Mediante Transformadas Rápidas de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) de secciones de señal de duración un símbolo, se extraen las portadoras piloto. El primer paso es la estimación del canal a las frecuencias de las portadoras piloto mediante la comparación entre las señales piloto antes y después de la transmisión. Después, estos coeficientes de referencia se utilizan para estimar la respuesta frecuencial del canal completa mediante interpolación, ya que el número de portadoras piloto es mucho menor que el número de portadoras de datos con información no conocida a priori. En la Figura 2.5 se muestra el patrón de inserción de portadoras piloto en la estructura de trama DVB-T. Se puede observar que en cada símbolo se inserta una portadora piloto por cada doce portadoras OFDM, y que la posición de las portadoras piloto se repite cada cuatro símbolos [72].

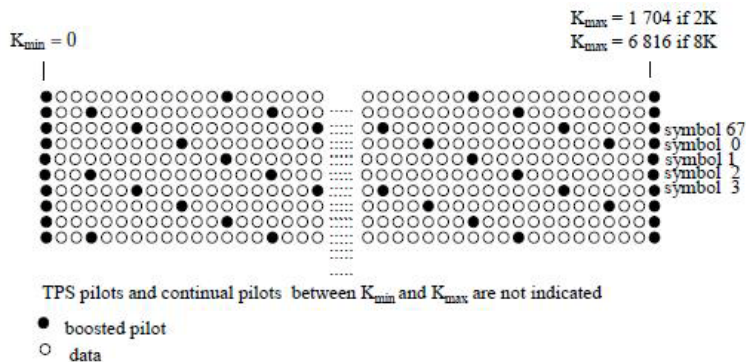


Figura 2.5. Patrón de inserción de portadoras piloto en la estructura de trama DVB-T [72]

De esta manera, si la respuesta frecuencial del canal se estima cada cuatro símbolos, contendrá la amplitud y fase de todas las portadoras piloto definidas [72]-[74].

La configuración de DVB-T utilizada en España se muestra en la Tabla 2.2. Dado que la duración de un símbolo es aproximadamente 1 ms, estimar la respuesta frecuencial del canal cada cuatro símbolos supone obtener una respuesta cada 4 ms.

**Tabla 2.2. Configuración del sistema DVB-T utilizada en España**

<b>Banda de transmisión</b>	UHF
<b>Modo de operación de portadoras</b>	8K
<b>Intervalo de Guarda</b>	1/4 (224 $\mu$ s)
<b>Tasa de codificación FEC</b>	2/3
<b>Sistema de modulación</b>	64QAM
<b>Esquema de transmisión</b>	No jerárquico
<b>Modo de operación de red</b>	MFN y SFN
<b>Ancho de banda de canal</b>	8 MHz

Estimar la respuesta frecuencial cada cuatro símbolos proporciona una estimación más precisa del canal de propagación pero hace que se pierda resolución en términos de variabilidad temporal del canal. Es por ello por lo que se opta por una doble estimación del canal: de cara a la evaluación de la amplitud de las componentes multitrayecto debidas a la dispersión de señal en los aerogeneradores, se trabaja con las respuestas frecuenciales obtenidas a partir de cuatro símbolos consecutivos, con el fin de trabajar con la información frecuencial completa del canal. Sin embargo, para la posterior obtención y caracterización de los espectros Doppler debidos a la rotación de las aspas, se utilizan las respuestas frecuenciales obtenidas cada símbolo, con el fin de trabajar con una mayor resolución temporal, y poder abarcar todo el rango de posibles desplazamientos en frecuencia Doppler. Teniendo en cuenta que la velocidad de rotación máxima de las aspas para el modelo G-52 de Gamesa es de 30,8 rpm y la longitud de su pala 25,3 m [4], la frecuencia Doppler máxima teórica será de  $\pm 440,64$  Hz. Si consideramos la frecuencia de muestreo cada cuatro símbolos,  $T_s=4480$   $\mu$ s, y los límites del espectro en frecuencia serían  $\pm 1/2T_s=\pm 111,60$  Hz, insuficientes para detectar el desplazamiento Doppler teórico máximo. Al estimar la respuesta impulsional cada símbolo, se multiplica por cuatro la frecuencia de muestreo, y los límites del espectro en frecuencia pasan a ser  $\pm 446,43$  Hz.

### 4.3 Cálculo de la respuesta impulsional del canal

La respuesta impulsional del canal en función del tiempo se obtiene mediante transformada inversa de Fourier de la respuesta frecuencial del canal [54]. El enventanado es la técnica utilizada para filtrar la señal en el dominio del tiempo y minimizar así los efectos de borde que provocan que el espectro FFT se vea ensanchado. En este caso, se aplica el enventanado sobre la respuesta en frecuencia del canal antes de la aplicación de la IFFT, para evitar efectos de ensanchado que puedan enmascarar las diferentes contribuciones de las que se compone la respuesta impulsional del canal [75],[76].

La selección de la ventana a aplicar ha de tener en cuenta las características de las diversas posibilidades existentes, y cuál se adecúa más a esta aplicación concreta. Por ejemplo, el uso de una ventana rectangular (lo que en la práctica supone no aplicar una ventana) no es recomendable debido a que, a pesar de que el lóbulo principal de su transformada es razonablemente estrecho, sus lóbulos laterales son altos, y por lo tanto la respuesta del filtro se extiende hacia las bandas laterales. Utilizar otro tipo de ventanas reduce la respuesta de los lóbulos laterales, a costa de ensanchar el lóbulo principal.

Para el caso en estudio, se han analizado las características de cuatro funciones de enventanado típicas del procesado digital de señal: rectangular, Hanning, Hamming y Blackman [75],[76].

#### VENTANA RECTANGULAR

Una ventana rectangular es aquella que posee un valor de 1 en todo el intervalo de la ventana, y de 0 para cualquier otro valor.

#### VENTANA DE HANNING

La ventana de Hanning se define a través de la Ecuación (2.2):

$$w(k) = 0.5\left(1 - \cos\left(2\pi\frac{k}{n}\right)\right) \quad k = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

Siendo  $n+1$  el número de muestras de la ventana.

#### VENTANA DE HAMMING

La ventana de Hamming se define a través de la Ecuación (2.3)

$$w(k) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi\left(\frac{k}{n}\right)\right) \quad k = 0, \dots, n \quad (2.3)$$

Siendo  $n+1$  el número de muestras de la ventana.

#### VENTANA DE BLACKMAN

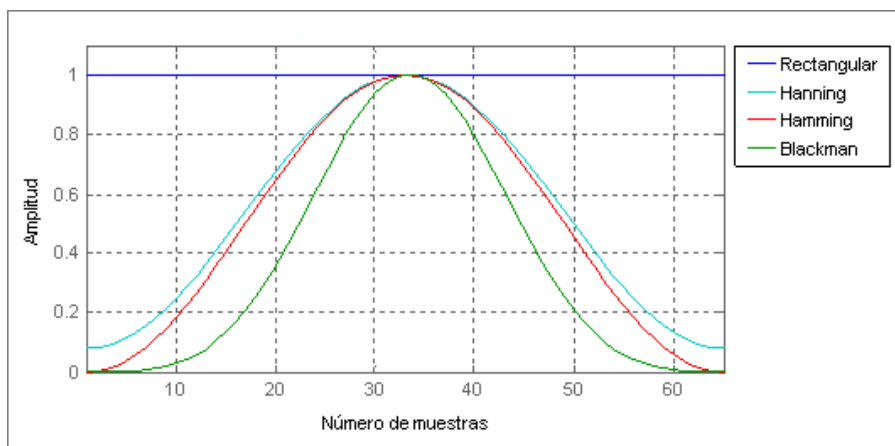
La ventana de Blackman se define mediante la Ecuación (2.4):

$$w(k) = 0.42 - 0.5 \cos\left(2\pi\left(\frac{k}{n}\right)\right) + 0.08 \cos\left(4\pi\left(\frac{k}{n}\right)\right) \quad k = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

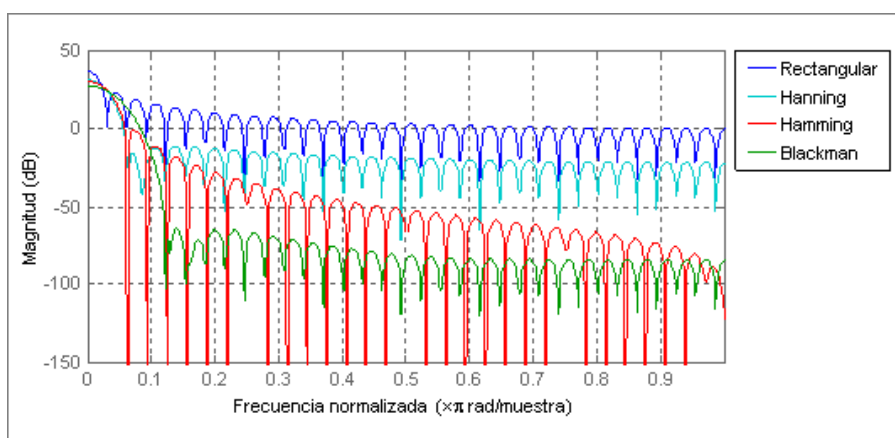
Siendo  $n+1$  el número de muestras de la ventana.

Para hacer una comparativa visual, se representan las características de las diferentes ventanas (ver Figura 2.6) y sus transformadas (ver Figura 2.7). Nótese que en el caso en estudio, la ventana se aplica sobre la respuesta frecuencial de canal estimada, y después se obtiene la respuesta impulsional mediante una IFFT. Por tanto, el efecto del enventanado en la respuesta impulsional se corresponde al mostrado en la Figura 2.7.

Una ventana con un lóbulo principal ancho podría enmascarar componentes de la respuesta impulsional próximos entre sí, por ejemplo, las contribuciones debidas a la señal dispersada por dos aerogeneradores cuyo retardo relativo a la componente principal sea similar. Sin embargo, una ventana con lóbulo principal estrecho tiene un mayor nivel en sus lóbulos laterales, lo cual podría falsear la amplitud de las componentes retardadas de la respuesta impulsional (y con ello la contribución de la señal dispersada por los aerogeneradores). Tras realizar diferentes comprobaciones sobre señales de prueba, se opta por la ventana Hamming como solución de compromiso entre la resolución temporal y la precisión en la amplitud de las diferentes componentes de la respuesta impulsional.



**Figura 2.6.** Definición de las diferentes ventanas consideradas en el estudio



**Figura 2.7.** Transformada de las diferentes ventanas consideradas en el estudio





*It is a capital mistake to theorize before one has data. Insensibly one begins to twist facts to suit theories, instead of theories to suit facts.*

*- Sir Arthur Conan Doyle, "A Scandal in Bohemia"*

---

## **CAPÍTULO 3: OBTENCIÓN Y PROCESADO DE DATOS**

---

En este capítulo se detallan las campañas de medidas, realizadas en los años 2009 y 2010, de las que se obtuvieron los datos necesarios para realizar el análisis posterior. Posteriormente, se describe el procesado y filtrado de estos datos.



## 1. CAMPAÑA DE MEDIDAS

---

En el presente apartado se describen las campañas de medidas de las que se han obtenido los datos necesarios para la caracterización del canal de propagación en presencia de aerogeneradores en la banda UHF y su influencia sobre la calidad de servicio de DVB-T. Estas campañas de medidas se llevaron a cabo a lo largo de varios meses en 2009 y 2010.

En primer lugar se comentan los objetivos de la campaña de medidas, y posteriormente se describe el entorno en el que se realizan la captura de datos y la infraestructura de transmisión de la señal DVB-T. Tras establecer los criterios de planificación, se determinan los parámetros y datos necesarios para el análisis y se detalla el equipamiento de medida utilizado para obtenerlos. Por último, se incluye la metodología seguida para la obtención de datos y se realiza un resumen de las medidas realizadas durante la campaña.

### 1.1 Objetivos de la campaña de medidas

El objetivo general de la campaña de medidas es doble: por una parte, la caracterización empírica de las señales dispersadas por los aerogeneradores en la banda UHF, y por otra, la evaluación de la influencia del parque eólico en la calidad de servicio del sistema DVB-T. Para ello, se opta por medir transmisiones reales de la señal DVB-T en las cercanías de un parque eólico, por lo que en el proceso de planificación y desarrollo de la campaña de medidas habrá que tener en cuenta las características de los transmisores reales (altura y diagrama de radiación del sistema de antenas, etc.) y de las condiciones del entorno.

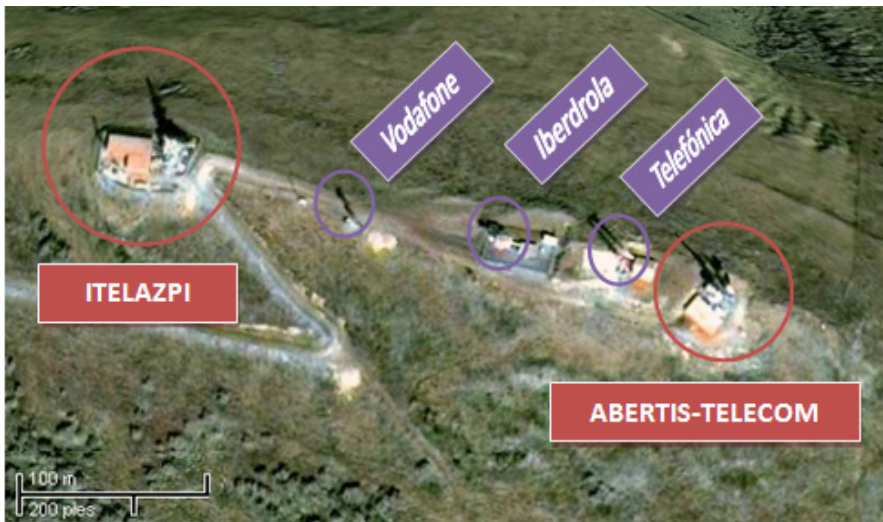
Además, es necesario determinar los aspectos que puedan resultar más influyentes en la amplitud de las señales procedentes de los aerogeneradores, como paso previo a la obtención de un diagrama de dispersión que permita estimar la posible interferencia de un determinado parque eólico sobre los servicios de telecomunicaciones.

La campaña de medidas a desarrollar ha de tener en cuenta todos los aspectos comentados en el capítulo anterior, ajustándose a las recomendaciones y estándares definidos en [73] y [77].

## 1.2 Descripción del parque eólico y su entorno

Las campañas de medidas se llevaron a cabo en las proximidades de un parque eólico situado en Monte Oiz (Vizcaya). En la cima existen dos transmisores de televisión que actualmente difunden servicios de televisión digital terrestre (TDT) en la banda UHF. Uno de estos centros es gestionado por Itelazpi (operador regional de telecomunicaciones, dependiente del Gobierno Vasco) y el otro por Abertis-Telecom (anteriormente Retevisión) [78]-[80].

Además existen tres torres de telecomunicaciones adicionales entre los transmisores de televisión, que corresponden a servicios de telefonía móvil (Vodafone y Telefónica) y comunicaciones de empresas privadas (Iberdrola), tal y como se puede apreciar en la Figura 3.1. Las coordenadas donde se ubican estos centros, que también dispersan la señal emitida desde los transmisores de Itelazpi y Abertis-Telecom, se incluyen en el Anexo I.



**Figura 3.1. Vista aérea de los transmisores de TDT y otras torres de telecomunicación en Oiz**

Los aerogeneradores del parque eólico se encuentran alineados a lo largo de la cima en dos grupos, situados a ambos lados de los transmisores. El parque eólico Oiz I consta de treinta aerogeneradores modelo G52 de Gamesa [4] alineados en la cresta este del monte Oiz a lo largo de aproximadamente 3 km, y numerados del 1 al 30 de este a oeste. El parque eólico Oiz II se extiende aproximadamente 1,5 km hacia el oeste y está compuesto por diez aerogeneradores modelo G58 de Gamesa [4], numerados del 1 al 10 de oeste a

este. Las características principales de estos modelos de aerogenerador se muestran en la Tabla 3.1. Las coordenadas donde se ubican los aerogeneradores se incluyen en el Anexo I.

**Tabla 3.1. Características de los modelos de aerogenerador en estudio**

	<b>G52 – Oiz I</b>	<b>G58 – Oiz II</b>
Longitud mástil	55 m	55 m
Diámetro inferior del mástil	3,3 m	3,3 m
Diámetro superior del mástil	2,3 m	2,3 m
Diámetro rotor	52 m	58 m

El área situada al sur del parque eólico es bastante llana, con una altitud media de unos 200 m. El área al norte es más accidentada, con altitudes medias entre 200 y 450 m. La Figura 3.2 muestra la altimetría de la zona, cuyos datos se han obtenido de una base digital del terreno con una precisión de rejilla de 10 m.



**Figura 3.2. Ubicación del parque eólico Oiz y los transmisores TDT sobre base digital del terreno**

### 1.3 Infraestructura de transmisión TDT

Las características principales de los centros y sistemas de antenas de Itelazpi y Abertis-Telecom se recogen en la Tabla 3.2. Nótese que las frecuencias de transmisión incluidas corresponden con el plan de frecuencias establecido en 2009 y 2010.

**Tabla 3.2. Características de los centros transmisores de TDT en Oiz**

Centro transmisor	Itelazpi	Abertis-Telecom
Coordenadas UTM (ED79)	532987, 4786465	533250, 4786400
Cota	994 m	1019 m
Sistema radiante	30 paneles de dipolos Disp: 3:3:3:3:3:3:3:3:3 Tilt: 5°	8 paneles de dipolos Disp: 2:2:2:2 Tilt: 5°
Altura del sistema radiante	61 m	15 m
Frecuencia transmisión	794 MHz (canal 61)	810 MHz (canal 63)

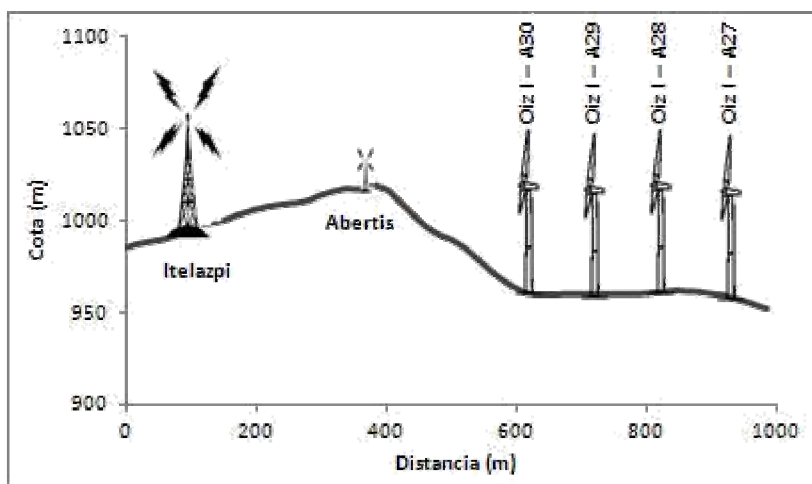
Como se puede observar en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.3, el sistema radiante para la TDT de Itelazpi está compuesto por conjuntos de tres paneles dispuestos con orientaciones a diez caras, por lo que se obtiene un diagrama de radiación prácticamente omnidireccional. En cambio, el sistema radiante de Abertis-Telecom está compuesto por conjuntos de dos paneles dispuestos en orientaciones a cuatro caras, lo que da lugar a un diagrama de radiación menos omnidireccional.



**Figura 3.3. Sistemas radiantes de TDT en Oiz: Itelazpi (izq.) y Abertis-Telecom (drcha.)**

La distancia entre los transmisores de televisión y las turbinas más cercanas está en un rango de 250 a 950 metros. Teniendo en cuenta que los sistemas radiantes se encuentran varios metros por encima de los aerogeneradores y la

inclinación de las antenas de los transmisores TDT, la señal llega a las turbinas con la máxima ganancia del diagrama de radiación (especialmente en el caso de los aerogeneradores de Oiz I). La Figura 3.4 muestra un perfil del terreno con la ubicación de los transmisores y los primeros aerogeneradores de Oiz I.



**Figura 3.4.** Perfil del terreno con la ubicación de los transmisores TDT y los aerogeneradores más próximos

## 1.4 Definición de tipos de medidas

Para poder evaluar las variaciones en el nivel de señal dispersada según los diferentes regímenes de funcionamiento de los aerogeneradores, se definen dos tipos de medidas a llevar a cabo.

### Régimen de funcionamiento normal del parque eólico

En este caso se realizan medidas cuando el parque eólico está operando con normalidad. Esto supone que el eje del rotor de cada aerogenerador estará orientado según la dirección del viento y sus aspas en movimiento, o bien las palas estarán quietas si no hay condiciones de viento favorables para la producción de energía.

Las medidas específicas para la evaluación de la calidad del servicio de televisión digital se realizan en régimen de funcionamiento normal.

### Control de los movimientos de *yaw* y *pitch* del aerogenerador

---

Con ayuda del promotor del parque eólico, se pueden realizar medidas mientras se produce un movimiento controlado del motor de viraje o *yaw* del aerogenerador [43], así como del mecanismo de control del ángulo de ataque de las aspas frente al viento o *pitch*. Para llevar a cabo estas maniobras controladas, previamente es necesario forzar la parada de la rotación de las palas.

Las medidas controlando la operación de los aerogeneradores permiten evaluar la variación en el nivel de la señal dispersada cuando cambia un determinado factor mientras que el resto permanecen constantes. Así, las medidas con control de *yaw* permiten analizar la influencia de la orientación de la turbina con respecto a transmisor y receptor, mientras que las medidas con control de *pitch* permiten observar el efecto de la variación del área de las aspas enfrentada a la señal incidente.

## 1.5 Criterios de planificación de la campaña de medidas

Tal y como se ha comentado en el Capítulo 2 – Apartado 4, la metodología propuesta para la caracterización de las señales dispersadas y posterior propuesta de modelo de canal sólo es válida en la zona de *backscattering* donde es posible discriminar las señales dispersadas por cada aerogenerador en la respuesta impulsional. Sin embargo, la evaluación de la posible degradación de la calidad de DVB-T se realiza contemplando la mayor variedad de situaciones de recepción posible, incluyendo zonas de *forward scattering*. Además, debido a la disposición del parque eólico, hay ciertos puntos de recepción que se encuentran tanto en la zona de *backscattering* de los aerogeneradores de Oiz - I como en la zona de *forward scattering* de los aerogeneradores de Oiz – II. Aparte de esta salvedad, los criterios de planificación son comunes para la selección de emplazamientos para ambos tipos de medidas:

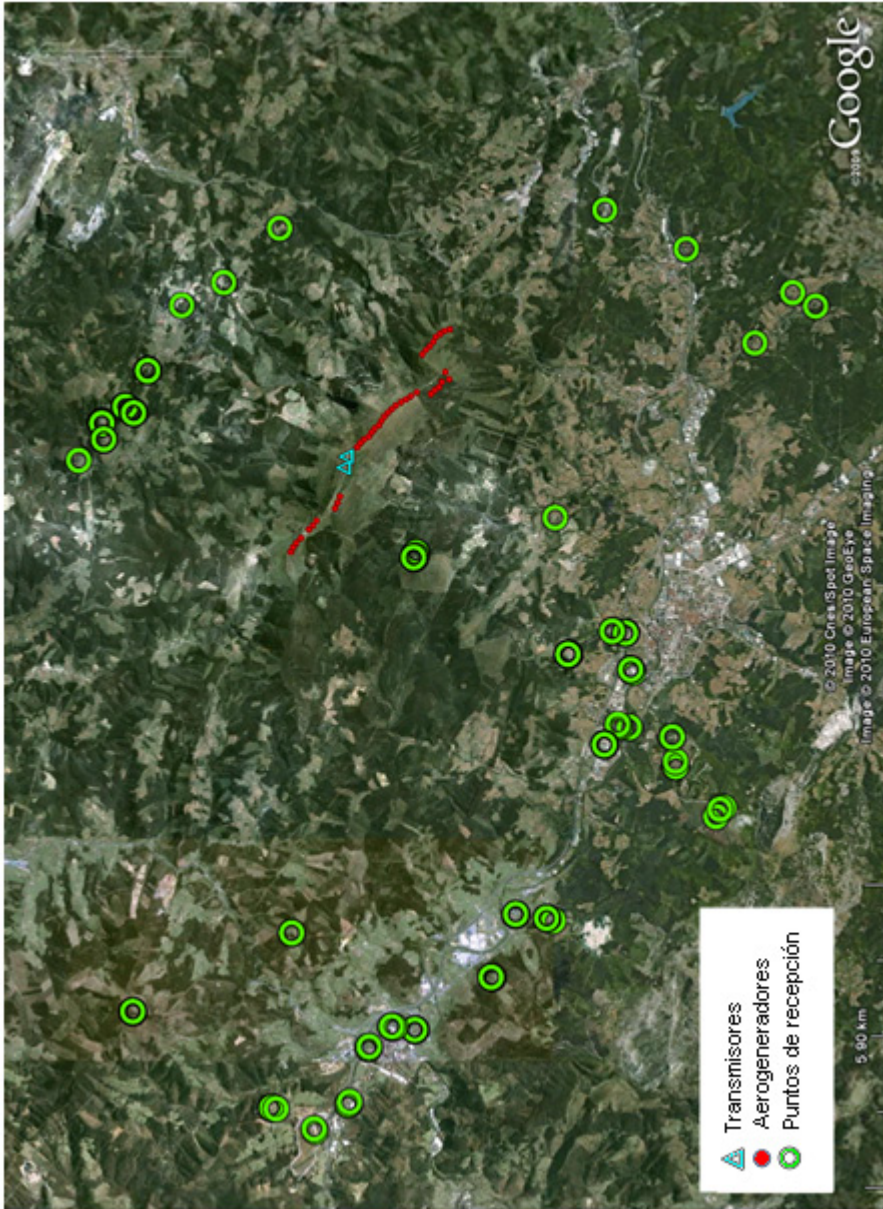
- Entornos rurales o semi-urbanos, de manera que se eviten influencias adicionales sobre la señal de DVB-T [73].
- Puntos de recepción en visión directa con los transmisores y los aerogeneradores del parque eólico (al menos con los más próximos a los transmisores), evitando emplazamientos en los que casas u otros obstáculos cercanos impidan la condición de visión directa.



- Emplazamientos distribuidos alrededor del parque eólico, con objetivo de obtener el rango más amplio posible de valores de acimut y elevación en las ubicaciones relativas transmisor-turbina-receptor.
- Criterios de distancia entre transmisor y receptor: distancia mínima determinada por efectos de campo cercano (se establece en 2 km), distancia máxima determinada por el límite del área de cobertura (se establece en 14 km).
- Para el caso de las medidas de caracterización de las señales dispersadas, ubicaciones donde la respuesta impulsional permita discriminar la señal procedente de los distintos aerogeneradores, al menos para uno de los dos centros transmisores.
- Conjunto de puntos suficientemente amplio como para considerar los resultados estadísticamente fiables y generalizables.

Los emplazamientos seleccionados para la caracterización de la señal dispersada se muestran en la Figura 3.5, mientras que los emplazamientos elegidos para las medidas de calidad de DVB-T se muestran en la Figura 3.6.

De cada uno de los puntos planificados, se elabora una ficha con información detallada sobre el mismo: una pequeña descripción de la ubicación, sus coordenadas, una vista aérea, condición de visión directa y retardos relativos de las señales procedentes de los aerogeneradores del parque eólico. Un ejemplo de esta ficha de planificación se recoge en el Anexo II.



**Figura 3.5.** Vista aérea con la ubicación del parque eólico y los puntos de recepción para la caracterización de la señal dispersada

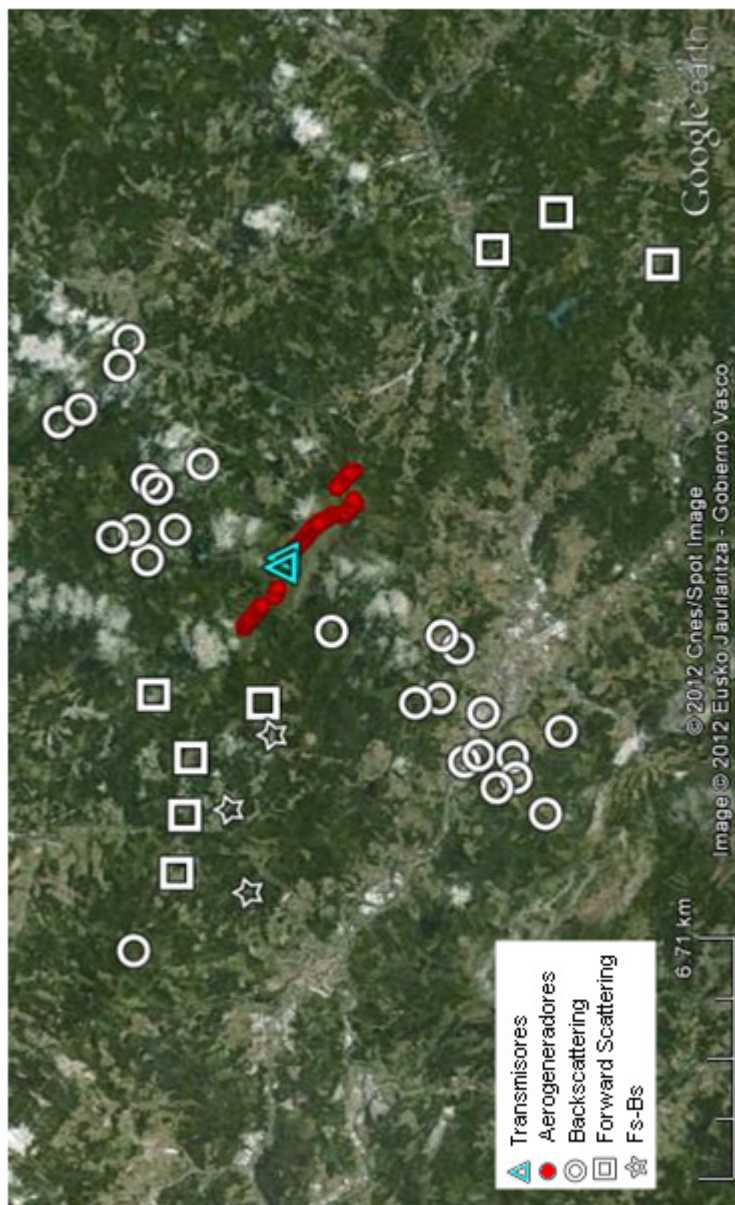


Figura 3.6. Vista aérea con la ubicación del parque eólico y los puntos de recepción para la evaluación de la calidad del servicio de DVB-T

## 1.6 Parámetros de medida y datos necesarios para el análisis

En esta sección se describen los parámetros de la señal DVB-T y los datos adicionales necesarios para caracterizar la dispersión de la señal en el aerogenerador y la potencial degradación en la calidad de DVB-T.

### Capturas de trazas del espectro frecuencial

La traza de la señal se corresponde con la amplitud de las portadoras que constituyen el espectro de la señal OFDM. La señal DVB-T captada en el sistema de medidas presenta unas características frecuenciales que se han visto modificadas debido a las condiciones propias del canal de propagación. En el caso en estudio, el canal de propagación genera una situación de recepción multitrayecto en la que se suman vectorialmente las señales que llegan a la antena tras haber recorrido diferentes caminos de propagación, siendo estas señales procedentes principalmente de la dispersión en los aerogeneradores.

Las capturas de trazas del espectro se realizan en un ancho de banda de 10 MHz alrededor de la frecuencia central del canal a medir, para evitar que el espectro de la señal de DVB-T de 8 MHz [72] se vea recortado.

Uno de los aspectos importantes a considerar es el tiempo de captura. En el caso de las medidas con control de aerogeneradores, la duración de la captura se corresponde con el tiempo necesario para realizar la maniobra correspondiente en el aerogenerador. En el caso de las medidas en funcionamiento normal del parque, este tiempo tiene que ser lo suficientemente largo como para caracterizar las variaciones temporales de la señal dispersada en varios ciclos de rotación de las aspas. Para los modelos G52 y G58 de Gamesa, esta velocidad de giro oscila entre 14,6 y 30,8 rpm, lo que equivale a entre 2 y 4 s por cada giro aproximadamente [4]. Por otra parte, es necesario considerar la capacidad de almacenamiento necesaria si se extiende mucho la duración de las medidas. Como solución de compromiso se optó por un tiempo de medida de 10 s, que se redujo a 5 s en el caso de las medidas realizadas durante 2010 debido a limitaciones en el equipo de medida.

### Potencia de la señal RF

La potencia de señal DVB-T recibida ha de medirse realizando una integración de la densidad espectral de potencia en un ancho de banda de 8 MHz centrado en el canal en estudio [72]-[74].

La medida de la potencia recibida se mide a la entrada del equipo correspondiente, de forma que, conocidas las pérdidas de atenuación del conexionado hasta la antena, se puede calcular la potencia entregada por la antena receptora. Además, aplicando el factor K de la antena utilizada, se podría determinar el nivel de campo eléctrico recibido si fuera necesario.

### Respuesta impulsional

La respuesta impulsional del canal de transmisión se puede calcular (aplicando una transformada inversa de Fourier) a partir de la respuesta frecuencial del canal. El módulo de la respuesta frecuencial se puede calcular directamente de las muestras IQ usando funciones de correlación [73].

### Curvas de BER vs C/N

El Bit Error Rate (BER) en función de las relaciones portadora a ruido (C/N) es la figura de mérito más importante para cualquier sistema de transmisión digital [81]. Para evaluar la posible influencia de los aerogeneradores en la calidad de la señal DVB-T, se estima el umbral de C/N para recepción Quasi Error Free (QEF). Esta condición corresponde a un valor de BER después de Viterbi de  $2 \cdot 10^{-4}$  [72]-[74],[82].

### Datos adicionales

Además de los parámetros propios de la señal de DVB-T, son necesarios una serie de datos adicionales para el análisis posterior:

- Datos de posicionamiento, que permitan la localización exacta del punto de medida para poder determinar la geometría relativa entre los transmisores, el parque eólico y el punto de recepción, así como simulaciones de visión directa.
- Estado de funcionamiento del parque, es decir, si los aerogeneradores se encuentran en movimiento, velocidad de rotación de las aspas, orientación con respecto al viento, etc. Esta información se puede obtener de dos fuentes:
  - Por una parte, imágenes del parque en el momento de la captura de señal DVB-T, cuando las condiciones meteorológicas lo permiten.
  - Por otra parte, estadísticas de viento proporcionadas por Iberdrola Renovables [83], empresa responsable del parque eólico. Las medidas de viento se realizan en la estación situada en la cima de Oiz. Se obtienen medidas de velocidad y dirección del viento tanto instantáneas como promediadas cada diez minutos.

## 1.7 Equipamiento de medida

Esta sección describe el sistema empleado en la campaña de medidas de campo de la que se obtienen los datos empíricos necesarios para llevar a cabo el análisis posterior. En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de interconexión de los diferentes elementos, descritos a continuación.

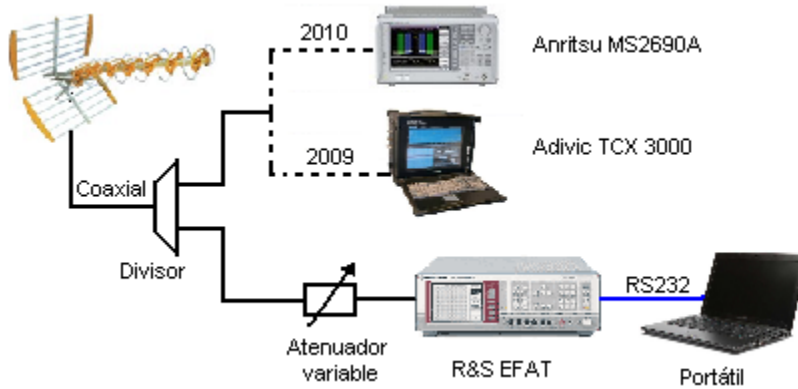


Figura 3.7. Esquema del sistema de medidas

### Adivic RF Recorder / Anritsu Signal Analyzer MS2690A

El sistema de medidas se basa en los capturadores de señal RF ADIVIC TCX 3000 [84] y Anritsu Signal Analyzer MS2690A [85], para capturar y almacenar en tiempo real la señal de televisión digital. El primero de ellos fue utilizado en la primera fase de la campaña de medidas durante la primavera de 2009, mientras que el segundo fue utilizando en la segunda fase a lo largo de varios meses de 2010.

El equipo RF ADIVIC TCX 3000 tiene una velocidad de muestreo de 12,5 Mmuestras/s para un span de 10 MHz, con 16 bits de resolución. El equipo Anritsu MS2690A tiene una velocidad de muestreo de 20 Mmuestras/s para un span de 10 MHz, con 16 bits de resolución. Estas características permiten una caracterización detallada de la señal recibida, ya que al capturar varios segundos de señal en tiempo real se puede analizar el efecto de la rotación de las aspas en la señal dispersada por el aerogenerador.

### Receptor Software DBA (Digital Broadcast Analysis)

El receptor software DBA (Digital Broadcast Analysis) [86]-[87] es una herramienta desarrollada por el Grupo de Tratamiento de la Señal y

Radiocomunicaciones (TSR) de la UPV/EHU. Permite obtener la respuesta frecuencial del canal, la respuesta impulsional del canal, la constelación IQ y los principales parámetros de calidad de la señal de DVB-T.

### TV Test Receiver EFA-T de Rohde&Schwarz

El equipo R&S EFA 40/43 Test Receiver [88] se utiliza para la comprobación de parámetros básicos de la señal TDT y la estimación de una respuesta impulsional aproximada para comprobar el nivel de multitrayecto en el punto de recepción. La respuesta impulsional proporcionada por el equipo no se utiliza para el análisis empírico de la dispersión, debido a que no permite determinar la variación temporal de la señal con la misma precisión que permite el análisis de la respuesta impulsional obtenida en el procesamiento posterior a partir de la señal capturada con el Advic RF Recorder o el Anritsu Signal Analyzer.

Por otra parte, el equipo permite la obtención de curvas de BER frente a C/N de manera automática para la evaluación de la potencial degradación de la recepción de DVB-T. Para este tipo de medidas se utiliza un PC con un software de control específico.

### Antenas

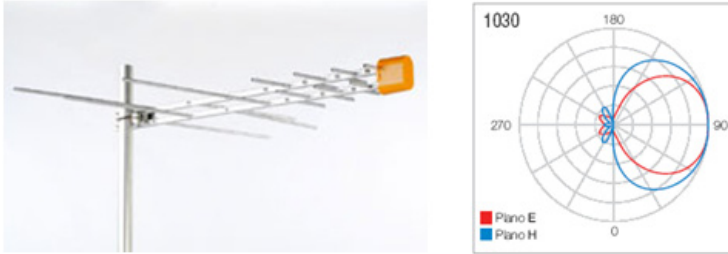
Para la realización de las medidas se utilizaron dos antenas diferentes, cuya característica común es que aplican prácticamente la misma ganancia a los transmisores y a los aerogeneradores más cercanos (teniendo en cuenta la separación relativa entre ellos, la distancia al parque eólico desde los distintos puntos de recepción y el ancho de haz a 3 dB del diagrama de radiación de la antena).

La primera de las antenas es tipo Yagi-Uda, modelo Infinito de Televés, Ref. 1125 (ver Figura 3.8), que proporciona una ganancia de 15 dB para las frecuencias medidas.



**Figura 3.8.** Imagen y diagrama de radiación de la antena Televés Ref. 1125

La segunda es una antena logoperiódica, modelo Logarítmica BIII/UHF de Televés, Ref. 1030 (ver Figura 3.9), con una ganancia de 9,25 dB en la banda de trabajo [89].



**Figura 3.9. Imagen y diagrama de radiación de la antena Televés Ref. 1030**

### Elementos de interconexión

Los cables utilizados para la interconexión de la antena receptora y los equipos son de 50  $\Omega$ . Este valor es la impedancia característica de todos los equipos y elementos usados en el sistema de medida. Se utilizan cables coaxiales y latiguillos de conectores N, así como transiciones para interconectar diferentes elementos, y un divisor de tres puertas en caso de utilizar el Advic o Anritsu y el R&S EFA-T simultáneamente. Todos los elementos de interconexión han sido previamente caracterizados en un analizador de redes calibrado.

### Unidad móvil de medidas

La unidad móvil de medidas es una furgoneta modelo Mercedes VITO que ha sido acondicionada en la zona de carga para poder alojar los equipos que componen el sistema de medidas. Dentro de esta zona de carga existe una división para aislar el habitáculo donde se sitúa el grupo electrógeno, que alimenta a todos los equipos de medida, del resto de elementos del sistema.

La unidad móvil está equipada con un mástil hidráulico que permite situar la antena de recepción a una altura de 6 m, con lo que las condiciones de recepción se asemejarían a las existentes en una vivienda de dos pisos con una antena en el tejado (ver Figura 3.10).

### Adquisición adicional de datos

Se utiliza un receptor GPS para obtener la información de posicionamiento del punto de medida, en concreto el modelo GPSmap 76 de Garmin [90]. Además se utiliza una cámara de vídeo con zoom óptico 70x para poder grabar las



condiciones de funcionamiento del parque eólico en el momento de la medida. Con objetivo de estabilizar la imagen se hace uso de un trípode, tal y como se puede apreciar en la Figura 3.11.



**Figura 3.10. Unidad móvil de medidas**



**Figura 3.11. Filmación de las condiciones de funcionamiento del parque**

## 1.8 Metodología de medida

### 1.8.1 Medidas para la caracterización del canal de propagación

Una vez que la unidad móvil se encuentra en la localización deseada, se registran los datos de posicionamiento mediante la información proporcionada por el GPS y se realiza una descripción general del entorno y del estado de funcionamiento del parque.

Tras realizar el montaje del equipamiento y orientar la antena situada en el mástil hacia los transmisores, se configura manualmente el captador de espectro. La ganancia y el nivel de referencia han de ajustarse en cada ubicación para adaptar el margen dinámico y evitar la saturación del amplificador de entrada del equipo. Además, como se ha comentado anteriormente, el tiempo de captura depende del tipo de medida a realizar (control del movimiento de los aerogeneradores o funcionamiento normal del parque). Los parámetros de configuración principales se indican en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3. Parámetros de configuración del equipo de medida**

<b>Frecuencia central</b>	794 MHz (Itelazpi) 810 MHz (Abertis-Telecom)
<b>Span</b>	10 MHz
<b>Ganancia (dB)</b>	[0 a 35 dB]
<b>Nivel referencia (dBm)</b>	[30 a -100 dBm]
<b>Tiempo de captura</b>	- Funcionamiento normal: 10 s (Adivic), 5 s (Anritsu) - La duración de la maniobra en caso de medidas con control de aerogeneradores

Para poder relacionar las capturas de señal con los emplazamientos en los que fueron obtenidas, se opta por una nomenclatura de las capturas del tipo “XXX-YY”, donde XXX identifica la localización del punto de medida e YY es la numeración secuencial de las medidas realizadas en una misma ubicación. Además, a cada captura se le asigna un identificador de “Grupo” que corresponde a la localización en la que se realizó la medida, lo que permite relacionar entre sí medidas llevadas a cabo en la misma ubicación geográfica en diferentes días de la campaña.

Además de la captura de las trazas del espectro frecuencial, en ocasiones puede interesar comprobar el nivel de multitracto existente en un determinado

punto de medida visualizando la respuesta impulsional del canal con ayuda del EFA-T.

Siempre que las condiciones meteorológicas lo permitan, se utiliza una cámara de vídeo para captar el estado de funcionamiento del parque y tratar de sincronizar las medidas con el movimiento de los aerogeneradores.

De esta manera se obtienen los datos necesarios para la caracterización de las señales dispersadas por los aerogeneradores y, en general, del canal de propagación resultante. Por lo tanto, estas medidas se realizan en todos los casos.

### 1.8.2 Medidas para la evaluación de la calidad de DVB-T

Para obtener los umbrales de C/N correspondientes a la recepción QEF, se sigue una metodología adicional incluida a continuación. El umbral de C/N correspondiente al criterio QEF se obtiene disminuyendo la relación de C/N hasta que el BER después de Viterbi es  $2 \cdot 10^{-4}$ . Para ello, existen dos posibilidades:

- Incrementar el nivel de ruido mediante una fuente externa de ruido, añadir este ruido a la señal de DVB-T recibida y obtener así el valor umbral de C/N. El receptor profesional EFA-T, controlado mediante una herramienta software, permite general diferentes niveles de ruido aditivo hasta obtener el umbral buscado.
- Atenuar progresivamente el nivel de señal DVB-T recibido mediante un atenuador variable ubicado en el cable de antena, hasta conseguir un valor de BER próximo al umbral de recepción QEF.

En la primera fase de la campaña de medidas, se aplicaron ambas técnicas, obteniéndose resultados similares. Es por ello que, para evitar redundancias, en el análisis recogido en el Capítulo 4 sólo se han incluido las medidas llevadas a cabo mediante el generador de ruido interno del receptor EFA-T.

En la zona de *backscattering*, las medidas se realizan en cada punto de recepción apuntando la antena en diferentes direcciones. La primera medida se realiza apuntando la antena de recepción hacia el transmisor, y las medidas sucesivas se realizan desapuntando la antena en pasos de  $15^\circ$  en acimut. De esta manera, cuando la antena no está apuntando hacia el transmisor, se aplican diferentes valores de ganancia a las señales dispersadas por los aerogeneradores. Es decir, a medida que el desapuntamiento es mayor, la ganancia aplicada a la señal procedente del transmisor es menor, mientras que la ganancia aplicada a las señales dispersadas se mantiene o aumenta. Esto permite, en un mismo punto de

medida, poder evaluar la influencia de diferentes niveles de multitrayecto en los umbrales de C/N medidos.

En las zonas de *forward scattering*, las medidas se llevan a cabo apuntando la antena hacia al transmisor.

## 1.9 Resumen de la campaña de medidas

La campaña de medidas desarrollada según la planificación planteada en las secciones anteriores se llevó a cabo en una primera fase entre los meses de Marzo, Abril y Mayo de 2009, durante 22 días de medida, y en una segunda fase entre los meses de Marzo, Abril y Junio de 2010, en 13 días de mediciones.

La selección final de ubicaciones fue de 38 puntos para el análisis del canal de propagación y 36 para la evaluación de la calidad de TDT (algunos de ellos coincidentes), situados a una distancia de entre 2,4 y 13,5 km del parque eólico aproximadamente (ver Figura 3.5 y Figura 3.6). La ubicación exacta de estas localizaciones se encuentra en el Anexo III.

Para la evaluación empírica del canal de propagación, en la mayoría de las localizaciones se realizaron medidas en diferentes días, con objetivo de recoger diferentes estados de funcionamiento del parque eólico, dando lugar a un total de 636 ficheros de medida válidos. Para la configuración del equipo indicada en la Tabla 3.3, una medida de 10 s de duración ocupa en memoria aproximadamente 500 MBytes, lo que da idea del gran volumen de datos que genera la campaña de medidas. Cabe recordar que de cada medida se puede obtener el nivel relativo de la señal dispersada por varios aerogeneradores, de manera que el número de datos útiles para el análisis posterior pasa a ser de más de 1000 muestras.

En el caso de las medidas de calidad de TDT, teniendo en cuenta la metodología de medida aplicada en la zona de *backscattering*, se analizaron 158 casos diferentes, junto con 18 casos correspondientes a la zona de *forward scattering* y 8 correspondientes a la zona de *forward-backward scattering*. Ha de tenerse en cuenta que junto con las medidas de los umbrales de funcionamiento de DVB-T también se capturan trazas del espectro para poder relacionar en el análisis posterior los umbrales obtenidos con las características del canal de propagación correspondiente.

Cada captura del espectro frecuencial lleva asociada una serie de datos que permiten el posterior análisis de las mismas, tal y como se recoge en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4. Datos asociados a cada captura del espectro frecuencial en la campaña de medidas**

Tipo	Parámetro
<b>Descripción general</b>	Nombre fichero medida XXX-YY
	Identificación del grupo al que pertenece
	Fecha y hora de la captura
	Tipo de medida (normal o control)
	Observaciones y comentarios
<b>Datos de posicionamiento</b>	Coordenadas UTM
	Cota
	Distancia transmisor-receptor
	Ángulos de acimut y elevación transmisor-receptor
<b>Configuración del equipo de medida</b>	*Ver Tabla 3.3
<b>RF</b>	Potencia
<b>Datos adicionales</b>	Nombre fotos y/o vídeos asociados
	Estadísticas de viento

## 2. PROCESADO Y CLASIFICACIÓN DE DATOS

---

Este apartado recoge el procesado y filtrado de los datos de la campaña de medidas descrita en el Apartado 1. El objetivo de esta fase es conseguir, a partir de las capturas obtenidas en la campaña de medidas, los datos necesarios para llevar a cabo el análisis del canal de propagación. Además, el filtrado y clasificación de los mismos permite disponer de una completa base de datos que facilite el estudio de los diferentes aspectos a considerar en la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores.

### 2.1 Procesado de datos

En el caso de la campaña llevada a cabo en 2009, los datos de partida son las trazas del espectro frecuencial capturadas en los puntos de medida, guardadas con extensión *.wfm* en un formato propietario del fabricante del equipo Adivic. El propio fabricante proporciona un software llamado *TCX-3000 Stream Data Extractor* que extrae los datos IQ en bruto en un archivo de extensión *.raw*. Estos datos están ordenados I-Q-I-Q con un formato de enteros de 16 bits con notación *Little-endian*. Además se genera un archivo de extensión *.inf* en el que se almacena la información principal de la captura: frecuencia central, ancho de banda de la señal y tasa de muestreo I/Q. Por su parte, el equipo Anritsu MS2690A proporciona directamente los datos IQ en formato *float* (4 bytes) con extensión *.dgz* y un archivo en formato XML con información adicional sobre la captura.

Los archivos con datos IQ se procesan con el software Digital Broadcast Analyzer (DBA) [86]-[87], utilizando para su configuración la información incluida en los archivos *.inf* o *.xml* (frecuencia de muestreo) y parámetros de configuración de la señal DVB-T indicados en la Tabla 2.2. Esta herramienta, desarrollada dentro del grupo TSR de la UPV/EHU, permite obtener respuestas frecuenciales de canal, respuestas impulsionales de canal, constelación IQ, y los principales parámetros de calidad de la señal DVB-T.

En el caso en estudio, DBA se utiliza para estimar y almacenar las respuestas frecuenciales de canal. Como se ha comentado anteriormente, éstas se obtienen cada cuatro símbolos DVB-T consecutivos para el modelado de las señales dispersadas, de manera que incluyen los valores de amplitud y fase de todas las portadoras piloto, y cada símbolo para el análisis de la variabilidad temporal [72],[73]. Estas respuestas frecuenciales se guardan en formato binario con el objetivo de optimizar el espacio de almacenaje necesario.

El posterior procesado de las respuestas frecuenciales estimadas se realiza mediante el software *Eolo*, desarrollado en Matlab por el propio grupo de investigación [91]. Este software, desarrollado específicamente para el procesado de la campaña de medidas, proporciona una serie de archivos de resultados que constituyen la base del análisis posterior. Una descripción más detallada del diseño y funcionamiento de este software se presenta en el Subsección 2.1.1.

La Figura 3.12 muestra de forma esquemática el procesado de los datos, diferenciando los archivos de datos de entrada e intermedios, los datos insertados manualmente en la configuración de los programas de procesado y los archivos finales de resultados. Los dos primeros bloques corresponden a las medidas realizadas utilizando el equipo de Advic TCX 3000. En el caso de las medidas realizadas con el equipo Anritsu MS2690A se obtienen los datos IQ directamente con extensión *.dgz* y la información adicional en formato XML, tal y como se ha comentado.

### **2.1.1 Diseño de software específico de procesado *Eolo***

El objetivo del software de procesado específico *Eolo* es obtener las señales dispersadas por los aerogeneradores a partir de las componentes retardadas de la respuesta impulsional del canal.

Para ello, toma como entrada dos tipos de archivos de datos, tal y como se aprecia en la Figura 3.12: las respuestas frecuenciales en formato binario estimadas por el DBA, y un archivo Excel con extensión *.xls* con la información relativa a los nombres y las coordenadas (UTM referenciadas a European Datum 79) correspondientes a los aerogeneradores, los transmisores que difunden servicios de TDT en las cercanías del parque eólico, y las localizaciones en las que se han llevado a cabo las medidas a lo largo de toda la campaña.

El procesado de las respuestas frecuenciales estimadas por el DBA hasta la obtención de los archivos de resultados deseados se lleva a cabo en una serie de pasos que se describen brevemente a continuación:

#### **Eventanado de las respuestas frecuenciales**

---

A las respuestas frecuenciales de entrada se les aplica una ventana Hamming para evitar, al aplicar la IFFT, efectos de ensanchado que puedan enmascarar las diferentes contribuciones de las que se compone la respuesta impulsional del canal.

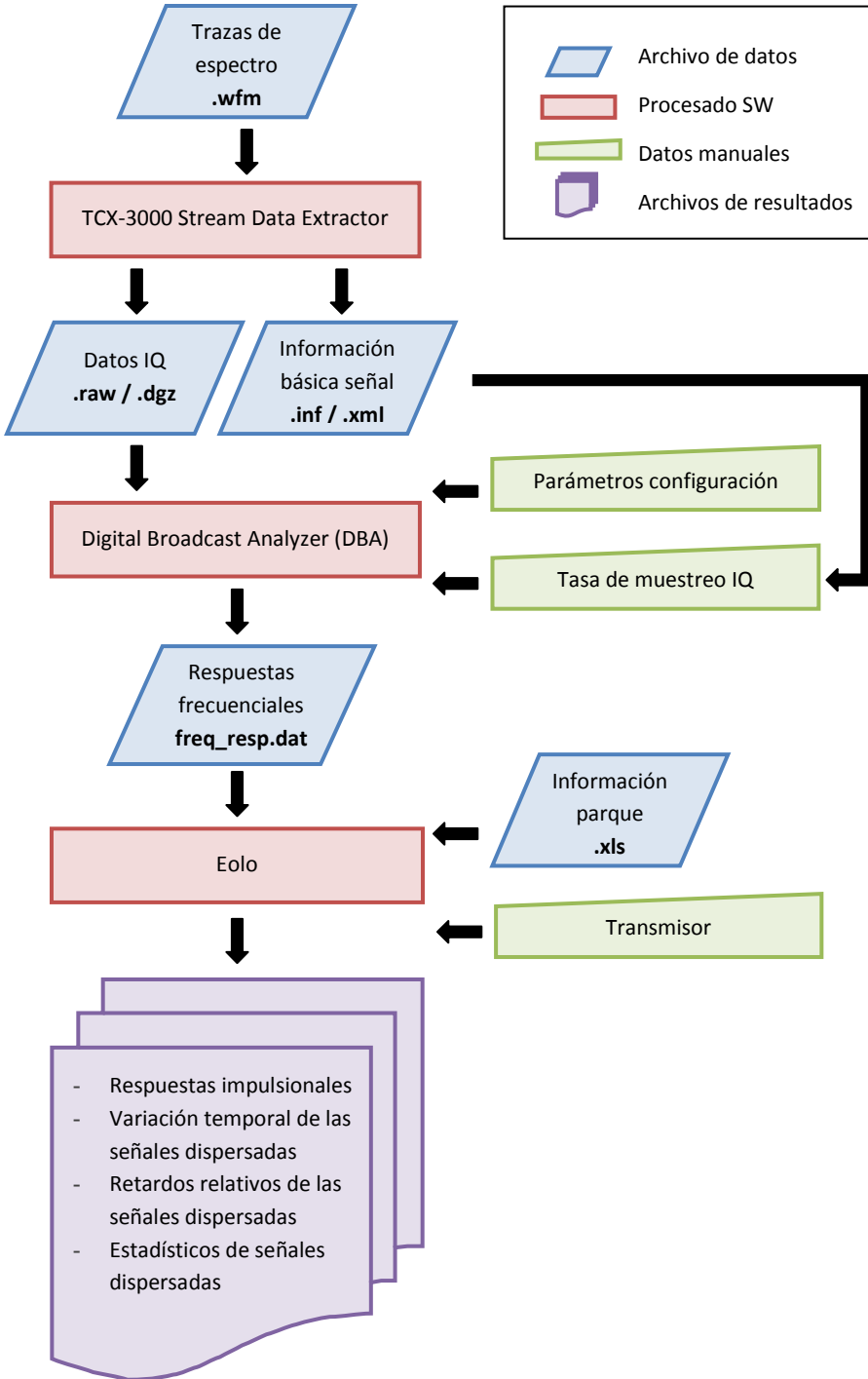


Figura 3.12. Esquema general del procesado de datos



### **Obtención de las respuestas impulsionales de canal**

---

Tras el inventariado, a las respuestas frecuenciales se les aplica una IFFT para obtener las respuestas impulsionales del canal, que se normalizan a su valor máximo en módulo (correspondiente a la contribución del trayecto directo entre transmisor y receptor), tomándose este punto como referencia temporal para el cálculo de los retardos de las componentes debidas a la dispersión de señal sobre los aerogeneradores.

### **Cálculo de los retardos teóricos de las señales dispersadas**

---

Los retardos teóricos de las señales dispersadas tanto por los aerogeneradores como por otras torres de telecomunicación cercanas a los transmisores de TDT se calculan a partir de las coordenadas del transmisor correspondiente a la señal procesada, de los aerogeneradores y torres de comunicación y de la localización de medida. El dato del transmisor al que corresponde la medida analizada se introduce manualmente en la fase inicial del software. En cuanto a la localización del punto de medida, tal y como se comenta en la Sección 1.8 - Metodología de medida, las capturas de trazas del espectro se almacenan con una nomenclatura que incluye la identificación de la ubicación en la que se midieron. Esta nomenclatura se mantiene en los archivos de datos intermedios del procesado. De esta manera, a partir del nombre del archivo de respuestas frecuenciales a analizar, se detecta la ubicación adecuada y se calculan los retardos de las señales correspondientes a los aerogeneradores del parque por simple triangulación.

### **Pre-procesado de las respuestas impulsionales para la detección de máximos**

---

Sobre las cincuenta primeras respuestas impulsionales se aplica una lógica de decisión alrededor de los puntos correspondientes a los retardos teóricos para detectar los máximos de las componentes retardadas. Al terminar el proceso de detección de máximos, el software proporciona avisos sobre los aerogeneradores de los que no se han detectado máximos correspondientes a señales dispersadas, y sobre los máximos en los que existe ambigüedad a la hora de identificar al aerogenerador que corresponden (debido a que los retardos teóricos calculados son muy próximos entre sí).

### **Obtención de la evolución temporal de las señales dispersadas por cada uno de los aerogeneradores y cálculo de datos estadísticos**

---

Una vez detectadas las posiciones de los máximos correspondientes a las señales dispersadas, se obtiene la evolución temporal de cada una de estas señales a lo largo de la duración de la captura, seleccionando el valor correspondiente en las sucesivas respuestas impulsionales. En el caso de las respuestas impulsionales calculadas cada cuatro símbolos, se obtiene la variación temporal de cada señal dispersada en módulo, y se calculan y almacenan los valores estadísticos que la caracterizan (valor medio, mediano, percentiles 10 y 90, desviación estándar). Para la caracterización del espectro Doppler correspondiente a esta variación se utilizan las respuestas impulsionales obtenidas cada símbolo en formato complejo para su procesamiento posterior, tal y como se describe en el Capítulo 7.

## **2.2 Filtrado y clasificación de datos**

Existen diferentes niveles de filtrado de los datos, antes de obtener las señales dispersadas por los aerogeneradores.

### **Errores en la captura de señal**

---

Al procesar las señales capturadas con el software DBA, algunas capturas presentan errores de sincronismo que impiden obtener los parámetros de la señal DVB-T necesarios para el análisis posterior, por lo que han de descartarse para el estudio.

### **Condiciones aplicables a los puntos de recepción**

---

Ha de existir visión directa con el transmisor y con prácticamente toda la estructura del aerogenerador correspondiente desde el punto de medida para evitar efectos de difracción en el terreno que puedan resultar influyentes [92]. Esta condición se comprueba en la planificación. Sin embargo, dado que las localizaciones donde se realizan las capturas en ocasiones difieren ligeramente de los puntos planificados, es necesario volver a realizar la comprobación para las ubicaciones definitivas.

### Condiciones aplicables a las señales recibidas de cada aerogenerador

Para evitar efectos acumulativos de las señales dispersadas por un aerogenerador sobre los siguientes, sólo se van a analizar los aerogeneradores más próximos a los transmisores: aerogeneradores del 30 al 26 de Oiz I.

Es necesario que la señal dispersada por un aerogenerador se distinga en forma de máximo en la respuesta impulsional, y que la asociación de esa señal con una turbina determinada sea inequívoca. Para ello es necesario comprobar que el retardo en el que se presenta la señal en medidas realizadas en días distintos en una misma localización sea igual.

De esta manera, cada captura de señal queda registrada en una base de datos con una serie de campos que permiten una clasificación sencilla de las mismas para el análisis posterior. A los datos indicados en la Tabla 3.4 y que caracterizan la captura de espectro, se añaden los campos necesarios para el análisis, tal y como queda recogido en la Tabla 3.5:

**Tabla 3.5. Datos adicionales asociados a cada captura del espectro frecuencial tras el procesado**

Tipo		Parámetro
Aerogeneradores a analizar(1)		Identificadores de los aerogeneradores cuya señal dispersada puede utilizarse en el análisis
Datos de cada aerogenerador indicado en (1)	Datos de posicionamiento	Distancia transmisor-aerogenerador
		Distancia aerogenerador-receptor
		Ángulo de acimut transmisor-aero-receptor
		Ángulo de elevación aero-receptor
	Funcionamiento	Rotación de las palas, palas quietas, control <i>pitch</i> , control <i>yaw</i>
	Datos estadísticos de la variación temporal de la señal dispersada	Valor medio, mediano, desviación estándar, percentiles 10 y 90



*The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point. Frequently the messages have meaning.*

*- Claude Shannon*

---

## **CAPÍTULO 4: INFLUENCIA SOBRE DVB-T**

---

El presente capítulo incluye la evaluación empírica de la degradación de la calidad de recepción del servicio DVB-T en presencia de un parque eólico. Esta degradación se expresa en términos de umbral de portadora a ruido ( $C/N$ ) para una recepción casi libre de errores (QEF). Este incremento en los umbrales con respecto a los propuestos en el estándar ha de relacionarse con las características del canal de propagación correspondiente. Para ello, primero se realiza un análisis empírico de las características del canal de propagación en las diferentes zonas de influencia. Posteriormente, se lleva a cabo una búsqueda bibliográfica sobre métodos para parametrizar las características del canal de propagación, para finalmente realizar una propuesta propia de parámetros utilizados para caracterizar el canal. Por último, se realiza el análisis de los umbrales del sistema para recepción QEF en las diferentes zonas de influencia.



## 1. EVALUACIÓN EMPÍRICA DE LA CALIDAD DE RECEPCIÓN DE DVB-T

---

Tal y como se ha comentado anteriormente, la figura de mérito más importante para cualquier sistema de transmisión digital es la relación del Bit Error Rate (BER) en función de la relación portadora-ruido (C/N) [81]. En concreto, con objeto de comparar diferentes situaciones, se calcula el umbral para el cual se obtiene una recepción Quasi Error Free (QEF). Esta condición, en el caso de DVB-T, corresponde a un BER después del decodificador de Viterbi igual a  $2 \cdot 10^{-4}$  [72],[73],[81].

Este umbral de C/N para recepción QEF se mide disminuyendo la relación C/N de la señal recibida hasta obtener un BER después de Viterbi de  $2 \cdot 10^{-4}$ . Los resultados presentados a continuación son los umbrales de C/N obtenidos por medio del generador de ruido interno del receptor profesional de DVB-T [88].

Como referencia, ha de considerarse que, para la configuración de DVB-T usada en España (ver Tabla 2.2), el sistema tiene un umbral teórico de la figura de portadora a ruido de 16,7 dB para un canal Gaussiano, 17,3 dB para un canal Rice y 20,3 dB para un canal Rayleigh [72],[94]. Estos umbrales teóricos se basan en una estimación de canal perfecta (sin considerar el ruido de fase) y una implementación ideal del receptor. Por tanto, en situaciones reales los requisitos de C/N para una correcta demodulación han de ser incrementados varios dB [95]. Para el receptor profesional de DVB-T utilizado, se aplica un margen de 2 dB correspondiente a pérdidas de implementación en el receptor y al uso de un sistema de transmisión RF práctico.

Los posibles incrementos obtenidos en los umbrales de recepción con respecto a los propuestos en el estándar han de relacionarse con las características del canal de propagación correspondiente. Para ello, primero se realiza un análisis empírico de las características del canal de propagación en presencia de un parque eólico, considerando las diferentes zonas de influencia (*backscattering*, *forward scattering* y *forward-backward scattering*); y posteriormente se realiza una búsqueda bibliográfica sobre métodos que se puedan aplicar para parametrizar las características del canal de propagación.

## 2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE PROPAGACIÓN EN LAS DIFERENTES ZONAS DE INFLUENCIA

---

### 2.1 Caracterización empírica del canal de propagación

#### 2.1.1 Región de *backscattering*

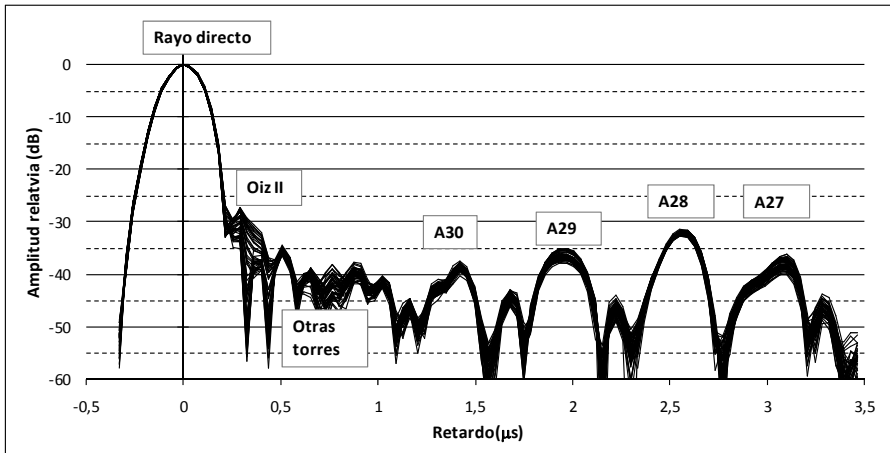
La Figura 4.1 muestra 50 respuestas impulsionales superpuestas, obtenidas a partir de 200 símbolos consecutivos, para un punto de recepción en la región de *backscattering*, en una situación en la que las aspas de los aerogeneradores más próximos al transmisor están paradas. Cada una de las curvas corresponde a una respuesta impulsional del canal estimada a partir de un grupo de 4 símbolos DVB-T consecutivos, es decir, la figura muestra la evolución de la respuesta del canal en aproximadamente 200 ms. Se indica la posición del rayo directo (procedente del transmisor), la zona en la que se reciben las señales procedentes del parque Oiz II y las otras torres de telecomunicaciones existentes en la cima, y las contribuciones debidas a los aerogeneradores más próximos de Oiz I (A30 a A27).

En la figura se puede observar que existen pequeñas variaciones en las señales procedentes de los aerogeneradores (aproximadamente de 1-2 dB), probablemente debidas a que se producen ligeras oscilaciones o vibraciones en la estructura del aerogenerador, aunque sus aspas no estén rotando.

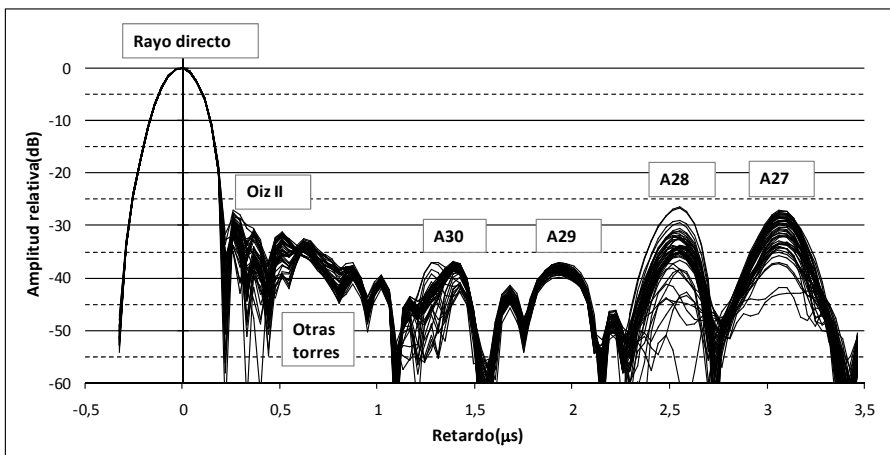
La Figura 4.2 muestra, para el mismo punto de recepción, 50 respuestas impulsionales consecutivas superpuestas cuando los aerogeneradores A30, A28 y A27 comienzan a rotar sus aspas, pero no así el aerogenerador A29. Como cabe esperar, el retardo de las diferentes componentes multitrayecto se mantiene. Por otra parte, se puede observar en la figura que el nivel de señal del aerogenerador A29 se mantiene estable a un nivel 40 dB por debajo del rayo directo, mientras que los aerogeneradores cuyas aspas han comenzado a rotar (A30, A28 y A27) presentan grandes variaciones en el nivel de señal dispersada.

Se comprueba, de esta manera, que para el caso de la región de *backscattering* es necesario buscar parámetros que caractericen un canal multitrayecto en el cual los retardos se mantienen constantes, y las diferentes componentes sufren variaciones temporales en amplitud debidas a la rotación de las aspas.





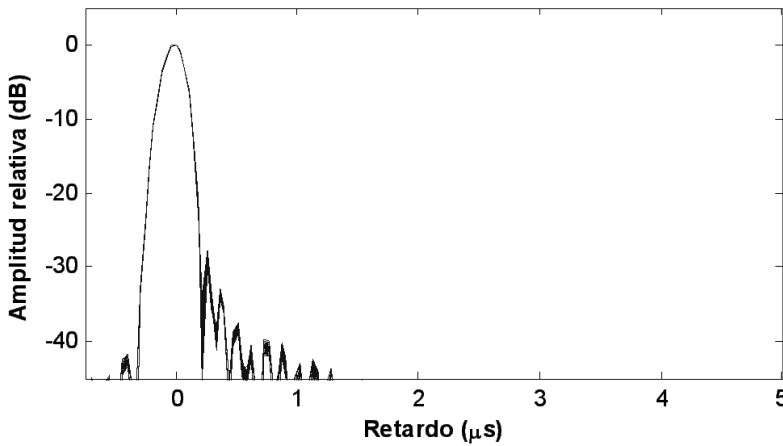
**Figura 4.1.** Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de *backscattering*: aerogeneradores estáticos



**Figura 4.2.** Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de *backscattering*: aerogeneradores con aspas en movimiento

### 2.1.2 Región de *forward scattering*

La Figura 4.3 muestra 200 respuestas impulsionales consecutivas correspondientes a un punto de recepción en la zona de retro dispersión del parque eólico situada al oeste de los transmisores (ver Figura 3.6). Como se ha comentado anteriormente, esta zona se caracteriza por que el transmisor, los aerogeneradores y el receptor se encuentran alineados, de manera que las señales dispersadas llegan sin retardo al receptor. Por ello, su efecto no se puede observar en la respuesta impulsional de canal.



**Figura 4.3.** Ejemplo de respuestas impulsionales del canal en la región de *forward scattering*

Se demuestra por lo tanto que la caracterización del canal en la zona de *forward scattering* se puede realizar exclusivamente en función de la potencia recibida, que se podrá ver reducida debido a la cancelación parcial entre la señal procedente del transmisor y las señales dispersadas por los aerogeneradores.

### 2.1.3 Región de *forward-backward scattering*

Por último, y dada la disposición relativa de los transmisores y el parque eólico, existe también una zona de *forward-backward scattering* en la cual el receptor se encuentra en la zona de retrodispersión de las turbinas de Oiz-I y en la zona de dispersión hacia delante de las turbinas de Oiz-II. Por lo tanto, el canal de propagación en este caso es una combinación de la situación mostrada en la Figura 4.1 o en la Figura 4.2 y la situación representada en la Figura 4.3.

## 2.2 Parametrización de las características del canal de propagación

A continuación se presentan diversos métodos que podrían utilizarse para parametrizar las características del canal de propagación en presencia de un parque eólico. Los dos primeros se basan en combinaciones de las señales dispersadas por cada uno de los aerogeneradores, mientras que el último se basa en la caracterización de un canal multirayecto mediante parámetros estadísticos.

### 2.2.1 Informe UIT-R BS.945-2

A pesar de que este informe pertenece al grupo de la UIT relativo a la radiodifusión sonora (BS) [96], presenta modelos matemáticos utilizables así mismo para el caso de múltiples interferencias en la radiodifusión de televisión. Estos modelos proporcionan la intensidad de campo utilizable ( $E_u$ )<sup>1</sup> en el caso de tener múltiples transmisores interferentes. La intensidad de campo utilizable tiene en cuenta el ruido natural y el ruido artificial, así como el efecto combinado de la totalidad de los transmisores interferentes. Para el caso concreto de la presencia de un parque eólico, se podría considerar cada turbina como un transmisor interferente debido a la señal que dispersan.

Para el cálculo de la combinación de las señales interferentes individuales se utilizan dos categorías de métodos: métodos no estadísticos (suma de potencias) y métodos estadísticos (multiplicación simplificada, log-normal).

#### Método de la suma de potencias (o método de la suma cuadrática)

El método de la suma de potencias realiza una combinación no estadística de las potencias de señal individuales, bajo la suposición de que no existe correlación entre las amplitudes de las señales interferentes y la señal deseada en el punto de recepción, y la relación de fase entre ellas es aleatoria.

El método de suma de potencias es bastante sencillo de utilizar, pero su uso lleva a resultados que tienden a ser más optimistas que los obtenidos mediante los métodos estadísticos.

#### Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos usan la naturaleza estadística de la distribución espacial del campo eléctrico de la señal.

La intensidad de campo utilizable  $E_u$  se determina para una probabilidad de cobertura específica (con respecto al tiempo y a la localización) y depende de los valores de las intensidades de campo interferentes.

---

<sup>1</sup>Eu: Valor mínimo de la intensidad de campo, que permite obtener una calidad de recepción deseada, en condiciones de recepción especificadas, en presencia de ruidos naturales y artificiales y en presencia de interferencias, ya sean existentes, en un caso real, ya se hayan determinado mediante acuerdos o por planes de frecuencias [97]

Cabe destacar que aunque puede que exista correlación entre las señales individuales, tanto las deseadas como las no deseadas, ninguno de los métodos descritos en el informe incluye el tratamiento de la correlación entre señales. Sin embargo, algunos podrían ampliarse para incluir esta condición. El efecto de la correlación varía en función de las condiciones de recepción, y puede provocar o un aumento o una disminución de la cobertura dependiendo de las condiciones particulares de las señales recibidas [98].

#### *El método de multiplicación simplificada*

El método de multiplicación simplificada es un método de cálculo estadístico inicialmente desarrollado para calcular la probabilidad de cobertura de los servicios analógicos en presencia de elementos interferentes.

Se basa en las siguientes suposiciones:

- No existe correlación entre las intensidades de campo de las diferentes señales.
- La dispersión temporal del campo eléctrico de la señal deseada se puede despreciar en comparación con la dispersión de la señal no deseada.
- Un campo interferente es predominante en el punto de recepción.
- La influencia del ruido (representada por el mínimo campo mediano de la señal deseada) se puede despreciar para compensar los errores introducidos por otras aproximaciones.

Suponiendo una distribución log normal de campo (expresada en  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ), de media y desviación estándar conocidas, se puede calcular de manera iterativa la intensidad de campo utilizable.

El método de multiplicación simplificada no sería aplicable al caso de las interferencias múltiples debidas a la presencia de un parque eólico, ya que normalmente no se va a dar la condición de que uno de los campos interferentes sea dominante en el punto de recepción.

#### *El método log normal*

El método log normal se basa en las siguientes suposiciones:

- No existe correlación entre las intensidades de campo de las diferentes señales.

- La variabilidad espacial del campo eléctrico de la señal deseada y todas las señales interferentes es idéntica.

El efecto de un cierto número de señales interferentes, cada una de las cuales sigue una distribución log normal, se sustituye en el punto de recepción por el efecto de un único campo interferente que sigue una distribución log normal.

Posteriormente, el campo eléctrico utilizable se define para el L% de las ubicaciones, aplicando unas condiciones específicas de nivel de señal a ruido y el factor de protección necesario.

La principal limitación de los métodos incluidos en el informe para su aplicación a nuestro caso de estudio es que están orientados a servicios analógicos, proporcionando métodos de cálculo de umbrales de intensidad o probabilidades de cobertura. Además no contemplan la posible variabilidad de las señales interferentes.

### 2.2.2 Modelo de Sengupta

Sengupta propone una manera de evaluar la influencia conjunta de un parque eólico formado por múltiples turbinas [99]. Según el autor, medidas en las cercanías de una instalación eólica formada por tres aerogeneradores indican que varias turbinas funcionando en sincronismo (es decir, con las aspas rotando en paralelo) provocan una mayor interferencia en la señal de televisión. En concreto, la amplitud de los pulsos interferentes producidos por dos turbinas sincronizadas es aproximadamente el doble que la causada por una única turbina. Sin embargo, aunque no ha sido verificado, cabe suponer que para un número mayor de aerogeneradores las interferencias podrían sumarse de manera aleatoria, y en ese caso, la combinación dejaría de ser lineal.

Como forma práctica de analizar la dispersión de la señal procedente del transmisor por el conjunto del parque eólico, se agrupan los aerogeneradores teniendo en cuenta las siguientes suposiciones sobre los efectos acumulativos:

- Las turbinas dentro de una determinada agrupación (*cluster*) trabajan en sincronismo, de manera que el factor de dispersión de una agrupación de turbinas es la suma de los factores de dispersión individuales de los aerogeneradores pertenecientes al mismo.
- Las diferentes agrupaciones que forman el parque eólico no están en sincronismo, de manera que el factor de dispersión de parque completo es la

raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los factores de dispersión de cada agrupación o *cluster*.

Sin embargo, el modelo no especifica cómo determinar qué turbinas pertenecerían a una misma agrupación (si sería en función del número de turbinas por agrupación o la separación entre ellas). Como en el caso anterior, tampoco se contempla cómo caracterizar la variabilidad de las señales dispersadas.

### 2.2.3 Recomendación UIT-R P.1407-4

La Recomendación UIT-R P.1407-4 “Propagación por trayectos múltiples y parametrización de sus características” [100], ante la necesidad de estimar el efecto de la propagación por trayectos múltiples en los servicios que utilizan sistemas digitales, propone normalizar la terminología y las expresiones utilizadas para caracterizar este tipo de canales de propagación.

Tal y como se ha comentado previamente, el canal móvil con propagación por trayectos múltiples puede caracterizarse por su respuesta impulsional, que varía a un ritmo que depende de la velocidad del terminal móvil o, como en el caso de un parque eólico, de los objetos dispersantes. Físicamente, las características de propagación por trayectos múltiples incluyen el número de trayectos, las amplitudes, la diferencia de longitudes de trayecto (retardo), y el ángulo de incidencia. Esto puede caracterizarse a partir del perfil de retardo-potencia. De otro modo, la transformación de Fourier de la respuesta de impulso complejo da lugar a la función de transferencia compleja cuya amplitud, frente a las características de propagación, proporciona la selectividad de frecuencia del trayecto múltiple (espectros Doppler).

La recomendación clasifica los parámetros en dos: parámetros de los perfiles del retardo y parámetros de la dirección de incidencia. Para nuestro caso de estudio, nos centraremos en los primeros, ya que al tratarse de recepción fija en la que los elementos dispersantes no varían su posición dentro del trayecto, las direcciones de incidencia son constantes.

#### Definición de los parámetros estadísticos

El *retardo medio* es la media de los retardos en exceso ponderados por su potencia y viene dado por el primer momento del perfil del retardo de potencia (raíz cuadrada de la amplitud de la respuesta al impulso).

La *dispersión (valor eficaz) del retardo* es la desviación típica de los retardos en exceso ponderada por su potencia y viene dada por el segundo momento del perfil

del retardo de potencia. Proporciona una medida de la variabilidad del retardo medio. Tal y como se ha comentado, en nuestro caso las componentes multitrayecto son fijas en cuanto a retardo, por lo que este parámetro no es de aplicación.

La *ventana del retardo* es el intervalo de la porción intermedia del perfil del retardo de potencia que contiene un cierto porcentaje (normalmente el 90%) de la energía total de esa respuesta al impulso. En nuestro caso, al trabajar en ubicaciones con visión directa al transmisor, la ventana de retardo se corresponderá prácticamente con el rayo directo, por lo que no parece que pueda resultar un parámetro significativo.

El *intervalo de retardo* se define como el intervalo de la respuesta al impulso entre dos valores del retardo en exceso que señalan el primer instante en que la amplitud de la respuesta al impulso rebasa un umbral determinado y el último instante en que es menor que dicho umbral.

El *número de componentes de señal o trayecto múltiple* es el número de crestas en un perfil de retardo de potencia cuya amplitud se encuentra dentro de A dB de la cresta más alta y por encima del umbral mínimo de ruido.

Dadas las características del canal de propagación multitrayecto en presencia de aerogeneradores, la definición de este tipo de parámetros, obtenidos a partir de la respuesta impulsional de canal, resultan mucho más adecuados a nuestro caso de estudio.

#### **2.2.4 Propuesta de parámetros para la caracterización conjunta de las señales dispersadas por un parque eólico**

Además de los parámetros propuestos en la Rec. UIT-R P.1407-4 [100], se ve la necesidad de definir un parámetro que, tal y como se propone en la Cuestión UIT-R 69-1/6 [47], dé una idea de las relaciones “señal directa/señal reflejada retardada” y otro parámetro que recoja la variabilidad temporal del canal multitrayecto propia de la rotación de los aerogeneradores.

El primer parámetro a considerar tiene en cuenta el nivel de multitrayecto mediano debido a la señal dispersada en los aerogeneradores. Por lo tanto, considera tanto el número de componentes multitrayecto como la amplitud mediana de estos trayectos. El valor mediano de cada trayecto se calcula como un valor central representativo de cada trayecto ya que las señales dispersadas varían con la rotación de las aspas. Por lo tanto, el valor de *potencia multitrayecto* del

canal,  $P_{mult}$ , se calcula como la suma del valor de potencia mediano recibido de cada turbina, y viene dado por la siguiente ecuación:

$$P_{mult} = \sum_{i=1}^N \text{mediano}(P(\tau_i, t)) \quad (4.1)$$

Donde  $i=1$  e  $i=N$  son los índices del primer y último trayecto cuya potencia está por encima de un nivel umbral de -45 dB con respecto al rayo directo, y  $P(\tau_i, t)$  es la potencia variante con el tiempo (normalizada con respecto al rayo directo) del  $i$ -ésimo trayecto.

Por otra parte, se propone el uso de la *desviación estándar media*,  $\sigma_{mean}$ , calculada como la media de las desviaciones estándar de las señales dispersadas por cada turbina en una cierta medida, para caracterizar la variabilidad temporal del canal. Es decir, este parámetro proporciona una medida de la variabilidad de la respuesta impulsional del canal durante el tiempo de captura, y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad (4.2)$$

Donde  $i=1$  e  $i=N$  son los índices del primer y último trayecto cuya potencia está por encima de un nivel umbral de -45 dB con respecto al rayo directo, y  $\sigma_i$  es la desviación estándar de la potencia (normalizada con respecto al rayo directo) del  $i$ -ésimo trayecto.

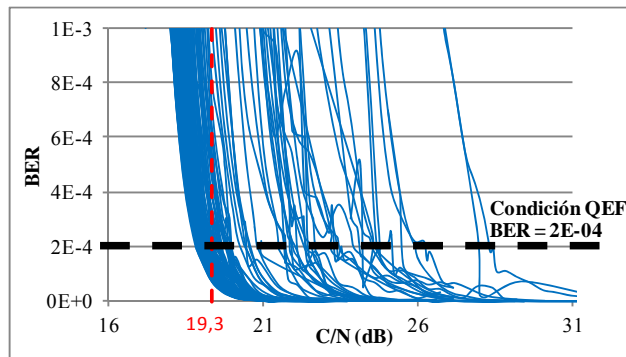


### 3. ANÁLISIS DE LOS UMBRALES DE C/N NECESARIOS PARA RECEPCIÓN QEF

Los resultados obtenidos se dividen en función de los diferentes escenarios de propagación (*backscattering*, *forward scattering* y *backward-forward scattering*) y se analizan separadamente. De esta manera, se toma como valor de referencia un umbral de 18,7 dB para la región de *forward scattering* (canal Gaussiano), y un umbral de 19,3 dB para las regiones de *backscattering* y *forward-backward scattering* (canal Rice).

#### 3.1 Región de *backscattering*

La Figura 4.4 muestra los valores de BER después de Viterbi en función de las relaciones portadora a ruido C/N para distintas situaciones medidas en la región de *backscattering* del parque eólico.

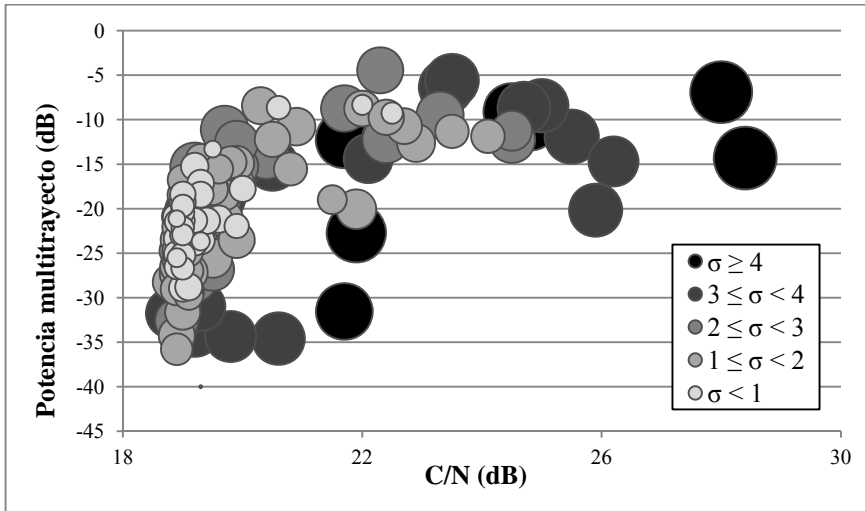


**Figura 4.4.** Región de *backscattering*. BER después de Viterbi en función de la relación portadora a ruido (C/N)

Se puede observar que la mayoría de las medidas presentan valores de C/N umbral próximos a 19,3 dB (valor correspondiente a un canal Rice teórico). Sin embargo, hay algunas medidas con umbrales por encima de este valor de referencia, alcanzando valores hasta de 28 dB.

De cara a relacionar estos incrementos en los valores de C/N umbral con las características del canal de propagación, en la Figura 4.5 se muestran los valores umbrales de C/N medidos en la región de *backscattering* en función de los valores de *potencia multirayecto* correspondientes (expresado en dB). El tamaño de las

burbujas queda determinado por los valores de *desviación estándar media* de cada medida. Además, el color de las burbujas varía en una escala de grises en función del valor de *desviación estándar media*, para proporcionar una representación más clara.



**Figura 4.5. Región de *backscattering*. Valores de C/N umbral en función de las características del canal multitrayecto**

Tal y como se puede observar en la figura, hay una clara tendencia entre los valores crecientes de umbrales de C/N y el valor de *potencia multitrayecto*. Además, medidas con un nivel similar de *potencia multitrayecto* presentan un valor de C/N más alto cuando el valor de *desviación estándar media* es también mayor.

Como resultado significativo, cabe mencionar que todas las medidas con valores de *potencia multitrayecto* mayor que -15 dB presentan un valor igual o superior a 19,3 dB, independientemente de su valor de *desviación estándar media*. Esto contrasta con lo establecido en la Rec. BT.805 [44], según la cual los efectos de los aerogeneradores sobre la calidad de la señal se verían reducidos en los periodos en lo que sus rotores no están en funcionamiento.

Por otra parte, para medidas con valores de *potencia multitrayecto* más bajos que -15 dB, los incrementos más significativos sobre el umbral teórico de 19,3 dB se dan para los mayores valores de *desviación estándar media*. Por otra parte, todas las medidas con valores de *potencia multitrayecto* menores que -25 dB y *desviación estándar media* menor que 2 dB presentan valores umbrales cercanos a esos 19,3 dB.

La Tabla 4.1 resume los máximos incrementos en los umbrales de C/N con respecto al umbral típico de un canal de Rice en función de la *potencia multitrayecto*.

**Tabla 4.1. Incremento máximo de los umbrales de C/N sobre el umbral de C/N teórico de un canal Rice**

Potencia multitrayecto	Incremento máximo del umbral de C/N sobre el umbral C/N teórico de un canal Rice
$P_{mult} \geq -15$ dB	9,1 dB
$-15$ dB $> P_{mult} \geq -25$ dB	6,6 dB
$-25$ dB $> P_{mult} \geq -35$ dB	2,4 dB

El resto de los parámetros calculados, tales como el número de componentes multitrayecto, el intervalo de retardo, etc. han demostrado ser menos relevantes en los incrementos de los umbrales de C/N.

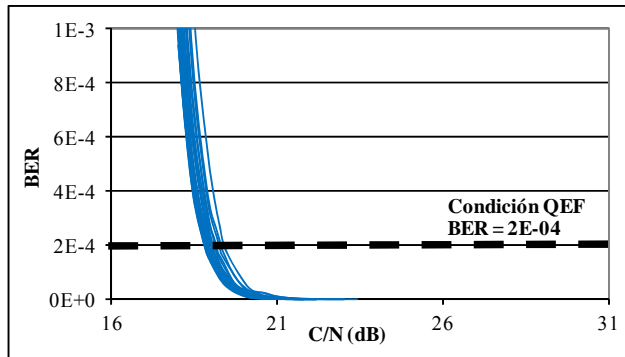
Cabe mencionar además que los niveles de potencia multitrayecto por encima de -15 dB no son habituales cuando la antena de recepción apunta hacia el transmisor. En general, el uso de una antena omnidireccional causará la detección de mayores niveles de *potencia multitrayecto* en el receptor.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se podrían producir problemas de recepción en zonas de sombra donde la línea de vista al transmisor está interceptada por la orografía, pero hay línea de vista con el parque eólico. También se podrían dar degradaciones de la calidad en los límites del área de cobertura. Por último, ha de tenerse en cuenta que si un re-transmisor o *gap-filler* se encuentra en una zona potencialmente afectada, se podría ver también degradada la calidad en su propia área de cobertura.

### 3.2 Región de *forward scattering*

La zona de *forward scattering* se caracteriza por la única presencia de la señal procedente del transmisor, que podría ver reducida su potencia por la presencia de los aerogeneradores [101].

La Figura 4.6 muestra los valores de BER en función de las relaciones de C/N para las diferentes situaciones medidas en la región de dispersión hacia delante del parque eólico. Se puede comprobar que todas las medidas presentan un umbral de C/N en un estrecho margen alrededor del umbral teórico de 18,7 dB que corresponde a un canal Gaussiano [72].



**Figura 4.6.** Región de *forward scattering*. BER después de Viterbi en función de la relación portadora a ruido (C/N)

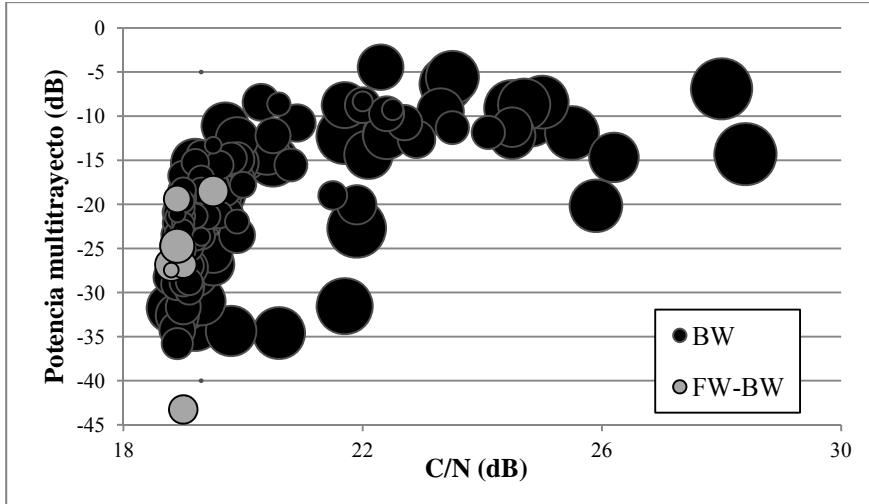
Tal y como se ha comentado anteriormente, las señales dispersadas en la región de *forward scattering* proyectan una zona de sombra de intensidad reducida, pero en la que los campos son raramente cero absoluto [101]. Además, a grandes distancias del obstáculo, la anchura angular de la zona de sombra se hace más estrecha [5]. Para todas las situaciones medidas, incluyendo diversas orientaciones del rotor de los aerogeneradores en función de la dirección del viento (y por lo tanto con respecto al trayecto transmisor-receptor), el efecto de los aerogeneradores en la zona de *forward scattering* parece ser despreciable.

### 3.3 Región de *forward-backward scattering*

Por último, se analizan los casos en los cuales hay una combinación de efectos de *forward* y *backward scattering* debido a la disposición de los aerogeneradores con respecto a los transmisores de TDT.

Para ello, se calculan para cada caso de medida los valores de *potencia multitrayecto* y *desviación estándar media*, y se relacionan con los umbrales de C/N obtenidos. La Figura 4.7 muestra los resultados obtenidos sobre aquéllos correspondientes a la zona de retrodispersión y recogidos en la Figura 4.5, con el objetivo de comparar las situaciones en las que exclusivamente hay *backscattering* con aquéllas en las que hay una combinación de *forward* y *backward scattering*.

Como se puede observar en la figura, la presencia de las señales dispersadas en la zona de dispersión hacia delante no parece provocar un aumento en los umbrales de C/N más allá de aquéllos esperados por el nivel de multitrayecto debido a las señales dispersadas en la zona de *backscattering*.



**Figura 4.7.** Región de *forward-backward scattering* frente a región de *backscattering*. Valores de C/N umbral en función de las características del canal multitrayecto

## 4. CONCLUSIONES

---

A partir de los resultados obtenidos en la campaña de medidas, se puede determinar que el canal multitrayecto dinámico observado en la zona de *backscattering* de los aerogeneradores puede ser más exigente en términos de umbral de C/N que un canal de Rice típico. El incremento en el umbral de C/N con respecto al teórico de Rice dependerá tanto del nivel de multitrayecto debido a la dispersión en las turbinas como de la variabilidad temporal de estas señales dispersadas debida a la rotación de las aspas.

Como resultado significativo, cabe destacar que todas las medidas con valores de *potencia multitrayecto* por encima de -15 dB tienen umbrales de C/N mayores que 19,3 dB (valor umbral teórico para un canal Rice, incluidas las pérdidas de implementación), incluso en situaciones en las que las aspas estaban estáticas y por tanto el valor de *desviación estándar media* era bajo. En términos generales, las medidas con valores de *potencia multitrayecto* por debajo de -15 dB presentan mayores valores de C/N umbral cuanto mayores son los valores de *desviación estándar media*.

Por otra parte, el efecto de las señales dispersadas en la región de *forward scattering* parece ser despreciable, al menos en las situaciones analizadas.

Así mismo, en las zonas de *forward-backward scattering*, el incremento en la relación C/N requerida corresponde con el umbral esperado en función de las características del multitrayecto debido a las señales retrodispersadas, sin un efecto adicional apreciable debido a la presencia de señales dispersadas en la región de *forward scattering*.

Estos resultados sirven, principalmente, para confirmar que la presencia de un parque eólico en las cercanías de un transmisor de TDT puede afectar a los valores umbrales de funcionamiento del sistema. Además, pueden utilizarse como directrices simples para estimar la posible degradación debida a un parque eólico en el servicio de DVB-T. El valor de C/N mínimo requerido en el receptor tiene una consecuencia directa en la potencia radiada efectiva (ERP) de un transmisor, que debería incrementarse para mantener el área de cobertura [74]. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que los resultados sólo serían aplicables al caso de la configuración de DVB-T utilizada en España (ver Tabla 2.2).

*Facts are the air of scientists. Without them you can never fly.*

*- Linus Pauling*

---

## **CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DISPERSADA POR LOS AEROGENERADORES**

---

En este capítulo se realiza una detallada caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores, como paso previo a buscar modelos que nos permitan determinar su amplitud media y su variabilidad temporal. Para ello, se realiza tanto un análisis de las señales dispersadas por los aerogeneradores de un parque eólico real, como una evaluación mediante simulaciones del diagrama de dispersión del aerogenerador para evaluar la importancia relativa de sus diferentes componentes en la señal dispersada total.





# 1. CARACTERIZACIÓN EMPÍRICA DE SEÑALES DISPERSADAS POR LOS AEROGENERADORES

---

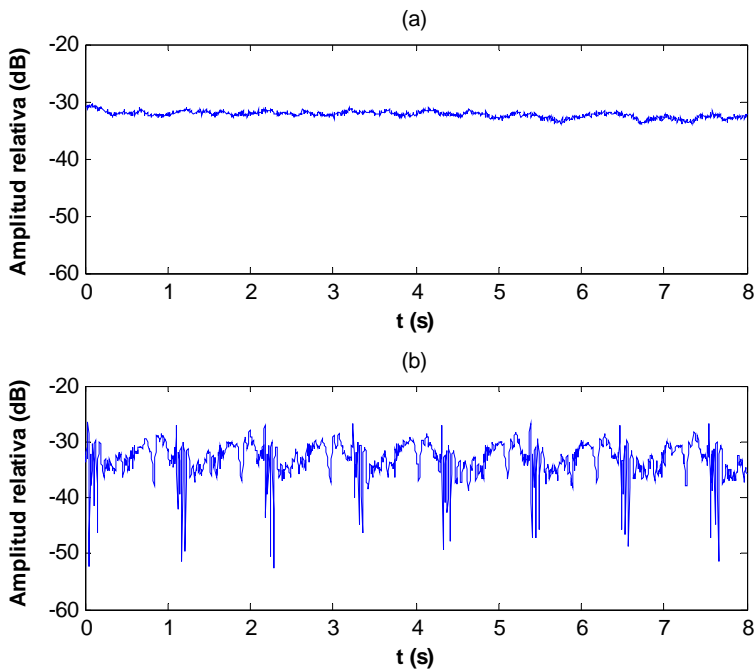
En este apartado se recoge una serie de ejemplos procedentes de la campaña de medidas descrita en el Capítulo 3. Las medidas seleccionadas sirven para ilustrar las variaciones de la señal dispersada por los aerogeneradores debidas a diversos factores, lo que permite determinar cuáles podrían ser más determinantes a la hora de obtener un modelo de dispersión.

## 1.1 Variabilidad de las señales dispersadas debida a la rotación de las palas del aerogenerador

En primer lugar se analiza el efecto de la rotación de las aspas en la variabilidad de la señal dispersada. Para ello, se comparan situaciones en las que los aerogeneradores tienen las palas paradas y situaciones en las que las aspas están en movimiento. El efecto de la rotación de las aspas se observa en la variación temporal de la señal dispersada por la turbina. Para visualizar esta variación temporal se representa, en función del tiempo de captura, la contribución correspondiente a la señal dispersada por el aerogenerador a lo largo de sucesivas respuestas impulsionales del canal.

Cabe mencionar que la amplitud relativa de la señal dispersada con respecto a la señal directa del transmisor no solo depende de las características de dispersión del aerogenerador sino que también depende de la distancia entre el transmisor y la turbina, la distancia entre el transmisor y el receptor, y la diferencia en la ganancia del diagrama de radiación del transmisor hacia la turbina y hacia el punto de recepción. Sin embargo, estos factores no afectan al comparar las variaciones debidas a los diferentes regímenes de funcionamiento de un mismo aerogenerador en un mismo punto de recepción, ya que se mantienen constantes.

La Figura 5.1 muestra la variación temporal de la señal dispersada por la turbina A28 durante 8 segundos de captura en dos situaciones diferentes. Ambos ejemplos corresponden al mismo punto de recepción, situado en la zona de *backscattering*. En el primero de ellos, las aspas del aerogenerador A28 están paradas, mientras que en el segundo se encuentran rotando. Se puede comprobar que la variación de la señal dispersada cuando las palas están quietas es mínima en comparación con la variación de la señal cuando las aspas están rotando.



**Figura 5.1. Variación temporal de la señal dispersada por la turbina A28  
(a) Palas estáticas (b) Palas en rotación**

Además se puede observar que la variación debida a la rotación de las aspas es claramente periódica, en este caso con un periodo de aproximadamente 1 s. La velocidad de giro de las aspas es variable y dependiente de la velocidad del viento. Para los modelos de aerogenerador analizados, esta velocidad de rotación varía entre 14,6 y 30,8 rpm [4]. Esto equivale a un periodo de entre 1,95 y 4,11 s por vuelta. Teniendo en cuenta que el rotor tiene tres palas, los patrones de dispersión debidos al movimiento de las mismas se repetirán tres veces por vuelta, es decir, con un periodo de entre 0,65 y 1,37 s.

La amplitud de las variaciones de la señal dispersada al rotar las aspas dependerá de múltiples factores como la geometría relativa del punto de recepción con respecto del transmisor y el aerogenerador, la orientación de la góndola, etc [93].

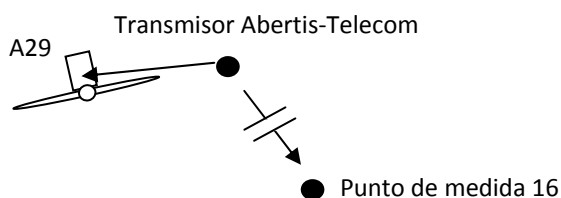
## 1.2 Variabilidad de las señales dispersadas debida al cambio de ángulo de ataque de las aspas

Tal y como se comenta en el Capítulo 3, Sección 1.4 - Definición de tipos de medidas, con ayuda del promotor del parque eólico se realizaron medidas controlando el mecanismo de cambio de ángulo de ataque de las aspas frente al viento o *pitch*. Esta variación en el ángulo de ataque supone que el área efectiva de la pala que se enfrenta a la señal incidente desde el transmisor aumenta o disminuye mientras las aspas están paradas.

Se realizaron medidas en diferentes puntos de recepción y con diferentes orientaciones del aerogenerador. A continuación se presentan dos casos para ilustrar este tipo de medida.

### Caso 1

La Figura 5.2 muestra la disposición relativa entre el transmisor de Abertis-Telecom, el aerogenerador A29 y el punto de recepción para el primer ejemplo de medida controlando el motor de ajuste del ángulo de ataque de las aspas.

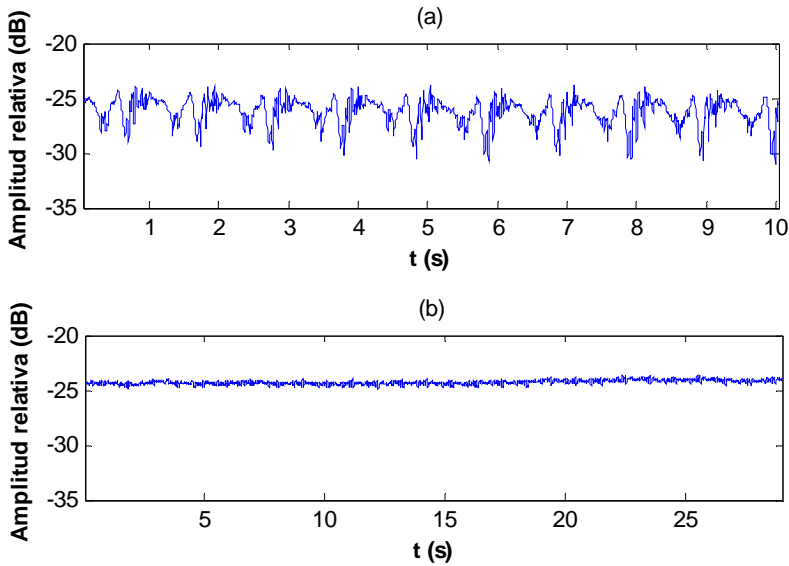


**Figura 5.2. Caso 1. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de *pitch***

En una primera medida, el parque eólico se encuentra en funcionamiento normal, con los aerogeneradores orientados aproximadamente hacia el punto de recepción. En la segunda medida, las aspas del aerogenerador A29 se detienen y se fuerza el cambio del ángulo de ataque de mínima a máxima resistencia al viento.

La Figura 5.3 representa la variación temporal de la señal dispersada en las dos medidas comentadas: aerogenerador A29 en régimen de funcionamiento normal con rotación de las aspas (gráfica superior), y aerogenerador A29 con aspas estáticas y variación gradual del ángulo de ataque (gráfica inferior). Nótese que se utiliza diferente escala de tiempos, debido a que la maniobra de cambio de

*pitch* dura alrededor de 25 s, mientras que las capturas de señal en modo de funcionamiento normal del parque son de 10 s.



**Figura 5.3. Caso 1. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas en rotación (b) Aspas con variación del ángulo de ataque**

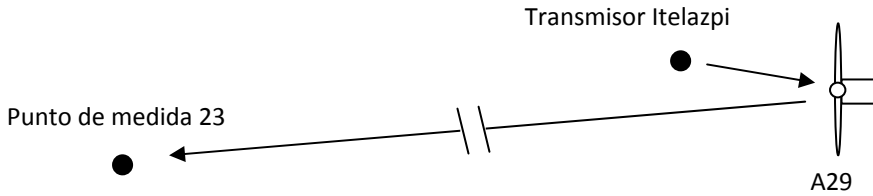
Tal y como se ha comentado anteriormente, en el caso de funcionamiento normal se puede observar una variación periódica de la señal debida a la rotación de las aspas, siendo el periodo de esta variación igual a  $1/3$  del periodo de giro del rotor. El gráfico inferior muestra la variación de la señal dispersada al variar el ángulo de ataque de mínima a máxima resistencia al viento. Dado que las aspas están paradas, no se observa una oscilación periódica de la señal. Además se puede comprobar que las variaciones de la señal dispersada son mínimas en comparación con el caso anterior, y debidas probablemente a vibraciones en la estructura del aerogenerador.

Se observa un resultado similar en la medida de variación opuesta en el ángulo de ataque (de máxima a mínima resistencia al viento).

### Caso 2

En este caso el transmisor, el aerogenerador A29 y el receptor están prácticamente en línea, tal y como se muestra en la Figura 5.4. El aerogenerador

está orientado hacia el transmisor, mientras que la unidad móvil de medidas se encuentra prácticamente alineada con transmisor y aerogenerador.



**Figura 5.4. Caso 2. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de *pitch***

En una primera medida, el parque eólico se encuentra en funcionamiento normal, pero las palas del aerogenerador A29 se encuentran paradas debido a las condiciones desfavorables de viento. En la segunda medida se fuerza el cambio del ángulo de ataque de las aspas del aerogenerador A29 de máxima a mínima resistencia al viento.

La Figura 5.5 muestra la variación temporal de la señal dispersada por el aerogenerador A29 cuando las aspas están quietas (a) y durante la maniobra de control del ángulo de ataque de las palas de máxima a mínima resistencia al viento (b). Nótese que de nuevo se utiliza diferente escala de tiempo para cada gráfica. Se puede observar que la variación de la señal dispersada durante el cambio del ángulo de ataque de las aspas es similar a la situación en la que las palas están estáticas, y no se observa ningún cambio significativo en el nivel de señal dispersada entre la posición de máxima resistencia al viento y la posición de mínima resistencia.

En la campaña de medidas se han llevado a cabo más medidas controlando el ángulo de ataque de las palas, en otros puntos de recepción con diferente geometría relativa entre transmisor-turbina-receptor y diferentes orientaciones de la nacelle con respecto a transmisor y receptor. El análisis detallado de estas medidas parece demostrar que el área de la pala enfrentada a la señal incidente no es un factor determinante en el nivel de señal dispersada por el aerogenerador.

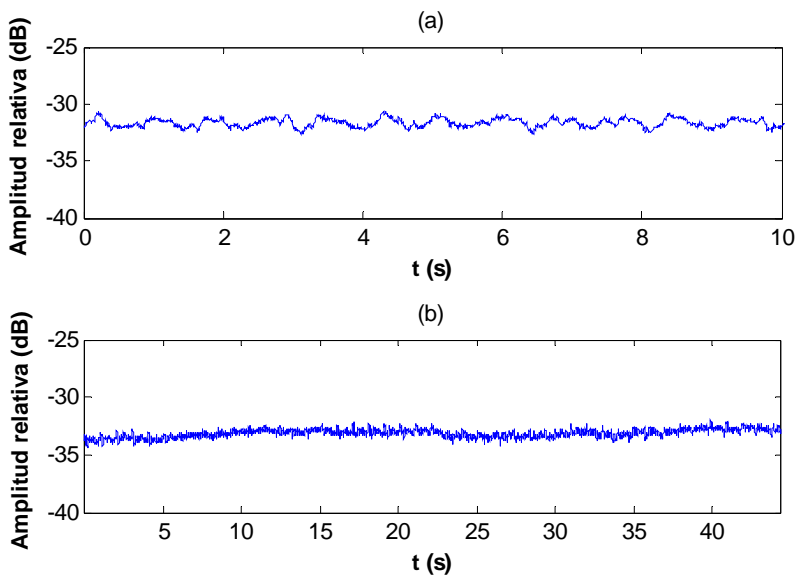


Figura 5.5. Caso 2. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas quietas (b) Aspas con variación del ángulo de ataque

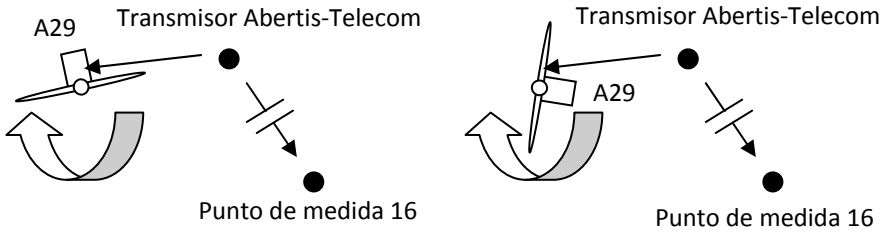
### 1.3 Variabilidad de las señales dispersadas debida al cambio de orientación del rotor

Durante la campaña de medidas se realizaron algunas capturas controlando el motor de viraje del rotor, para comprobar la influencia de la orientación del rotor en el nivel de señal dispersada. De manera análoga a lo presentado en el apartado anterior, a continuación se incluyen dos ejemplos que permiten comprobar la variación de la señal dispersada al cambiar la orientación del aerogenerador con respecto a transmisor y receptor.

#### Caso 3

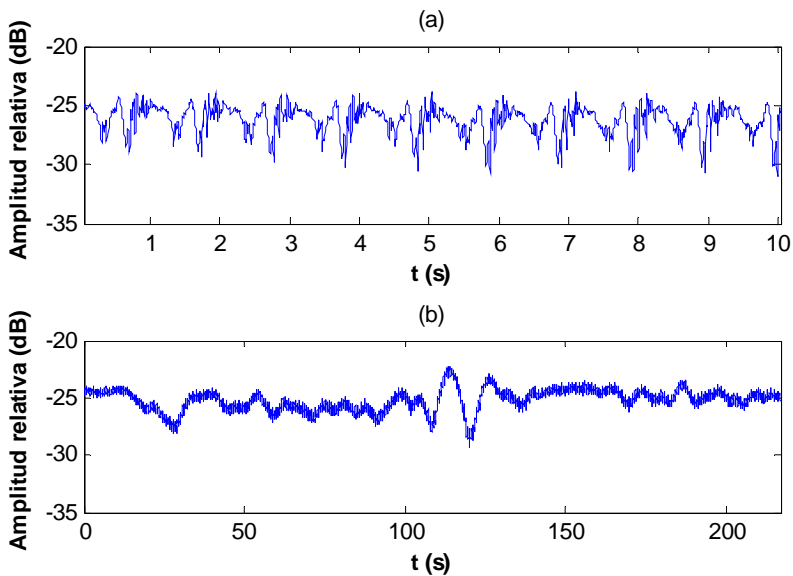
El ejemplo presentado corresponde al mismo punto de recepción recogido en el Caso 1 para la variación en el ángulo de ataque de las aspas.

Una vez que se fuerza la parada de las palas, los motores de viraje hacen girar la góndola del aerogenerador A29 aproximadamente 90° en sentido horario, como puede observarse en la Figura 5.6



**Figura 5.6. Caso 3. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de yaw. (Izq.) Posición inicial (Dcha.) Posición final**

La Figura 5.7 muestra, en la parte superior, la variación temporal de la señal cuando el aerogenerador se encuentra orientado hacia el punto de recepción y con sus aspas rotando (mismo caso que la Figura 5.3 (a)). En la parte inferior se muestra la variación temporal de la señal dispersada por el aerogenerador A29 en la situación representada en la Figura 5.6. De esta manera se pretende comparar la variación de la señal debida al movimiento de las aspas en régimen de funcionamiento normal con la variación debida al cambio de orientación en el rotor del aerogenerador.



**Figura 5.7. Caso 3. Variación de la señal dispersada por el aerogenerador A29. (a) Aspas rotando (b) Cambio en la orientación del rotor 90° en sentido horario**

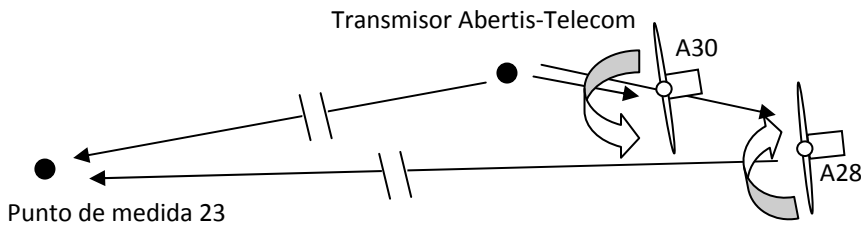
En la figura se observan variaciones considerables con el cambio de orientación del rotor. Estas variaciones son máximas entre los valores 110 y 120 del eje de abscisas, cuando el aerogenerador ha girado aproximadamente 45°. Estas variaciones podrían deberse a reflexiones en la góndola pero en general las oscilaciones en la señal no muestran una tendencia clara.

En la campaña se han llevado a cabo varias medidas controlando el motor de viraje de algún aerogenerador con las aspas quietas, en las que se puede comprobar que existen variaciones al menos similares en magnitud a las que se producen por la rotación de las aspas. Tanto la posición estática de las aspas como la contribución de la nacelle parecen influir en las variaciones de señal dispersada durante la maniobra.

**Caso 4**

El Caso 4 presenta un ejemplo de cambio de orientación del rotor no controlado, en el que los aerogeneradores A30 y A28 están rotando sus palas y a la vez reorientando la dirección de la nacelle en busca del máximo aprovechamiento del viento. El punto de recepción del Caso 4 coincide con el punto de recepción del Caso 2.

La Figura 5.8 representa la situación a analizar, en la cual el aerogenerador A30 gira algunos grados en sentido anti horario, mientras que A28 gira algunos grados en sentido contrario.



**Figura 5.8. Caso 4. Disposición relativa transmisor-turbina-receptor para medida de yaw**

Las amplitudes relativas de las señales dispersadas por los aerogeneradores A30 y A28 mientras reorientan sus rotores se muestran en la Figura 5.9. Se puede observar que la amplitud de las oscilaciones debidas a la rotación de las aspas varía al cambiar la orientación del aerogenerador con respecto al transmisor y al punto de recepción. Por lo tanto, las variaciones en la señal dispersada cuando se controla el motor de viraje con las palas estáticas podrían depender de la posición



en la que se queden paradas las aspas al girar el rotor. Además, la variabilidad de la señal debida a la rotación de las aspas, y por tanto también el espectro Doppler que caracterice esta variabilidad, dependerá de la orientación de la turbina con respecto a transmisor y receptor.

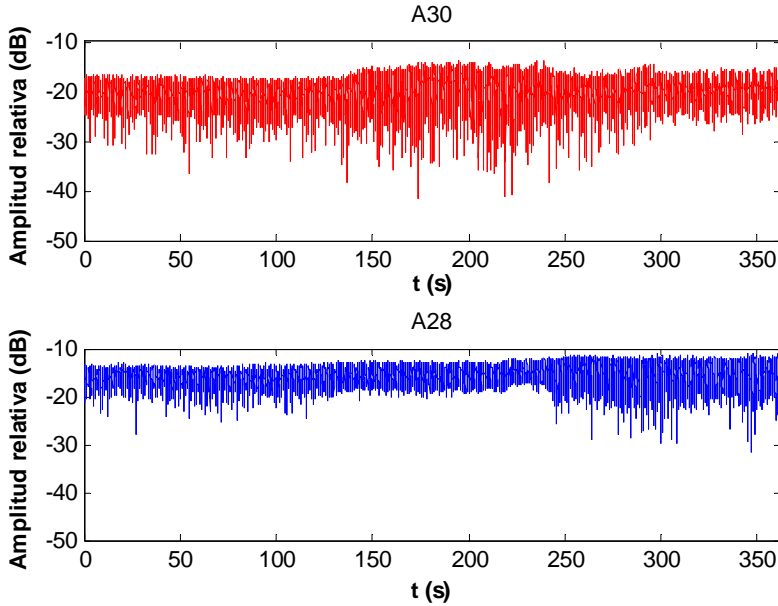


Figura 5.9. Caso 4. Variación de las señales dispersadas por los aerogeneradores A30 (arriba) y A28 (abajo).

## 1.4 Conclusiones

Los ejemplos presentados en los apartados previos nos permiten determinar algunas de las características principales de las señales dispersadas por los aerogeneradores. En concreto, la definición de medidas propuesta en el Capítulo 3 permite analizar la influencia de los tres tipos de movimientos del rotor (*yaw* o viraje, *pitch* o ángulo de ataque de las palas, y rotación), lo cual lleva a diferenciar el efecto de las partes estáticas y móviles del aerogenerador.

En el caso de la rotación de las aspas, se observa claramente una variación periódica en el nivel de señal dispersada, coincidiendo el periodo de estas oscilaciones con  $1/3$  del periodo de giro del rotor. Estas variaciones pueden ser de amplitud considerable y además, tal y como se ha demostrado en el Capítulo 4, pueden ser responsables de una degradación adicional en los servicios ofrecidos en esta banda de frecuencias.

Las medidas con movimientos controlados de *yaw* y *pitch* permiten observar las variaciones en la señal dispersada al realizar estas maniobras, así como compararlas con las variaciones debidas al funcionamiento normal de los aerogeneradores.

En el caso de la influencia de la orientación del rotor, se ha demostrado que tanto la amplitud media de la señal como la amplitud de las variaciones debidas a la rotación de las aspas, dependen de la orientación relativa del aerogenerador con respecto al transmisor y al receptor. Sin embargo, el efecto de la orientación del rotor parece ser de mayor importancia en la señal dispersada por las palas del aerogenerador. Las diferencias que se producen en la amplitud media podrían deberse a una mayor o menor contribución de la góndola a la señal dispersada en función de su orientación con respecto al viento.

Por último, el análisis de las medidas realizadas modificando el ángulo de ataque de las aspas parece demostrar que la influencia de este movimiento del aerogenerador es despreciable con respecto al efecto debido a la rotación de las palas.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE LOS AEROGENERADORES MEDIANTE SIMULACIONES

---

En este apartado se presentan estimaciones de la sección radar de un aerogenerador basadas en el método de óptica física. La sección radar o RCS representa la superficie equivalente de un conductor perfecto que, radiando omnidireccionalmente, radia hacia el receptor la misma energía que el aerogenerador [102].

Las simulaciones tienen como objetivo determinar la importancia relativa del mástil en la sección radar del aerogenerador completo. Para ello, se realiza una caracterización de cada elemento de la turbina por separado para diferentes direcciones de incidencia y recepción, así como para diferentes condiciones de iluminación.

### 2.1 Óptica física para estimación de RCS

Las técnicas de alta frecuencia consisten en la evaluación asintótica de las ecuaciones de Maxwell, en las que se asume que el tamaño eléctrico de los obstáculos es relativamente grande con respecto a la longitud de onda de trabajo [5],[6],[101].

Dentro de estas técnicas, el método de la óptica física consiste en la estimación del campo eléctrico radiado por las corrientes inducidas en la superficie iluminada del objeto. Estos valores de corriente sobre las partes iluminadas se calculan como la corriente en cada punto que se encontraría en un plano tangente de material similar, y se suponen nulas en las zonas no iluminadas. El campo eléctrico radiado en campo lejano se obtiene integrando estas corrientes aproximadas [5],[6],[101].

Los resultados más precisos se obtienen para objetos eléctricamente grandes ( $L \gg 10\lambda$ ) y para puntos de observación cercanos a la dirección especular. Si el punto de observación está muy alejado de la dirección especular o el cuerpo es eléctricamente pequeño, el comportamiento de las corrientes en los bordes de la superficie iluminada afecta significativamente al campo dispersado [6].

Para calcular la RCS es usual descomponer la superficie del objeto en un conjunto de formas simples y calcular la sección radar total como la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos, llamados celdas o *facets* [6]. Así, se

puede descomponer la superficie de cualquier objeto complejo, por ejemplo, en una colección de triángulos planos. La señal dispersada por cada *facet* se calcula como si estuviera aislada en el espacio, por tanto, no se incluyen efectos como el de la difracción o reflexión múltiple [5].

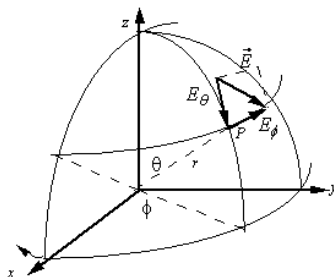
La herramienta software POfacets es una implementación de la aproximación de la óptica física para la estimación de la RCS tanto monoestática (transmisor y receptor en la misma ubicación) como biestática (transmisor y receptor en distintas ubicaciones) de objetos complejos desarrollada en Matlab [103].

## 2.2 Condiciones de simulación

Para el estudio del diagrama de dispersión de las partes del aerogenerador y del aerogenerador completo se han diseñado modelos en CAD formados por múltiples triángulos cuyo tamaño es un compromiso entre la condición de cuerpos eléctricamente grandes para la frecuencia de simulación y el diseño preciso del aerogenerador. La frecuencia utilizada para las simulaciones es 800 MHz.

Para el modelo del aerogenerador se han usado medidas típicas del modelo G52 de Gamesa instalado en la primera fase del parque eólico de Oiz [4]. Cabe destacar que en una primera aproximación, el rotor y la nacelle se han considerado superficies perfectamente conductoras, al igual que el mástil. Por lo tanto, cabe esperar que en una situación real la contribución de las palas y el rotor sea menor que la obtenida a lo largo de este estudio. Tratar las palas y la góndola como materiales PEC en lugar de materiales compuestos de fibra de vidrio o carbono supone evaluar el caso peor de dispersión de estos componentes.

La Figura 5.10 muestra el sistema de coordenadas esféricas usado para la representación de las direcciones de incidencia y observación (*scattering*). En el análisis posterior, los ángulos incidentes se indican mediante subíndice *i* y los ángulos de observación mediante subíndice *s*.



**Figura 5.10. Sistema de coordenadas esféricas usado para especificar las direcciones de incidencia y de observación**

## 2.3 Resultados de las simulaciones

Se han llevado a cabo simulaciones de RCS de los diferentes componentes del aerogenerador por separado de cara a caracterizar sus patrones de dispersión en los planos horizontal y vertical.

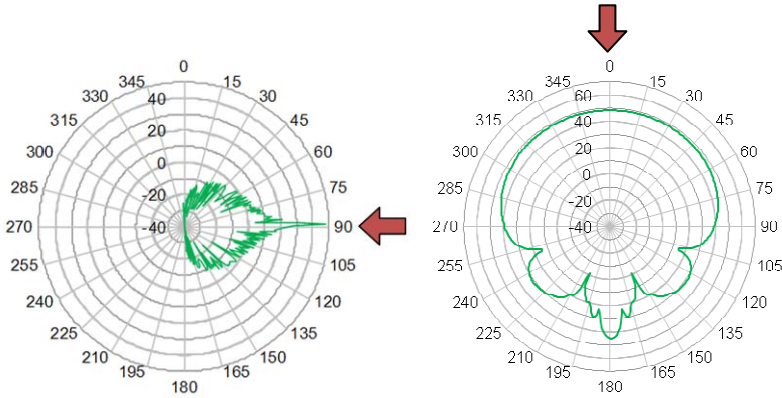
### 2.3.1 Diagrama de dispersión del mástil

Primero, se analiza el diagrama de dispersión en el plano vertical del mástil cuando éste es iluminado perpendicularmente a su eje ( $\theta_i=90^\circ$ ,  $\phi_i=0^\circ$ ). La dirección de incidencia se indica en las siguientes figuras mediante una flecha roja. La Figura 5.11 (izq.) muestra la sección radar del mástil en el plano vertical que contiene la señal incidente en función del ángulo de elevación ( $0^\circ \leq \theta_s \leq 180^\circ$ ).

En la figura se puede observar una variación significativa del patrón de dispersión con el ángulo de elevación en un rango estrecho alrededor del plano horizontal, es decir, los mayores valores de RCS se concentran en un estrecho lóbulo perpendicular al mástil. Más concretamente, el máximo en el plano vertical corresponde con  $\theta_s \approx 89^\circ$  debido a la inclinación propia de la superficie del mástil, cuya forma geométrica es un cono truncado con una pendiente de aproximadamente  $1^\circ$ .

La variación en el plano horizontal se analiza para el máximo valor de sección radar en el plano vertical correspondiente a  $\theta_s = 89^\circ$ , por lo que en vez de un plano completamente horizontal lo que se representa es la superficie cónica formada en  $\theta_s = 89^\circ$  alrededor del mástil. La Figura 5.11 (drcha.) muestra la variación de la sección radar en acimut para el máximo del diagrama de dispersión vertical.

Se observa un diagrama de dispersión casi uniforme en el rango de ángulos de acimut desde  $-90^\circ$  hasta  $90^\circ$ . Se puede observar también un lóbulo en la dirección de *forward scattering* similar en valor al lóbulo de *backscattering*. Sin embargo, la señal dispersada en la zona de *forward scattering* tiene fase contraria al campo incidente, de manera que prácticamente se cancelan entre sí, creando una zona de sombra de intensidad reducida tras el objeto [5]. Tal y como se ha demostrado en el Capítulo 4 – Influencia sobre DVB-T, la influencia de las señales dispersadas en esta zona sobre la calidad de TDT es prácticamente despreciable, por lo que esta región de dispersión se considera de menor interés para nuestro estudio.



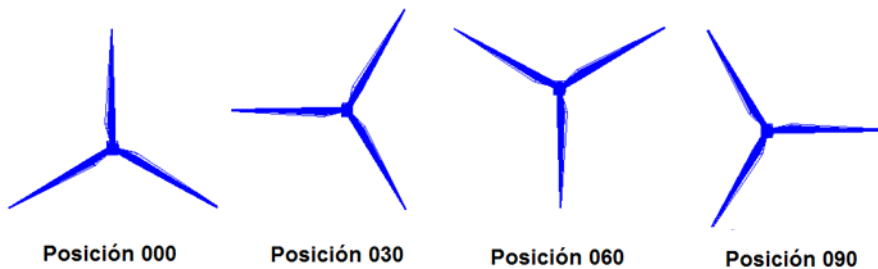
**Figura 5.11. Diagrama de dispersión (dBsm) del mástil para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ ,  $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ )**

### 2.3.2 Diagrama de dispersión de la nacelle y el rotor

Se simula el rotor para cuatro posiciones distintas de aspas, giradas cada  $30^\circ$  y para una incidencia frontal y lateral en cada uno de los casos. La nomenclatura de las posiciones de las aspas se muestra en la Figura 5.12.

Las simulaciones realizadas para cada una de estas posiciones de aspa se corresponden con los siguientes casos:

- Incidencia frontal con el transmisor situado en  $\phi_i=0^\circ$  y  $\theta_i=90^\circ$ , diagramas de dispersión en el plano horizontal  $\theta_s=89^\circ$  y en el plano vertical  $\phi_s=0^\circ$ .
- Incidencia frontal con el transmisor situado en  $\phi_i=0^\circ$  y  $\theta_i=82^\circ$ , diagramas de radiación en el plano horizontal  $\theta_s=89^\circ$  y en el plano vertical  $\phi_s=0^\circ$ .
- Incidencia lateral con el transmisor situado en  $\phi_i=90^\circ$  y  $\theta_i=90^\circ$  en el plano horizontal  $\theta_s=89^\circ$  y en el plano vertical  $\phi_s=90^\circ$ .



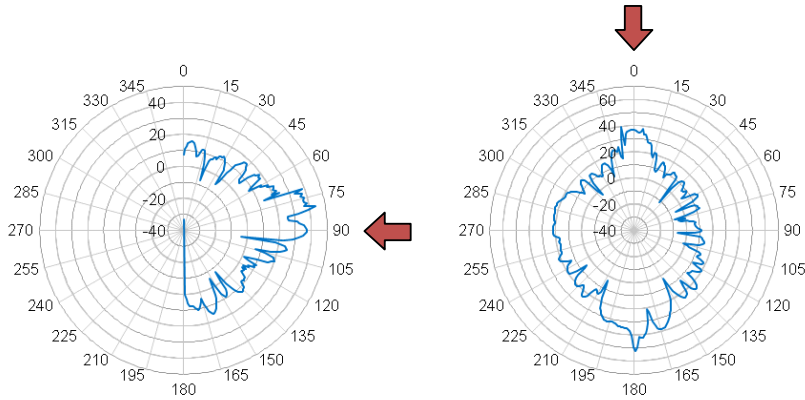
**Figura 5.12. Posiciones de las palas utilizadas para las simulaciones**

Dado que el rotor está inclinado  $8^\circ$  para evitar el contacto de las aspas con el mástil, la iluminación en  $\theta_i=82^\circ$  incide perpendicularmente al plano de rotación. Además, el corte en el plano horizontal se realiza en  $\theta_s=89^\circ$  para coincidir con el máximo del mástil y permitir posteriormente la comparativa de resultados entre las diferentes partes del aerogenerador. A continuación se presentan algunos ejemplos representativos de los resultados obtenidos.

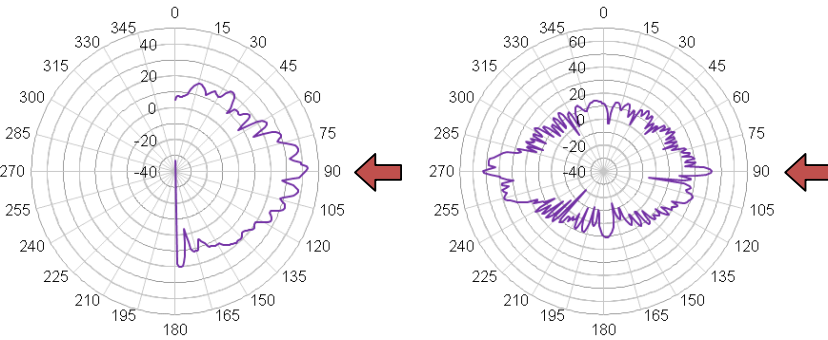
La Figura 5.13 muestra la sección radar del rotor en los planos horizontal y vertical para una incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$  y  $\theta_i=90^\circ$ ) para la posición de aspas 000. En ella se puede observar que debido al complejo diseño de las aspas y el rotor, la sección radar es muy variable con el ángulo de observación, tanto en el plano horizontal como en el vertical. Además, se puede comprobar que el diagrama de dispersión no presenta un comportamiento tan marcadamente especular como en el caso del mástil.

Similares conclusiones se derivan de los resultados obtenidos al incidir lateralmente al rotor ( $\phi_i=90^\circ$  y  $\theta_i=90^\circ$ ), tal y como se puede observar en la Figura 5.14. En este caso, el diagrama de dispersión en el plano vertical presenta menores variaciones debido probablemente a que la nacelle presenta una superficie mayor que el rotor a la señal incidente y su diseño es menos complejo.

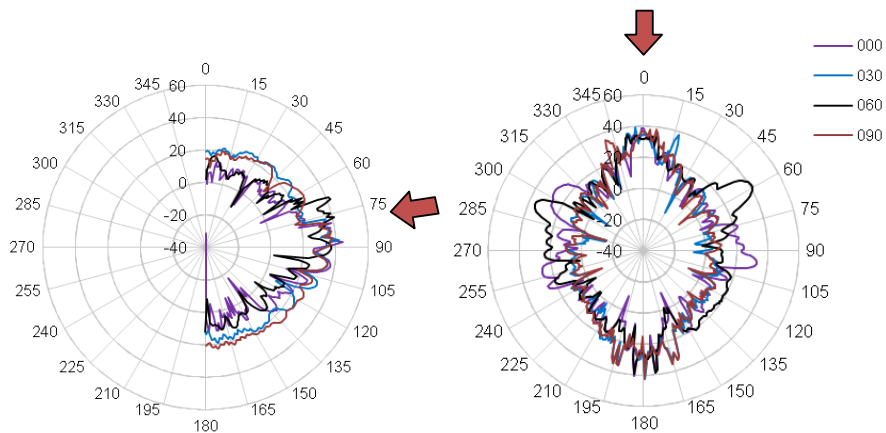
Por último, la Figura 5.15 muestra una comparativa de los diagramas de dispersión del rotor y nacelle para las cuatro posiciones de pala mostradas en la Figura 5.12 para una incidencia frontal pero con una inclinación de  $\theta_i=82^\circ$ . Puede observarse que los diagramas de dispersión varían tanto en el plano horizontal como en el vertical con el movimiento de las aspas. Ninguno de estos diagramas de dispersión muestra un patrón sencillo ni un comportamiento tan especular como el debido al mástil.



**Figura 5.13. Diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en posición 000 para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ ,  $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ )**



**Figura 5.14. Diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en posición 000 para incidencia lateral ( $\phi_i=90^\circ$ ,  $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=90^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ )**

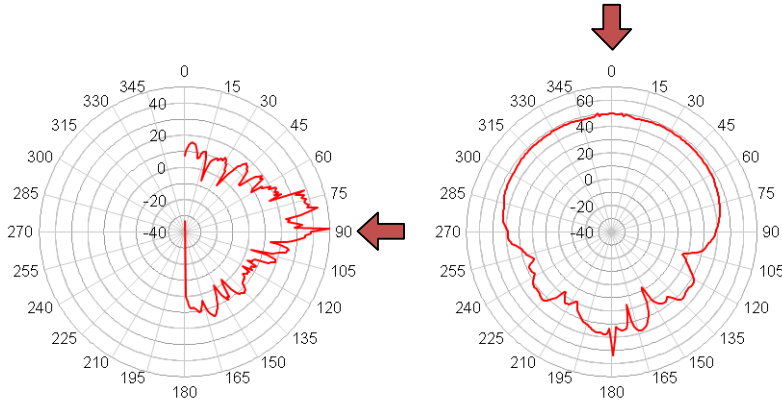


**Figura 5.15. Comparativa del diagrama de dispersión (dBsm) del rotor en cuatro posiciones para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ ,  $\theta_i=82^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=90^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ )**



### 2.3.3 Diagrama de dispersión del aerogenerador completo

Se han realizado múltiples simulaciones del aerogenerador completo en las cuatro posiciones de palas para incidencia frontal y lateral. A modo de ejemplo, se presentan a continuación los resultados de las simulaciones del aerogenerador en la posición de palas 000 para condiciones de iluminación frontal.



**Figura 5.16. Diagrama de dispersión (dBsm) del aerogenerador en posición 000 para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ ,  $\theta_i=90^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=89^\circ$ )**

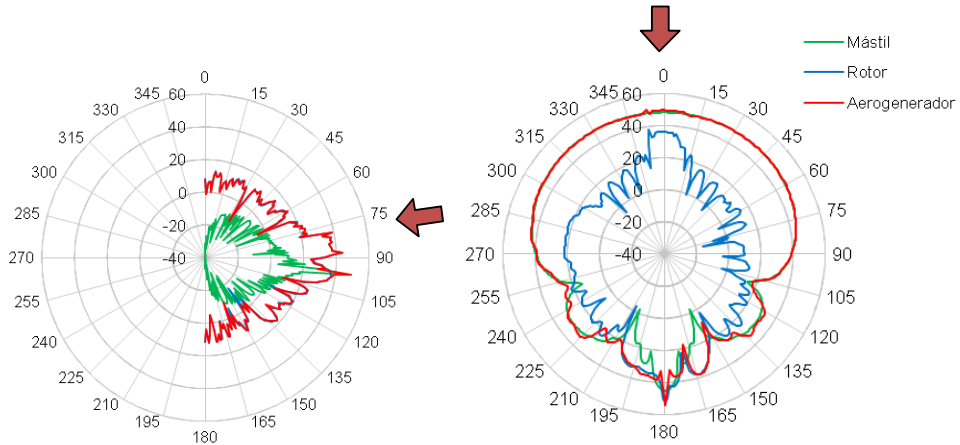
En el plano vertical se aprecia que el máximo valor de la sección radar se da para  $\theta_s=89^\circ$ , coincidiendo con el valor máximo para el caso del mástil. El corte en el plano horizontal para el ángulo máximo del diagrama vertical muestra una dispersión uniforme para un amplio rango de ángulos alrededor de la dirección de iluminación.

De las simulaciones realizadas con iluminación lateral se extraen similares conclusiones: el valor máximo de RCS coincide con el valor de la reflexión especular del mástil, y para este valor en el plano horizontal la sección radar es prácticamente constante en un amplio rango de ángulos de *backscattering*.

### 2.3.4 Comparativa entre los diferentes elementos del aerogenerador

En esta sección se comparan los diagramas de dispersión de todos los elementos del aerogenerador obtenidos en las simulaciones. Previamente se ha analizado toda la casuística simulada para buscar los valores máximos de sección radar del rotor, y comprobar así la importancia relativa del mástil en la señal dispersada en condiciones de caso peor respecto a la contribución de las aspas.

Así, se selecciona la posición 000 cuando la incidencia es frontal con una inclinación de  $82^\circ$  ( $\phi_i=0^\circ$  y  $\theta_i=82^\circ$ ). La comparación de diagramas de dispersión incidiendo en todos los elementos con este ángulo de elevación se presenta en la Figura 5.17.



**Figura 5.17. Comparativa de diagramas de dispersión (dBsm) del aerog. y sus elementos para incidencia frontal ( $\phi_i=0^\circ$ ,  $\theta_i=82^\circ$ ) (izq.) Plano vertical ( $\phi_s=0^\circ$ ) (drcha.) Plano horizontal ( $\theta_s=97^\circ$ )**

Se puede observar el desplazamiento del máximo valor de señal reflejada por el aerogenerador en el plano vertical, situado en el ángulo de elevación  $\theta_s=97^\circ$  que coincide con el máximo del mástil en la dirección de reflexión especular. En el caso de la superficie cónica formada por el ángulo  $\theta_s=97^\circ$  se aprecian de nuevo valores mucho más elevados de RCS, debidos al mástil, que los generados por el rotor en casi todas las direcciones biestáticas.

## 2.4 Conclusiones

En esta sección se ha estimado la señal dispersada por cada una de los componentes del aerogenerador por separado, de cara a evaluar la contribución relativa del mástil a la sección radar del aerogenerador completo. Para ello, se han obtenido diagramas de RCS para diferentes condiciones de iluminación y direcciones de observación.

Los resultados demuestran que el mástil genera señales dispersadas de amplitud significativa en un estrecho lóbulo en la dirección de reflexión especular del plano vertical. La contribución del mástil en este margen de ángulos es mayor

que las contribuciones del resto de elementos del aerogenerador, no sólo en la dirección de incidencia sino también en un amplio rango de ángulos en acimut  $\phi_s$ .

Los modelos de dispersión utilizados para planificación de servicios están normalmente basados en condiciones de caso peor. Las simulaciones realizadas demuestran que la sección radar del aerogenerador se ve subestimada al no considerar la contribución del mástil.

Ha de tenerse en cuenta, además, que las simulaciones presentadas consideran que tanto el rotor como la nacelle están fabricados en materiales metálicos (PEC), para suponer el caso peor de dispersión de estos elementos y tener en cuenta el posible efecto de elementos de protección metálicos que pudieran incluir. La estimación de RCS de la nacelle y el rotor utilizando materiales compuestos de fibra de epoxy resulta en contribuciones hasta 15 dB menores que las presentadas en esta sección, lo cual añade valor a la importancia relativa del mástil en la señal dispersada por el aerogenerador.



*I have no picture of this electromagnetic field that is in any sense accurate... I see some kind of vague, shadowy, wiggling lines... So if you have some difficulty in making such a picture, you should not be worried that your difficulty is unusual.*

*- Richard P. Feynman*

---

## **CAPÍTULO 6:      MODELO DE DISPERSIÓN**

---

Este capítulo comienza con una recopilación bibliográfica de los modelos teóricos de dispersión existentes para estimar la señal dispersada por un aerogenerador en la banda UHF. Este análisis teórico se completa con la evaluación de la precisión de estos modelos al ser comparados con las medidas realizadas. Las conclusiones obtenidas permiten proponer un nuevo modelo de dispersión basado en el cálculo de la sección radar biestática de un cilindro, que se corresponde con la señal dispersada por el mástil, y demostrar su validez mediante la comparación con las medidas disponibles.



# 1. MODELOS DE DISPERSIÓN DE SEÑAL EN LOS AEROGENERADORES

---

Desde finales de los años 70 comenzaron a realizarse estudios para caracterizar la dispersión de energía debida a un aerogenerador, tras detectarse problemas de degradación de la calidad en la recepción de televisión analógica cuando bien los transmisores o los receptores se situaban cerca de un parque eólico. Estos estudios, fundamentalmente teóricos, buscaban modelos de dispersión sencillos que pudieran utilizarse para estimar la degradación que podría producir un parque eólico sobre los servicios de televisión.

A continuación se describen cinco de estos modelos aplicables al caso concreto de la radiodifusión de televisión terrestre, evaluando sus limitaciones. En primer lugar se recogen los modelos recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en las recomendaciones Rec. UIT-R BT.805 [44] y Rec. UIT-R BT.1893 [104], y posteriormente los modelos propuestos por Sengupta [38]-[40],[99],[105], el Departamento de Investigación de la BBC [41] y Van Kats [42].

## 1.1 Recomendación UIT-R BT.805

En esta recomendación se propone un modelo simplificado de aerogenerador basado en la señal dispersada por el aspa, considerada como una placa rectangular metálica. Se definen además dos tipos de zonas de dispersión: la zona de dispersión general y la zona de dispersión hacia delante, como se observa en la Figura 6.1 [44].

En cualquier emplazamiento de recepción  $R$ , la intensidad de campo deseada es  $FSR$ . En el emplazamiento donde se encuentra la turbina eólica (WT), la intensidad de campo es  $FSWT$ . Se define un *factor de reflexión*,  $RF$ , que incluye las pérdidas de propagación en el espacio libre para los primeros kilómetros del trayecto desde la localización de la turbina hasta  $R$ . El valor máximo del factor de reflexión debido al movimiento de las aspas es igual a

$$RF = 20 \log \left( \frac{A}{\lambda} \right) - 60dB \quad (6.1)$$

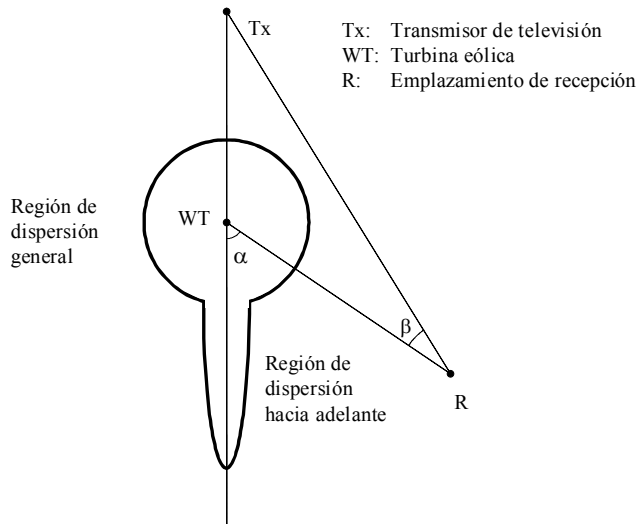
Donde  $A$  ( $m^2$ ) es el área del aspa y  $\lambda$  ( $m$ ) es la longitud de onda.

Por otra parte, la amplitud relativa ( $RA$ ) en la región de dispersión hacia adelante (*forward scattering*) viene dada por:

$$RA = 20 \log \frac{\sin(\pi \cdot W / \lambda \cdot \sin \alpha)}{\pi \cdot W / \lambda \cdot \sin \alpha} \quad (6.2)$$

donde  $W$  ( $m$ ) es la anchura del aspa.

Se supone que la amplitud relativa en la zona de dispersión general (*backscattering*) es  $-10$  dB.



**Figura 6.1. Modelo simplificado y regiones de dispersión según la Rec. UIT-R BT.805 [44]**

De esta manera, para un trayecto  $d$  (en km) entre el aerogenerador y el receptor, la expresión de la intensidad de campo no deseada se calcula mediante:

$$FSWT + RF + \max(-10, RA) - 20 \log d \quad (6.3)$$

De modo que  $\max(-10, RA)$  es el valor máximo entre  $-10$  dB y el valor de  $RA$ , lo que permite identificar la región de influencia en la que se encuentra el receptor según este modelo.



## 1.2 Recomendación UIT-R BT.1893

La Recomendación UIT-R BT.805 era, al inicio de esta tesis, la referencia en cuanto a regulación a nivel internacional para la planificación de servicios de televisión en las bandas de VHF y UHF en presencia de parques eólicos. Esta Recomendación ha permanecido sin cambios desde su aprobación en 1992.

En 2006, Australia presentó en la UIT un documento que realizaba un análisis crítico de la Recomendación BT.805 concluyendo que *“actualmente no es adecuada para predecir las interferencias procedentes de un parque eólico sobre las señales de televisión analógicas y digitales”* [106].

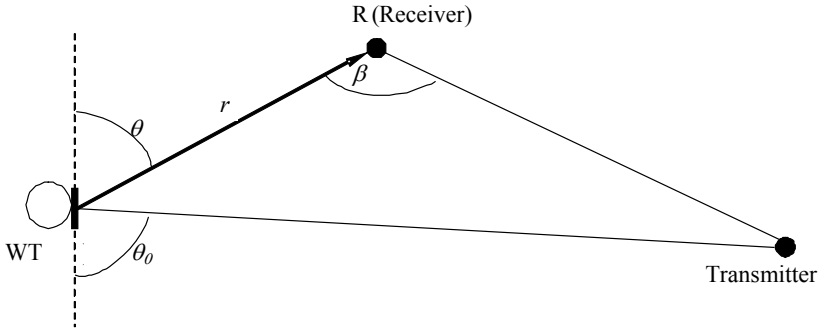
Algunos de estos comentarios críticos a la Recomendación son:

- Considerar una aspa rectangular metálica dispuesta en orientación vertical resulta una representación pobre de la geometría actual de las aspas y su orientación a otros ángulos.
- El material de las aspas se considera metálico, cuando en la actualidad las palas están típicamente fabricadas de materiales compuestos que se caracterizan por coeficientes de reflexión menores.
- El modelo propuesto es estático, y no proporciona información sobre la naturaleza dinámica de las señales dispersadas al rotar las palas.
- Se ignora el efecto del mástil, aún cuando su estructura es típicamente metálica y por lo tanto podría contribuir significativamente a la señal dispersada por el aerogenerador.
- No se proporciona un patrón de dispersión en el plano de elevación, lo que podría ser de importancia en casos en los que los aerogeneradores se encuentran situados a mayor altura que los puntos de recepción.
- El modelo propuesto en la Recomendación sólo contempla una única turbina.

En 2008, parte del anterior estudio se incluyó en un Borrador Preliminar de Revisión de la Recomendación UIT-R BT.805 [107] que *“proporciona un método para determinar la potencial degradación causada a la recepción de televisión digital debida a la instalación de una única turbina eólica”*. El modelo propuesto se basa en el incluido en la Recomendación BT.805, pero considerando que las aspas son metálicas y aproximadamente triangulares.

De manera análoga al método propuesto en la Recomendación BT.805, se considera que en un punto de recepción  $R$  la intensidad de campo deseada es  $FSR$ .

En el emplazamiento donde se encuentra la turbina eólica (WT), la intensidad de campo es  $FSWT$ . Se supone que el punto de recepción se encuentra a una distancia  $r$  (m) del aspa del aerogenerador.



**Figura 6.2. Geometría transmisor-turbina-receptor Rec. UIT-R BT.1893 [104]**

Se define un “coeficiente de dispersión”  $\rho$  que incluye las pérdidas por espacio libre debidas al trayecto del aerogenerador al punto de recepción:

$$\rho = \frac{A}{\lambda r} g(\theta) \quad (6.4)$$

Donde

$$g(\theta) = \text{sinc}^2 \left[ \frac{\overline{W}}{\lambda} (\cos \theta - \cos \theta_0) \right] \sin \theta \quad (6.5)$$

Y  $\overline{W}$  (m) es la anchura media del aspa,  $\lambda$  (m) es la longitud de onda,  $A$  ( $m^2$ ) es el área del aspa,  $\theta_0$  es el ángulo de incidencia de la señal sobre el aspa y  $\theta$  es el ángulo de la señal dispersada desde el aspa.

El valor máximo del coeficiente de dispersión cuando la pala se encuentra en posición vertical ocurre cuando tanto la señal incidente como la dispersada son perpendiculares al aspa, según la expresión

$$\rho_{\max} = \frac{A}{\lambda r} \quad (6.6)$$

Considerando un trayecto entre aerogenerador y receptor de longitud  $r$  y considerando propagación por espacio libre, el campo no deseado en el receptor se podría calcular como

$$FSWT + 20 \log \rho \quad (6.7)$$

El modelo señala que el coeficiente de dispersión  $\rho$  sólo es aplicable en la zona de *backscattering*, a pesar de que indica que el nivel de dispersión debido a las aspas en la zona *forward scattering* puede ser significativo (en cualquier caso menor que el obtenido en la zona de *backscattering* y más difícil de calcular). Por la definición de los ángulos incluida en la Figura 6.2, se deduce que la zona de *backscattering* se refiere al semiplano limitado por el plano de rotación de las aspas y que incluye al transmisor. Ello difiere de la definición de las zonas de dispersión general y de dispersión hacia delante de la Recomendación BT.805 [44], que al estar basadas en condiciones de máxima dispersión, son fijas e independientes de la orientación de las aspas con respecto al viento.

El documento también incluye algunos comentarios acerca de los aspectos considerados como deficientes en la Recomendación BT.805. Así, contiene una nota al pie en la que se indica que las palas actuales son típicamente de fibra de vidrio u otros materiales compuestos y esto puede suponer un nivel de dispersión entre 6 y 10 dB inferior al que se obtendría al considerar las palas metálicas. También comenta que el patrón de dispersión podría variar al menos 10 dB al rotar las aspas, y que el mástil metálico también contribuye significativamente al nivel de señal dispersada. Sin embargo, no se justifican los valores propuestos ni se ofrecen valores de referencia para el mástil.

En resumen, el modelo propuesto es, en esencia, igual al de la Recomendación BT.805, pero considerando una geometría triangular para las aspas, en lugar de rectangular, y teniendo en cuenta los ángulos de incidencia sobre el aspa y de dispersión desde ésta. Por lo tanto, el modelo presentado sigue sin dar solución a algunas de las carencias indicadas por los propios autores [106]: a pesar de que el modelo incluye la variación con la orientación de la pala con respecto al transmisor (*yaw*), sigue siendo estático en lo referente al movimiento de rotación. Además no cuantifica la contribución del mástil, ni considera los ángulos de elevación, y no contempla el caso de una instalación de múltiples máquinas.

En Abril de 2010, el modelo propuesto fue incluido en el Borrador de Nueva Recomendación sobre influencia de aerogeneradores en la recepción de televisión digital [108], y posteriormente se incluyó en la nueva Rec. UIT-R BT.1893 [104], aprobada en Mayo de 2011.

### 1.3 Modelo de Sengupta

Los autores Sengupta y Senior del Laboratorio de Radiación de la Universidad de Michigan han publicado, desde finales de los años 70, múltiples estudios teóricos y resultados de diversas pruebas (tanto de laboratorio como de campo) en relación a la influencia de los aerogeneradores sobre diversos servicios de telecomunicación: radio FM, televisión, radioenlaces, etc. [38]-[40],[99],[105].

Los estudios teóricos de Sengupta para obtener los campos dispersados se basan en conceptos de óptica física, mediante los cuales calcula los momentos inducidos sobre el aspa del aerogenerador al incidir un campo eléctrico. En el cálculo del campo eléctrico se asume que el transmisor, el aerogenerador y el receptor se encuentran ubicados unos respecto a otros en la zona de campo lejano. Esto da lugar a complejas expresiones dependientes de múltiples factores, por lo que a efectos prácticos se plantea un modelo simplificado que asume que el plano de rotación de las palas está orientado de manera que dirige la máxima señal dispersada hacia el receptor. Por lo tanto, proporciona una zona de interferencia basada en el caso peor.

En su referencia más reciente sobre este tema [99], se realiza una recopilación de estos estudios, en la que se presenta un conjunto de ecuaciones que permiten estimar los posibles niveles de interferencia causados por los aerogeneradores sobre el servicio de televisión. En este informe se recogen una descripción teórica de las señales electromagnéticas afectadas por interferencia, resultados de pruebas experimentales sobre la dispersión de señal sobre los aerogeneradores, y factores de dispersión ideales obtenidos a partir de las características de los aerogeneradores y las posiciones relativas entre los aerogeneradores, el transmisor y el receptor.

Se define el *factor de dispersión de señal (signal scatter ratio)* como la amplitud de la señal que llega al receptor tras ser dispersada por el aerogenerador entre la señal que llega a la turbina procedente del transmisor:

$$Z = \frac{|E_{R,S}|}{|E_{WT,D}|} \quad (6.8)$$

Donde  $Z$  es el factor de dispersión de señal,  $|E_{R,S}|$  (mV/m) es la amplitud de la señal dispersada por la turbina en la posición del receptor y  $|E_{WT,D}|$  (mV/m) es la amplitud de la señal directa en el aerogenerador (procedente del transmisor).

El factor de dispersión  $Z$  es característico de la turbina y de su posición relativa con respecto a transmisor y receptor, siendo independiente de la antena utilizada en recepción.

Para calcular un *factor de dispersión ideal*  $Z_I$  se utiliza un modelo simplificado que maximiza el campo de la señal dispersada. Para ello, se considera que las aspas del aerogenerador se encuentran orientadas de forma que se produce la máxima dispersión de la señal procedente del transmisor (situación de reflexión especular para la zona de *backscattering* y situación de sombra para la zona de *forward scattering*), todas las elevaciones (transmisor, receptor y turbina) se consideran iguales y se desprecian los efectos de reflexión en el suelo. Bajo estas condiciones, se define el factor de dispersión ideal como:

$$Z_I = \frac{|E_{R,S}|_I}{|E_{WT,D}|} = \eta_S \frac{B_E A_P}{\lambda \zeta} \cos(k\phi_S) \tag{6.9}$$

$$k = \begin{cases} 0,5 & -0,8\pi \leq \Phi_S \leq 0,8\pi & (\text{Backward Zone}) \\ 2,0 & 0,8\pi \leq \Phi_S \leq 1,2\pi & (\text{Forward Zone}) \end{cases}$$

Donde  $|E_{R,S}|_I$  (mV/m) es la amplitud ideal de las señal dispersada en el receptor,  $\eta_S$  es la eficiencia de dispersión del aspa (respecto a un aspa metálica plana),  $B_E$  es el número efectivo de aspas (menor o igual al número real de palas),  $A_P$  (m<sup>2</sup>) es la máxima área proyectada del aspa,  $\lambda$  (m) es la longitud de onda de la señal del transmisor,  $\zeta$  (m) es la distancia entre el receptor y la turbina, y  $\Phi_S$  (rad) es el ángulo de dispersión acimutal (transmisor-turbina-receptor).

El diagrama del factor de dispersión ideal se muestra en la Figura 6.3.

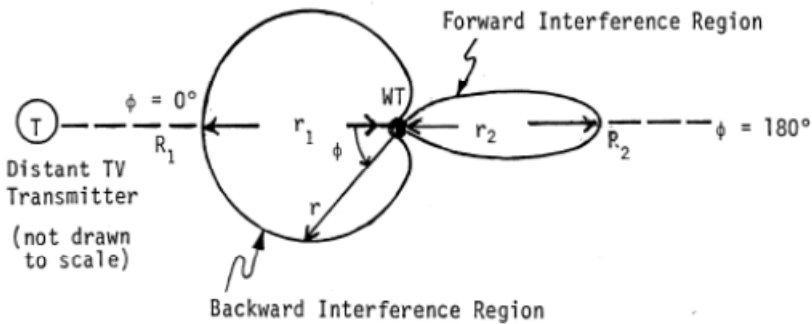


Figura 6.3. Geometría del factor de dispersión ideal según Sengupta [40]

### Eficiencia de dispersión del aspa $\eta_s$

A partir de pruebas de laboratorio realizadas en una cámara anecoica con un modelo de aerogenerador a escala y usando señales de microondas, se obtuvieron las siguientes expresiones empíricas que relacionan la eficiencia de dispersión del aspa con su forma aerodinámica, material y el ángulo de torsión total del aspa desde la base hasta la punta (*twist*):

$$\eta_s = \eta_A \eta_M \exp(-2,30\Delta\beta) \quad (6.10)$$

$$\eta_A = 0,80 \quad (6.11)$$

$$\eta_M = \begin{cases} 1,00 & \text{para aspas metálicas} \\ 0,41 & \text{para aspas no metálicas} \end{cases}$$

Donde  $\eta_A$  es el factor de forma aerodinámica,  $\eta_M$  es el factor de material y  $\Delta\beta$  (*rad*) es el ángulo de torsión total del aspa desde la base hasta la punta (*twist*).

Según este informe, la protección para rayos que se introduce dentro de las aspas no metálicas en forma de cable metálico puede incrementar su eficiencia de dispersión hasta aproximadamente la eficiencia equivalente de un aspa completamente metálica.

### Número efectivo de aspas $B_E$

El parámetro  $B_E$  tiene en cuenta el hecho de que las aspas del rotor de un aerogenerador están dispuestas de manera que cuando un aspa está en la posición de máxima dispersión, las otras no lo están.

Este parámetro depende del modelo de aerogenerador en estudio (número de palas, etc.) y presenta un límite superior dado por:

$$B_E \leq B_{E,\max} = \lambda R / A_p \quad (6.12)$$

Donde  $R(m)$  es el radio del rotor.

Utilizando este límite superior y por lo tanto maximizando el número efectivo de palas, el factor de dispersión ideal de la Ecuación (6.9) se puede expresar como:

$$Z_I = \eta_S \left( \frac{\lambda R}{A_P} \right) \frac{A_P}{\lambda \zeta} \cos(k\phi_S) = \frac{\eta_S D}{2 \zeta} \cos(k\phi_S) \tag{6.13}$$

$$k = \begin{cases} 0,5 & -0,8\pi \leq \Phi_S \leq 0,8\pi \text{ (Backward Zone)} \\ 2,0 & 0,8\pi \leq \Phi_S \leq 1,2\pi \text{ (Forward Zone)} \end{cases}$$

donde  $D$  (m) es el diámetro del rotor.

### 1.4 Modelo del Departamento de Investigación de BBC

El modelo desarrollado por el Departamento de Investigación de British Broadcast Corporation (BBC) en [41] utiliza la óptica geométrica para proponer un modelo de reflexión especular en las aspas del aerogenerador. La geometría del trayecto según el modelo de la BBC se observa en la Figura 6.4, donde  $S$  es el transmisor,  $V$  el receptor y  $R$  el aerogenerador.

La mayor amplitud de la señal reflejada se producirá cuando el plano de rotación de las aspas esté orientado de manera que los ángulos de incidencia y reflexión ( $\Phi$ ) son iguales (condición de reflexión especular).

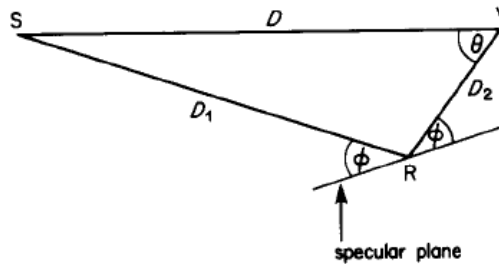


Figura 6.4. Geometría del trayecto según el modelo de BBC [41]

Suponiendo que el receptor se encuentra en campo lejano con respecto a la señal re-radiada por el aerogenerador y que las dimensiones de las palas son grandes en comparación con la longitud de onda (de manera que la potencia de la señal reflejada es independiente de la polarización de la onda incidente), el campo reflejado  $E_r$  (V/m) se puede expresar como:

$$E_r = \frac{EA \sin \phi}{\lambda D_2} \times 10^{-3} \quad (6.14)$$

Donde  $E$  ( $V/m$ ) es el campo eléctrico de la onda incidente,  $A$  ( $m^2$ ) es el área de la pala,  $\lambda$  ( $m$ ) es la longitud de onda,  $D_2$  ( $km$ ) es la distancia entre la turbina y el receptor.

Se puede observar que la expresión anterior se hace cero cuando  $\phi$  se hace cero. En esta situación, el transmisor y el aerogenerador estarían en línea, generándose una situación de obstrucción del trayecto transmisor-receptor. Sin embargo, se considera que este efecto será menos significativo en la degradación de televisión que la generación de señales dispersadas con cierto retardo con respecto a la señal directa.

En [41] se menciona también la influencia del mástil del aerogenerador, que dependerá de su tamaño, forma y material. Se propone aproximar esta influencia del mástil mediante un incremento de 3 dB en el campo reflejado  $E_r$ .

## 1.5 Modelo de Van Kats

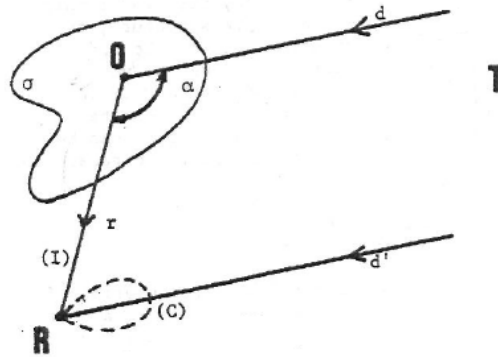
El modelo propuesto por Van Kats y Jager [42] aplica conceptos procedentes de la tecnología radar para determinar la influencia de los aerogeneradores sobre la radiodifusión en la banda de UHF. Aplicar el concepto de sección radar para describir las características de dispersión de un aerogenerador lleva implícita la suposición de que el campo eléctrico incidente sobre la turbina tiene una distribución de fase uniforme y amplitud constante.

La potencia de la señal interferente en un punto  $R$  tras la dispersión en la turbina  $O$  se calcula en base a la Ecuación Radar (ver Figura 6.5). De esta forma, realizando un balance de potencias se calcula la relación  $C/I$  en dB, de la forma:

$$(C / I) = \Delta G - 10 \log \sigma + 20 \log r + 10 \log 4\pi \quad (6.15)$$

Donde  $r$  ( $m$ ) es la distancia recorrida por la señal reflejada desde el aerogenerador hasta el receptor,  $\sigma$  ( $m^2$ ) es la sección radar (RCS) del aerogenerador, y  $\Delta G$  ( $dB$ ) es la discriminación de la antena receptora en el ángulo de recepción.





**Figura 6.5. Geometría de reflexión para el cálculo de C/I de Van Kats [42]**

Esta expresión supone que la distancia entre la turbina y el receptor  $r$  es pequeña en comparación con la distancia entre el transmisor y la turbina  $d$  ( $d \approx d'$ ).

Bajo esta misma suposición, se puede obtener el retardo  $\tau$  ( $\mu s$ ) de la señal dispersada (I) con respecto a la señal deseada (C) en función del ángulo  $\alpha$  (ver Figura 6.5).

$$\tau = \frac{(1 + \cos \alpha)r}{300} \quad (6.16)$$

Para calcular el área afectada por la interferencia de la turbina, se propone realizar dos pasos.

- En un primer paso, se obtiene un *área de coordinación* considerando el caso peor (área máxima de influencia): expresión pesimista de la sección radar que caracteriza la dispersión en la turbina y antena de recepción omnidireccional.

El caso peor de sección radar del aerogenerador se obtiene considerando una chapa rectangular con un área  $A$  igual al área efectiva de la pala del aerogenerador, con una variación en función del ángulo  $\alpha$  según la expresión:

$$\sigma(\alpha) = \left[ \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2 \left( \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \right] \quad (6.17)$$

Donde  $\lambda$  (m) es la longitud de onda y  $A$  ( $m^2$ ) es el área efectiva de la pala del aerogenerador.

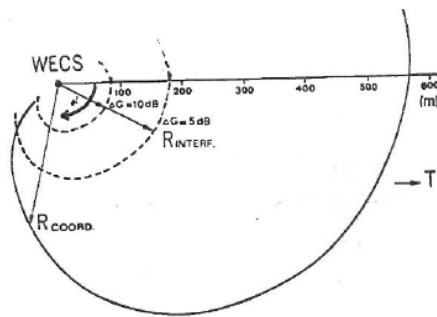
Sustituyendo la expresión de sección radar dada por la Ecuación (6.17) en la Ecuación (6.15) y considerando la situación más desfavorable en la cual la antena

receptora es omnidireccional ( $\Delta G=0$  dB), se obtiene una expresión en la cual la relación portadora interferencia ( $C/I$ ) es independiente de la posición del receptor en el plano ( $R(r, \alpha)$ , ver Figura 6.5). Teniendo en cuenta que dado un determinado criterio de máxima degradación admisible de la calidad, se define una relación portadora interferencia mínima  $C/I_{req}$  necesaria para cumplir ese requisito de calidad, el radio  $r$  que limita el *área de coordinación* viene dado por la Ecuación (6.18):

$$20 \log(r) = (C / I)_{req} + 10 \log \left[ \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2 \left( \frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \right] - 10 \log 4\pi \quad (6.18)$$

- Si se dispone de medidas de sección radar del aerogenerador, se puede obtener en un segundo paso el *área de interferencia* que tenga en cuenta además la discriminación de la antena de recepción  $\Delta G$  y se aproxime más a la situación real.

En ese caso, la expresión de sección radar de la Ecuación (6.17) incluida en la Ecuación (6.18) se sustituye por valores experimentales de sección radar para calcular el radio  $r$  del *área de interferencia*. Ejemplos de *área de coordinación* y *área de interferencia* se muestran en la Figura 6.6.



**Figura 6.6. Zonas de coordinación e interferencia según Van Kats [42]**

El modelo propone también un factor de atenuación adicional  $\Delta A$  para incluir efectos de difracción o reflexión en la superficie del terreno.

En la referencia [42] donde se presenta el modelo, se incluyen también algunas consideraciones a nivel teórico sobre la influencia de los aerogeneradores sobre el servicio de televisión, así como diversas conclusiones obtenidas a partir de medidas de sección radar de un modelo de aerogenerador concreto:

- Van Kats determina que es necesario modelizar no sólo las reflexiones en las palas, sino que se requiere determinar las características de reflexión de la turbina en su conjunto.
- De la medida experimental de sección radar llevada a cabo en el estudio, concluye que lo que contribuye sustancialmente a la señal reflejada por el aerogenerador no es la superficie de la pala, sino el cable metálico que lleva en su interior. Además la magnitud de las reflexiones debidas a la góndola es del orden de las reflexiones procedentes de una pala.
- Además, destaca el carácter dinámico de la sección radar debido a la rotación de las palas, de manera que las señales reflejadas tienen un comportamiento periódico en función de la posición de éstas. También se comprueba que la variación de sección radar es mayor a frecuencias más bajas.

Sin embargo, estos resultados no se ven reflejados en el modelo propuesto, ya que en caso de no disponer de medidas de sección radar del aerogenerador que se desee estudiar, el *área de coordinación* que calcula el modelo ofrece una aproximación pesimista basada en la sección radar de una chapa rectangular metálica.

Además, el modelo hace referencia a un *área efectiva* de la pala del aerogenerador, pero ésta no se define ni se sugiere cómo calcularla. Dado que en el artículo se referencia el trabajo de Sengupta [38], se supone que el concepto de *área efectiva* corresponde al utilizado por éste en algunos estudios anteriores [38]-[39], en los que se ofrecen valores de áreas equivalentes para algunos modelos de aerogeneradores en función de la señal que dispersan sus palas. El *área efectiva* de dispersión se relaciona con el área física por un parámetro de *eficiencia de dispersión* ( $\eta$ ):

$$A = \eta \cdot A_p \quad (6.19)$$

Donde  $A$  ( $m^2$ ) es el área efectiva de la pala del aerogenerador,  $\eta$  es la eficiencia de dispersión y  $A_p$  ( $m^2$ ) es el área proyectada de la pala del aerogenerador.

En [39], se indica que para el caso de aspas fabricadas en fibra de vidrio, la señal sería reflejada por los pararrayos de metal incluidos en las palas, siendo la eficiencia de dispersión  $\eta=0,27$ .

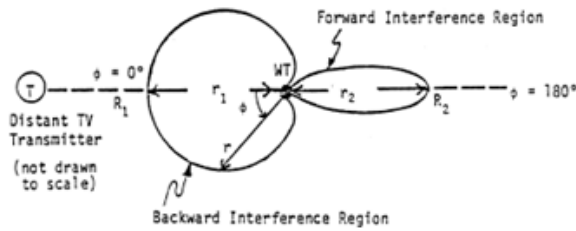
## 1.6 Comparativa de los modelos teóricos de dispersión. Principales limitaciones.

En este apartado primero se realiza una comparativa entre los modelos propuestos por Sengupta, el Departamento de investigación de la BBC y Van Kats. Posteriormente se presentan las carencias que limitan la precisión de los modelos teóricos para determinar situaciones de posible degradación en la banda de UHF.

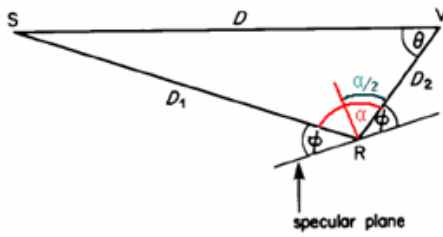
### 1.6.1 Comparativa entre los modelos Sengupta, BBC y Van Kats

Realizando una sencilla comprobación, se puede demostrar que los tres modelos presentados son matemáticamente iguales en su dependencia con la geometría existente entre transmisor-turbina y receptor, más concretamente con el ángulo de acimut  $\alpha$  formado por las líneas que unen transmisor-turbina y turbina-receptor, debido a que todos consideran la condición de reflexión especular como caso peor de dispersión.

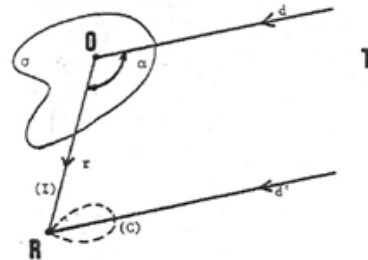
La Figura 6.7 muestra las geometrías del trayecto propuestas por cada uno de los autores:



Sengupta



BBC



Van Kats

Figura 6.7. Relación entre las geometrías de los modelos propuestos por Sengupta (arriba), BBC (abajo izda.) y Van Kats (abajo dcha.)

De la expresión del factor de dispersión ideal propuesto por Sengupta en la Ecuación (6.9), se puede derivar que el campo eléctrico reflejado por el aerogenerador será proporcional a  $\cos(0,5 \cdot \Phi_s)$  en la zona de *backward scattering*, lo que coincide con  $\cos(\alpha/2)$  según la nomenclatura de ángulos utilizada por Van Kats.

Por otra parte, el modelo de la BBC plantea un campo eléctrico reflejado por el aerogenerador que es directamente proporcional a  $\sin(\Phi)$ , según la Ecuación (6.14). Tal y como se puede observar en la Figura 6.7,  $\sin(\Phi)$  es igual al  $\cos(\alpha/2)$ , por ser estos ángulos complementarios.

Para convertir la dependencia con el ángulo  $\alpha$  de términos de campo eléctrico a términos de potencia hay que elevar al cuadrado, de manera que la potencia reflejada por el aerogenerador en ambos casos es proporcional a  $\cos^2(\alpha/2)$ .

Teniendo en cuenta la relación trigonométrica

$$1 + \cos(2\beta) = 2 \cdot \cos^2(\beta) \quad (6.20)$$

La potencia reflejada por el aerogenerador según los modelos de Sengupta y el Departamento de Investigación de la BBC:

$$P_r \propto \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1 + \cos\left(2 \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{2} = \frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \quad (6.21)$$

Lo cual coincide con la dependencia de la potencia reflejada por el aerogenerador con el ángulo  $\alpha$  según el modelo de Van Kats (ver Ecuación (6.17)).

### 1.6.2 Principales limitaciones de los modelos teóricos de dispersión

Los modelos de dispersión teóricos presentan una serie de limitaciones que han de tenerse en cuenta en el posterior análisis empírico de los errores de predicción que proporcionan. Tal y como se ha demostrado en la sección anterior, algunos de los modelos teóricos de dispersión se basan en las mismas suposiciones, y por tanto, comparten algunas limitaciones [109].

#### Variabilidad debida a la rotación de las aspas

Las referencias de Van Kats, Sengupta y el Departamento de Investigación de la BBC incluyen medidas de las señales dispersadas al rotar las aspas. Algunas de estas señales dispersadas muestran variaciones de varios dB [41],[45],[99]. La

nueva Rec. UIT-R BT.1893 también establece que el patrón de dispersión cambia al menos 10 dB debido a la rotación de las aspas [104]. En la Rec. UIT-R BT.805 se comenta también la necesidad de estudiar las propiedades temporales de la degradación [44]. Sin embargo, a efectos prácticos, todos los modelos son estáticos, es decir, no modelan las variaciones de la señal debidas a la rotación de las aspas.

#### **Variabilidad debida a la orientación del rotor**

El modelo incluido en la Rec. UIT-R BT.805, y los modelos propuestos por el Departamento de Investigación de la BBC, Van Kats y Sengupta, establecen condiciones de caso peor con respecto a la orientación del rotor. Todos ellos asumen que la dispersión de señal será mayor cuando el plano de rotación de las aspas se orienta de tal manera que el receptor se encuentra en la situación de reflexión especular. Dado que la góndola gira para orientarse en función de la dirección del viento, esta condición sólo se dará durante ciertos momentos de tiempo (lo que no significa que cuando no se cumple esta condición no haya señal reflejada por el aerogenerador en otras direcciones). Únicamente el modelo incluido en la Rec. UIT-R BT.1893 es dependiente de la orientación del rotor.

#### **Contribución del mástil a la señal dispersada**

La importancia del mástil en la señal dispersada por el conjunto del aerogenerador podría ser, al menos, comparable con la contribución de las aspas, según recogen diversos estudios [35],[41],[110]. Esto queda confirmado según estudios recientes llevados a cabo a frecuencias más altas (orientados a servicios de radar) que han demostrado también que un porcentaje significativo de la señal dispersada por la turbina se debe al mástil [111],[112]. Las simulaciones de óptica física recogidas en el Capítulo 5 – Apartado 2 corroboran la importancia del mástil en la señal dispersada por el aerogenerador [93].

Sin embargo, todos los modelos propuestos se basan únicamente en el área de las aspas. En la referencia de la BBC se propone aproximar esta influencia del mástil mediante un incremento de 3 dB en el campo reflejado [41], independientemente del tamaño y material del mástil. La Rec. UIT-R BT.1893 incluye una nota sobre la importancia del *backscattering* estático debido al mástil metálico, pero no incluye ningún método para calcularlo [104].

### Simplificación en diseño y materiales de las aspas

Tal y como se ha comentado, los modelos propuestos no sólo se basan únicamente en la dispersión de las aspas, sino que además lo hacen basándose en modelos simplificados de las mismas.

Los modelos propuestos por la BBC, Van Kats y Sengupta se basan en la dispersión de la señal sobre una pala rectangular con orientación vertical [41],[42],[99]. La Rec. UIT-R BT.805 no justifica el valor constante de -10 dB del factor de dispersión en la zona de dispersión general. Sin embargo, el análisis de la misma llevado a cabo en [113] concluye que también se basa en una pala rectangular orientada verticalmente. La Rec. UIT-R BT.1893, con intención de aproximarse más al diseño actual de las aspas de los aerogeneradores, asume una forma triangular y plana [102]. Esta modificación con respecto a modelos anteriores no parece ser suficiente para reflejar el comportamiento de la señal dispersada sobre las aspas actuales, de complejo diseño aerodinámico. Más concretamente, el considerar las aspas como una superficie plana supone que la dispersión va a ser claramente directiva en la dirección especular, lo cual no corresponde con los resultados de las estimaciones de la señal dispersada mediante el modelo de óptica física [93].

A pesar de que algunos de los modelos aplican parámetros de eficiencia de dispersión para tener en cuenta que el material de las aspas no es metálico, el valor de estos coeficientes no está claro. Por ejemplo, el modelo propuesto por Sengupta [99], a pesar de ser el más completo en cuanto a los diversos factores que considera, establece parámetros empíricos como el número efectivo de aspas  $B_E$  y la eficiencia de dispersión del aspa  $\eta_s$  a partir de pruebas realizadas con modelos de aerogenerador antiguos, que no se corresponden con los modelos actuales en cuanto a número de aspas, forma y materiales de las mismas, etc. La Rec. UIT-R BT.1893 incluye una nota en la que se indica que las palas típicas, al ser de fibra de vidrio u otros materiales compuestos, dispersarán entre 6 y 10 dB menos que las aspas metálicas [104].

### Variabilidad del patrón de dispersión en el plano vertical

Los modelos de dispersión se definen exclusivamente en el plano horizontal, sin tener en cuenta el efecto de la diferencia de elevación entre transmisor, aerogenerador y receptor. Sin embargo, las simulaciones teóricas indican que el patrón de dispersión del aerogenerador es directivo en el plano vertical, lo que podría ser de especial relevancia cuando el parque eólico se encuentra en una cota superior a la de los puntos de recepción [93].

### Efectos de campo cercano

Todos los modelos suponen que el transmisor se encuentra a gran distancia con respecto del aerogenerador, es decir, que el aerogenerador se encuentra en la región de campo lejano del transmisor. La distancia de campo lejano  $R_0$  viene dado por la Ecuación (6.22) [114],[115]

$$R_0 = \frac{2L^2}{\lambda} \quad (6.22)$$

Donde  $L$  es la dimensión lateral del objeto y  $\lambda$  es la longitud de onda. Tomando como ejemplo un modelo habitual de aerogenerador y una frecuencia de transmisión de 800 MHz, esta distancia sería de aproximadamente 16 km. Para distancias tan grandes, las pérdidas por propagación entre el transmisor y el aerogenerador hacen que la potencia incidente en el aerogenerador se vea muy reducida, y con ello también el posible efecto de la señal dispersada en los servicios de radiocomunicación en esta banda de frecuencias. Por el contrario, las situaciones en las que los aerogeneradores están más próximos a los transmisores son más críticas, por lo que los efectos de campo cercano deberían ser considerados.

### Otras consideraciones

Ha de tenerse en cuenta que los modelos presentados se desarrollaron en una etapa inicial del desarrollo de la industria eólica, de manera que los aerogeneradores han sufrido drásticos cambios desde entonces (ver Figura 6.8). Por ejemplo, Sengupta y Van Kats en [99] y [42] y otros estudios de la época como el recogido en [36], hacen referencia a máquinas bipala, mientras que los modelos actuales son normalmente de tres palas. En [41], se describe la estructura de soporte como una torre de cemento o celosía, mientras que los mástiles actuales son torres tubulares de acero.





**Figura 6.8.** Modelos NASA/DOE MOD-0A 1977-1979 (izq) y NASA/DOE MOD-2 1982 (drcha)

## 2. EVALUACIÓN EMPÍRICA DE LOS MODELOS TEÓRICOS DE DISPERSIÓN

---

Para justificar la necesidad de obtener un nuevo modelo de dispersión, se evalúa la precisión de los modelos teóricos existentes, comparando las estimaciones que proporcionan con las señales procedentes de la campaña de medidas.

En la Sección 2.1 se presenta la selección de medidas utilizada en la comparativa, que se lleva a cabo mediante la herramienta de simulación descrita en la Sección 2.2. El análisis estadístico de los errores de predicción de los modelos se presenta en la Sección 2.3, cuyas conclusiones se resumen en la última sección.

### 2.1 Selección de medidas para la comparativa

La clasificación de los datos tras el procesado permite seleccionar de manera sencilla un conjunto de medidas para la comparativa empírica de los modelos, y dentro de cada una de esas medidas, obtener las señales dispersadas por los aerogeneradores que cumplen los criterios incluidos en el Capítulo 3 - Sección 2.2.

Para la comparativa con los modelos teóricos, se han utilizado las medidas realizadas con señales procedentes de los transmisores de Itelazpi y Abertis-Telecom, dispersadas por uno o varios de los cuatro aerogeneradores más próximos de Oiz I (aerogeneradores A30 a A27). Las razones por las que se han tomado únicamente esas señales son dos. En primer lugar, teniendo en cuenta la distancia existente entre los transmisores y los aerogeneradores, la relación de cotas y las características de los sistemas radiantes de transmisión, estas señales corresponden a los casos en los que la iluminación de los aerogeneradores es más uniforme. En segundo lugar, la elección de los aerogeneradores más próximos al transmisor evita posibles efectos de sombra de unas turbinas sobre otras.

Además, dado que el modelo incluido en la Rec. UIT-R BT.1893 [104] tiene en cuenta la orientación del rotor con respecto al transmisor, se han utilizado sólo aquellas medidas en las que los aerogeneradores se encuentran en funcionamiento normal y rotando sus aspas. Así se puede considerar que el dato de dirección de viento proporcionado por la torre meteorológica del parque eólico corresponde aproximadamente a la dirección perpendicular al plano de rotación de las aspas.

La selección utilizada para la comparativa está compuesta por medidas de las señales dispersadas por los aerogeneradores A30 a A27, en 26 puntos de recepción distintos y con diferentes orientaciones de las aspas, haciendo un total de 339 muestras. Cabe destacar que el número de casos utilizados para validar el modelo de la Rec. UIT-R BT.1893 [104] es menor (234 muestras) debido a que no proporciona estimaciones de señal dispersada en los casos en los que la localización de medida se encuentre en la zona de *forward scattering* determinada por el plano de rotación de las aspas. La Tabla 6.1 recoge el número de muestras que corresponden a cada aerogenerador.

**Tabla 6.1. Distribución de muestras para la comparativa entre los diferentes aerogeneradores**

	A30	A29	A28	A27	TOTAL
<b>Rec. UIT-R BT.1893</b>	40	52	76	66	234
<b>Resto de modelos</b>	64	76	103	96	339

## 2.2 Herramienta de simulación

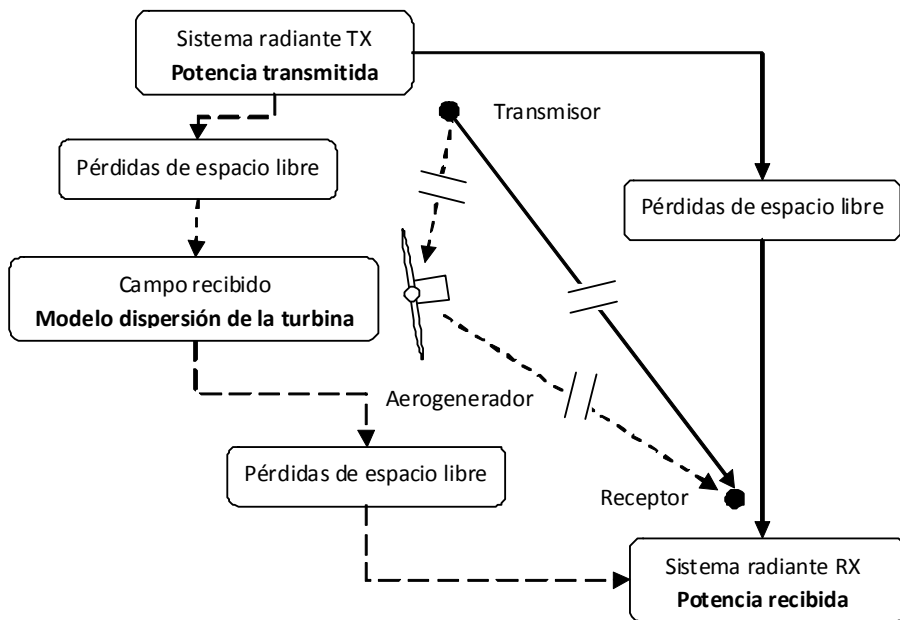
La herramienta utilizada para la aplicación de los modelos descritos en la sección anterior al caso en estudio es software propio desarrollado por el Grupo TSR de la UPV/EHU. Este software, denominado  $Wi^2$ , ha sido diseñado para el análisis de posibles interferencias de un parque eólico sobre diversos servicios de telecomunicaciones (televisión, radioenlaces y radar) [116].

Como soporte para aplicar estos modelos, la herramienta software maneja de forma flexible y eficiente los datos de altimetría de la zona en estudio, que obtiene de una base digital del terreno especificada por el usuario. La aplicación maneja cartografía de gran resolución, permitiendo el uso de diferentes sistemas de coordenadas, y proporciona resultados de forma visual mediante la aplicación Google Earth [117]. La configuración de todos los elementos a incluir en el estudio y sus propiedades se hace a través de una base de datos.

La aplicación implementa los modelos de dispersión del aerogenerador de una manera simplificada, según el esquema de la Figura 6.9.

- Por una parte, se calcula la potencia de la señal deseada en el receptor, en función de los sistemas radiantes de transmisión y recepción y las pérdidas por espacio libre.

- Por otra parte, se calcula la potencia de la señal que llega al aerogenerador en función del sistema radiante de transmisión y las pérdidas por espacio libre. Después se aplica el modelo de dispersión del aerogenerador en función de la posición relativa entre transmisor, aerogenerador y receptor. En el caso de la Rec. UIT-R BT.1893 [104], también es necesario especificar la dirección del viento. Se obtiene por último la potencia dispersada en la ubicación del receptor en función de las pérdidas por espacio libre y las características del sistema radiante de recepción (discriminación por directividad).



**Figura 6.9. Método general de aplicación de los modelos de dispersión**

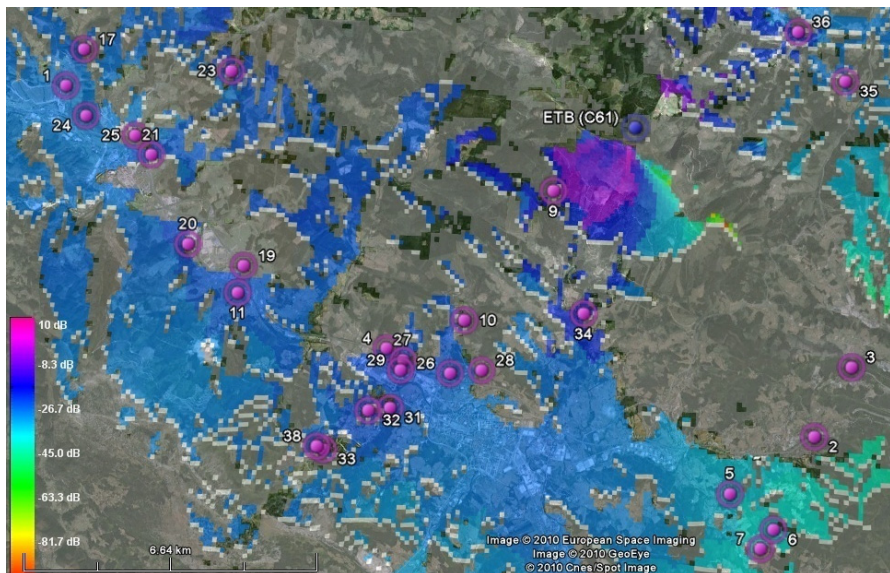
En esta implementación de los modelos no se tienen en cuenta las pérdidas por difracción, lo que podría ser de importancia en caso de que existiera obstaculización en el trayecto directo pero no en el reflejado (o viceversa) [92]. La selección de medidas realizada, imponiendo la visibilidad entre transmisor, aerogenerador y receptor, evita los casos de difracción.

El cálculo de los retardos de las señales directa y reflejada se hace en función de las distancias transmisor-receptor y transmisor-turbina-receptor. En todos los resultados se tiene en cuenta el relieve del terreno, así como la posición exacta de los transmisores y cada uno de los elementos del parque eólico.

Los resultados a comparar con las medidas se dan en forma de relación portadora/interferencia (C/I), es decir, la relación en dB entre la señal directa procedente del transmisor y la señal recibida tras ser dispersada por el aerogenerador. Nótese que esta relación es inversa a la representada en la respuesta impulsional del canal, y por lo tanto de signo opuesto al expresarse en dB.

La herramienta ofrece resultados visuales fácilmente interpretables haciendo uso de la aplicación Google Earth. Por ejemplo, la relación de potencias entre la señal directa y la señal procedente de un aerogenerador según un determinado modelo de dispersión se muestra como un mapa de colores (ver Figura 6.10).

Además de la representación gráfica, la aplicación proporciona los valores de los retardos y de las amplitudes de cada una de las señales reflejadas en los aerogeneradores con relación a la señal directa procedente del transmisor en las localizaciones que previamente se haya indicado (representadas como círculos rosas en la Figura 6.10).



**Figura 6.10.** Ejemplo de resultado proporcionado por la herramienta Wi<sup>2</sup>

## 2.3 Estudio del error de predicción de los modelos de dispersión

Para realizar la evaluación empírica de los modelos teóricos de dispersión, se realiza un análisis estadístico de las diferencias entre las relaciones  $C/I_{pred}$  proporcionadas por la herramienta de simulación frente a las relaciones  $C/I_{meas}$  obtenidas a partir de las respuestas impulsionales del canal de la señal DVB-T medida. Las relaciones  $C/I$  representan en ambos casos el nivel de potencia de la señal reflejada por cada uno de los aerogeneradores, normalizada respecto de la potencia del rayo directo.

Dado que la relación  $C/I$  obtenida a partir de las medidas presenta variaciones debidas al movimiento de las aspas, es necesario utilizar valores estadísticos que permitan caracterizar cada medida y compararla con el valor obtenido en la simulación correspondiente. Para ello, se toma la mediana como estadístico representativo del valor central de la medida.

El error de predicción  $\varepsilon$  se calcula, por tanto, como la diferencia entre la mediana de la relación  $C/I$  medida en la respuesta impulsional y las relaciones  $C/I$  estimadas según los diferentes modelos, de acuerdo con la Ecuación (6.23). De esta manera, un error con signo positivo indica que el valor de  $C/I$  calculado a partir de la medida es mayor que el valor de  $C/I$  proporcionado por el modelo, es decir, que el modelo es pesimista (la degradación real es menor que la estimada por el modelo). Por el contrario, un error con signo negativo significa que el valor de  $C/I$  obtenido de la medida es menor que el valor estimado por el modelo, el cual se considerará optimista por estimar a la baja la contribución de la señal dispersada.

$$\varepsilon = median \{ C / I_{meas} \} - C / I_{pred} \quad (6.23)$$

La caracterización estadística del error de predicción se realiza mediante el cálculo del valor medio, la desviación estándar y los percentiles 5 y 95. En el cálculo del valor medio del error de predicción de un determinado modelo se utiliza además el módulo de la diferencia entre medida y estimación, para evitar falsas compensaciones debidas a la existencia de errores con signo positivo y negativo. La desviación estándar es una medida de centralización o dispersión del error con respecto a su media. Los percentiles 5 y 95 indican los límites inferior y superior entre los que se encuentran el 90% de las muestras, y son los que determinan el carácter pesimista u optimista del modelo de dispersión. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2. Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión**

	Error medio	Error medio (módulo)	Desviación estándar	Percentiles 5 / 95
<b>Rec. UIT-R BT.805</b>	5,86 dB	7,19 dB	6,66 dB	-4,80 / 17,08 dB
<b>BBC</b>	14,06 dB	14,14 dB	6,66 dB	4,23 / 25,24 dB
<b>Van Kats</b>	2,68 dB	5,62 dB	6,66 dB	-7,15 / 13,88 dB
<b>Sengupta</b>	-5,62 dB	7,24 dB	6,66 dB	-15,52 / 5,64 dB
<b>Rec. UIT-R BT.1893</b>	-31,75 dB	33,63 dB	24,31 dB	-72,06/ 9,38 dB

Las principales conclusiones que se derivan de los resultados de la comparativa son las siguientes:

- El modelo que presenta un menor error de predicción es el propuesto por Van Kats, seguido por los modelos de Sengupta y de la Rec. UIT-R BT.805. Los modelos propuestos por Van Kats y Sengupta utilizan el concepto de área efectiva de dispersión en lugar del área física de la pala, lo que hace que sean menos pesimistas que el modelo de la BBC. En el caso de la Rec. UIT-R BT.805, el error viene determinado por el valor constante de la amplitud relativa en la zona de dispersión general (-10 dB), que no se justifica teóricamente.
- Se puede comprobar que los modelos de la BBC, Van Kats y Sengupta presentan la misma dispersión en el error de predicción (6,66 dB de desviación estándar y aproximadamente 21 dB de diferencia entre los percentiles 5 y 95 de error). Esto es debido a que los tres modelos son matemáticamente iguales en la zona de backscattering en cuanto a su dependencia con la geometría relativa entre transmisor, aerogenerador y receptor, tal y como se ha comentado anteriormente.
- El modelo incluido la Recomendación de la UIT-R BT.1893 es el que presenta mayores errores de predicción, al estimar señales dispersadas por los aerogeneradores muy por debajo de lo obtenido a partir de las medidas. La razón de esto radica en que el nuevo modelo plantea un factor de dispersión de naturaleza estrictamente especular mediante un término  $\text{sinc}^2$ , el cual contiene un lóbulo muy directivo orientado en la dirección de reflexión especular. Según esta expresión, la señal dispersada fuera del estrecho lóbulo principal alrededor de la dirección de reflexión especular es prácticamente nula, lo cual no coincide con lo observado en las medidas. A esto habría que añadir que la propia propuesta añade que si las aspas están compuestas de fibra de vidrio u otro tipo de materiales compuestos, el nivel de señal

dispersada sería entre 6 y 10 dB inferior, con lo que el error de predicción sería aún mayor [108].

El modelo incluido en la Recomendación BT.805 de la UIT y los modelos propuestos por el Departamento de Investigación de la BBC, Van Kats y Sengupta ofrecen estimaciones de la señal dispersada por los aerogeneradores considerando el caso peor de orientación del rotor y posición de las aspas para cada punto de recepción. Los resultados obtenidos demuestran que las estimaciones difieren de los valores obtenidos a partir de los datos empíricos y por lo tanto no proporcionan una predicción realista de las señales dispersadas por las turbinas del parque eólico. A continuación se estudian más detalladamente algunos aspectos que podrían influir en los errores de predicción presentados: distribución del error por aerogenerador, influencia de la variabilidad debida a la rotación de las aspas, influencia de la variabilidad debida a la orientación del rotor y aspectos no considerados en los modelos teóricos de dispersión.

### 2.3.1 Distribución del error por aerogenerador

La Tabla 6.3 muestra los errores medios de predicción divididos por aerogenerador. Se puede observar que los errores medios de cada modelo son similares para todos los aerogeneradores, por lo que se puede concluir que no parece significativa la existencia de efectos acumulativos de unos aerogeneradores sobre otros.

**Tabla 6.3. Distribución del error medio de predicción para cada uno de los aerogeneradores**

	A30	A29	A28	A27
<b>Rec. UIT-R BT.805</b>	7,70 dB	8,04 dB	6,42 dB	6,99 dB
<b>BBC</b>	14,85 dB	15,90 dB	13,01 dB	13,49 dB
<b>Van Kats</b>	6,20 dB	5,59 dB	5,12 dB	5,79 dB
<b>Sengupta</b>	7,14 dB	5,69 dB	7,86 dB	7,87 dB
<b>Rec. UIT-R BT.1893</b>	35,75 dB	32,42 dB	34,21 dB	32,64 dB

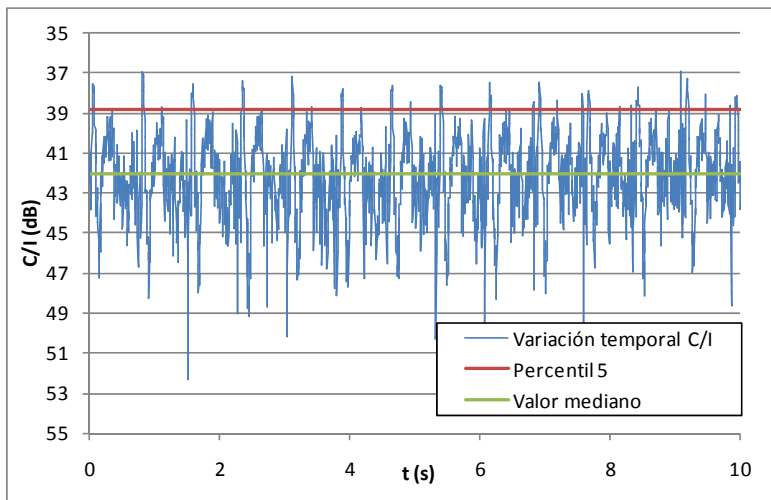
### 2.3.2 Influencia de la variabilidad debida a la rotación de las aspas

Como se ha comentado en el principio del apartado, las medidas de señales dispersadas tienen variaciones debido a la rotación de las aspas, por lo que es



necesario tomar un valor representativo de la variación temporal de la medida de C/I para poder compararlo con los resultados de las simulaciones.

Dado que todos los modelos consideran una situación de caso peor de dispersión en relación a la posición de las aspas, se toma el percentil 5 de la medida como valor representativo del límite inferior de C/I (el valor mínimo de C/I supone el valor máximo de dispersión y por tanto el caso de mayor nivel de interferencia). La Figura 6.11 muestra un ejemplo de variación temporal de C/I para el aerogenerador A29, junto la representación del valor mediano y percentil 5 seleccionados para la caracterización de la medida.



**Figura 6.11. Ejemplo de variación temporal de C/I, mediano y percentil 5**

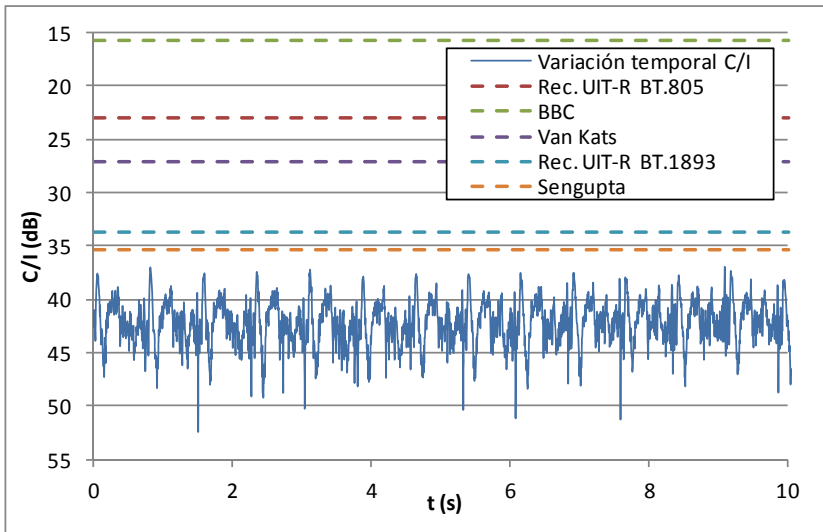
La caracterización estadística de los errores de predicción obtenidos al utilizar el percentil 5 como valor representativo del límite inferior de C/I medida se muestra en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4. Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión respecto al límite inferior de la medida de C/I**

	Error medio (módulo)	Desviación estándar
<b>Rec. UIT-R BT.805</b>	5,80 dB	6,01 dB
<b>BBC</b>	12,23 dB	5,97 dB
<b>Van Kats</b>	4,76 dB	5,97 dB
<b>Sengupta</b>	8,15 dB	5,97 dB
<b>Rec. UIT-R BT.1893</b>	35,22 dB	24,09 dB

Mediante la comparación de los resultados recogidos en la Tabla 6.2 y la Tabla 6.4, se puede observar que las diferencias entre los errores de predicción medios de cada modelo en caso de tomar el valor mediano o el percentil 5 como valor representativo de la relación C/I de la medida son pequeñas, sobre todo en comparación con los altos valores de desviación estándar obtenidos. En cualquier caso, los errores de predicción son en ambos casos considerables.

Como ejemplo, se muestra la variación temporal de la misma medida de C/I representada en la Figura 6.11 junto con los resultados de las simulaciones de los modelos teóricos de dispersión. En la figura se puede observar que ninguno de los valores proporcionados por los modelos coincide con la medida de C/I, a pesar de que ésta presenta un rango de variaciones mayores a 10 dB.

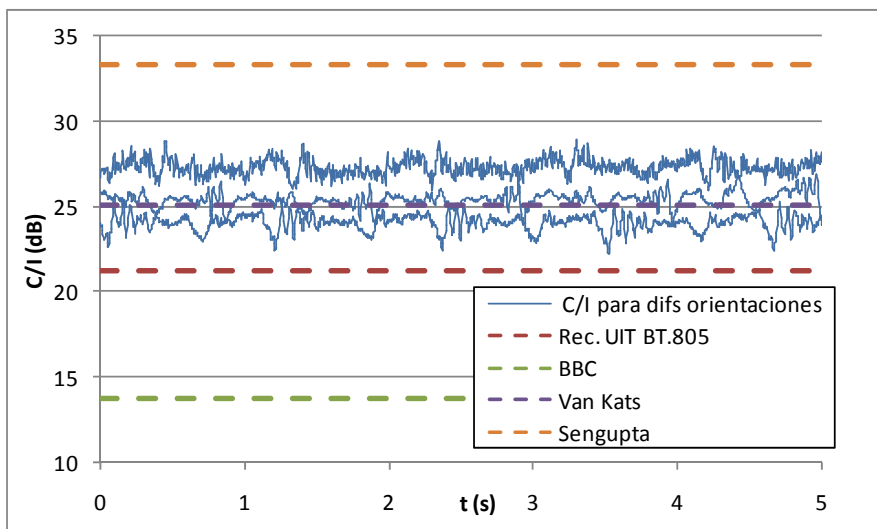


**Figura 6.12. Ejemplo de variación temporal de C/I y resultados de las simulaciones de los modelos**

Por lo tanto, la selección de un valor representativo de la medida de C/I no parece un factor significativo en los altos errores de predicción obtenidos. No obstante, este hecho no significa que la variabilidad debida a la rotación de las aspas no deba de ser contemplada en un modelo de canal más completo, ya que las medidas demuestran que la rotación de las aspas genera variaciones de gran amplitud en intervalos de pocos milisegundos. Además, se ha demostrado que las variaciones de esta naturaleza podrían tener una influencia importante en el funcionamiento de los ecualizadores de los receptores [49].

### 2.3.3 Influencia de la variabilidad debida a la orientación del rotor

La Figura 6.13 muestra tres medidas de relación C/I captadas en la misma ubicación de receptor para un mismo aerogenerador con tres orientaciones del rotor diferentes. En la figura se puede observar que los cambios en la orientación del rotor suponen diferencias de varios dB en las relaciones C/I de las medidas, mientras que los cuatro modelos mencionados ofrecen una única estimación, independiente del estado del aerogenerador. El error medio de estos cuatro modelos disminuiría ajustando los parámetros de área (o área efectiva), pero en cualquier caso seguiría existiendo una desviación del error alta debido a no considerar diferencias en la orientación de la turbina.

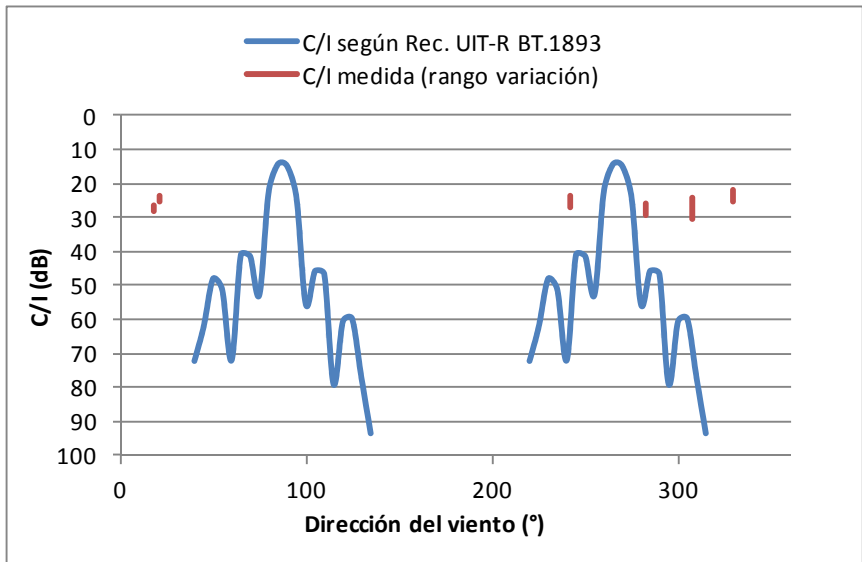


**Figura 6.13. Medidas de C/I para diferentes orientaciones del rotor de un mismo aerogenerador en un mismo punto de recepción y resultados de las simulaciones de los modelos**

De los modelos presentados, el único que considera la orientación del rotor es el incluido en la Recomendación UIT-R BT.1893. Sin embargo, como se ha comentado, el modelo propone un patrón de dispersión muy directivo en la dirección de reflexión especular, mientras que en otras direcciones la señal dispersada es prácticamente nula.

La Figura 6.14 muestra la variación de C/I debida al aerogenerador A30 estimada según el modelo de la Recomendación UIT-R BT.1893 para el punto de recepción 4 en función de la dirección del viento. Se considera que el plano de rotación de las aspas es perpendicular a la dirección del viento. En la figura

también se representan las medidas de C/I correspondientes al aerogenerador A30 en ese punto de recepción. En concreto, se representan los rangos máximos de las variaciones debidas a la rotación de las aspas para la orientación de rotor correspondiente.



**Figura 6.14.** Simulaciones de C/I debidas al A30 según el Rec. UIT-R BT.1893 para el punto de recepción 4 en función de la dirección del viento

Dado que el modelo no considera la posición de la nacelle con respecto a las aspas, el valor estimado depende de la dirección del viento pero no del sentido del mismo (es decir, los valores son iguales si el viento tiene dirección este que oeste, por ejemplo). Los rangos de la gráfica que no presentan valores corresponden con situaciones en las que el receptor se encontraría en la zona de *forward scattering* de las aspas.

Se puede observar que en todos los casos el modelo proporciona valores de C/I mayores que lo obtenido en las medidas, lo que supone una estimación optimista que subestima la magnitud de las señales dispersadas.

Además se puede comprobar que, a pesar de que las medidas difieren al variar la orientación del rotor (tanto en valor mediano como en amplitud de las oscilaciones debidas a la rotación de las aspas), estas variaciones no parecen tener un comportamiento especular tan marcado como el definido por el modelo.

Las razones por las cuales las variaciones debidas a la orientación del rotor no son tan pronunciadas como las propuestas en el modelo podrían ser dos: por una parte, la estructura de las aspas de los aerogeneradores actuales es más compleja que la aproximación de pala triangular plana y metálica, por lo que la dispersión podría no tener una naturaleza tan estrictamente especular con respecto al plano de rotación; y, por otra parte, el modelo despreja la aportación del mástil en el nivel de señal dispersada, cuando podría ser al menos comparable al nivel de dispersión debido a las aspas, siendo, además, estático e independiente de la orientación del rotor.

Señalar también que tres de las medidas corresponden a la zona de *forward scattering* de las aspas, en la que el modelo no define cómo calcular la señal dispersada. Sin embargo, en estas tres situaciones concretas de medida, dado el nivel de C/I (inferior a 30 dB) y el retardo de la señal dispersada, no se cumpliría el criterio de calidad para recepción de televisión analógica incluido en la Recomendación UIT-R BT.805. Es decir, se puede comprobar que el modelo propuesto no ofrece estimaciones de señal dispersada en algunas situaciones en las que las medidas demuestran que habría posibilidad de interferencia.

## 2.4 Conclusiones

La evaluación empírica de los modelos demuestra que estos no ofrecen estimaciones realistas de la señal dispersada por los aerogeneradores, tal y como reflejan los altos errores medios de predicción (de 6 dB en Sengupta a 32 dB en la Rec. UIT-R BT.1893) y valores de desviación estándar (de 6 dB a 24 dB) obtenidos.

Estos errores de predicción se deben a una serie de limitaciones que conforman los motivos de la falta de precisión en las estimaciones de señal dispersada. Algunas de estas limitaciones son comunes a todos los modelos, mientras que otras son específicas de alguno de ellos:

- Ningún modelo considera la variación del factor de *scattering* en el plano vertical, debido a la diferencia relativa de cotas entre transmisor, aerogenerador y receptor. Esta diferencia podría ser importante, por ejemplo, cuando transmisor y aerogenerador se encuentran a la misma altura pero el receptor en una cota inferior (como es el caso del parque eólico analizado).
- A pesar de que en algunos estudios [41],[35] se comenta la notable influencia que podría tener el mástil sobre la señal dispersada, ninguno de los modelos contempla su contribución. De hecho, actualmente el mástil podría ser la

parte del aerogenerador que más potencia disperse, debido a su tamaño (comparable al de las aspas) y a su composición metálica.

- Los modelos propuestos por la BBC, Van Kats y Sengupta (en la zona de *backscattering*) tienen la misma base teórica y por tanto comparten limitaciones. Todos están basados en suposiciones de condición de reflexión especular y posición de mayor dispersión del aspa, por lo que no ofrecen estimaciones realistas sino aproximaciones de caso peor. Entre ellos, el modelo propuesto por la BBC es el más pesimista al considerar la pala plana, rectangular y metálica, mientras que Van Kats y Sengupta aplican diferentes factores de eficiencia de dispersión, de manera que sus errores medios de predicción son menores. Sin embargo, estos ajustes no pueden conseguir disminuir la dispersión del error (que es igual para los tres modelos), ya que no tienen en cuenta la variabilidad debida a la orientación del rotor y a la rotación de las aspas.
- El modelo incluido en la Rec. UIT-R BT.805, tiene un valor fijo, independiente de las características del aerogenerador y no justificado de -10 dB en la zona de dispersión general, proporcionando resultados claramente pesimistas.
- La Rec. UIT-R BT.1893 pretende solventar algunas de las limitaciones de la Recomendación BT.805, proponiendo un modelo basado en un aspa triangular, cuyo factor de dispersión sea dependiente de la orientación del rotor. Sin embargo, el modelo propone una expresión para calcular este factor de dispersión de naturaleza estrictamente especular, lo cual no se corresponde con lo observado en las medidas realizadas. Además, el modelo no define cómo estimar la señal dispersada en la zona de *forward scattering* (entendiéndose esta zona como el semiplano limitado por el plano de rotación de las aspas y que contiene al transmisor), cuando se ha comprobado que hay casos de este tipo en que el nivel de C/I obtenido es suficientemente bajo como para no superar el criterio de calidad de recepción de televisión incluido en la propia propuesta (relaciones de C/I medidas menores que 25 dB).

Se puede concluir que ninguno de los modelos analizados es lo suficientemente preciso a la hora de estimar la señal dispersada en función de las diferentes condiciones de funcionamiento del aerogenerador, presentando todos ellos carencias importantes como la no consideración de la contribución del mástil o la falta de caracterización de las variaciones de señal dispersada en el plano vertical.

### 3. NUEVO MODELO DE DISPERSIÓN

---

La caracterización del diagrama de dispersión del aerogenerador llevada a cabo en el Capítulo 5 – Apartado 2 demuestra que la señal máxima dispersada se debe fundamentalmente a la contribución del mástil. Sin embargo, todos los modelos teóricos presentados en el Apartado 1 de este capítulo se basan en la dispersión de las aspas exclusivamente.

En el modelo propuesto se opta por buscar una expresión sencilla y genérica que sea aplicable a distintas situaciones de incidencia y observación, y que modele la señal dispersada por el mástil. Tal y como se ha demostrado en el Capítulo 5 – Apartado 2, la teoría de óptica física nos permite caracterizar la señal dispersada por objetos eléctricamente grandes, por lo que la búsqueda bibliográfica se centra en este método.

La geometría de los mástiles actuales se asemeja a un cono truncado formado por diferentes secciones. Las expresiones teóricas de la sección radar de un cono truncado son extremadamente complejas y no son válidas para un modelo de aplicación genérica y fácilmente implementable en un sistema de planificación. Por otra parte, la expresión obtenida para calcular la RCS de un cilindro puede ser utilizada para estimar la RCS de un cono truncado circular sustituyendo el radio del cilindro por el radio medio del cono y la longitud del cilindro por la longitud de la superficie inclinada del cono [101]. Ha de tenerse en cuenta además que los mástiles son conos truncados con poca inclinación. En el caso concreto del modelo G52 de Gamesa [4] instalado en Oiz-I, el mástil, con una altura de 55 m, y una diferencia entre el diámetro inferior y superior de 1 m, tiene una inclinación cercana a 1°. Por tanto, se opta por caracterizar el mástil como un cilindro circular que cumple las condiciones mencionadas anteriormente.

#### 3.1 Cálculo de la sección radar biestática del cilindro

Tras una extensa búsqueda bibliográfica sobre teoría de óptica física aplicada a la estimación de RCS de cilindros [118]-[122], el modelo propuesto se basa en la fórmula propuesta por Siegel en [123].

##### 3.1.1 Modelo de dispersión de Siegel para un cilindro elíptico

Para un cilindro elíptico orientado con respecto al transmisor y al receptor como muestra la Figura 6.15, y siendo las posiciones angulares de transmisor y

receptor  $\phi_t, \theta_t$  y  $\phi_r, \theta_r$  respectivamente, la sección radar se obtiene según la Ecuación (6.24)

$$\sigma(\phi_t, \phi_r, \theta_t, \theta_r) = \frac{a^2 b^2 \lambda |e^{iKDL} - 1|}{\pi D^2 [(Aa)^2 + (Bb)^2]^{3/2}} \{G_1^2 + G_2^2 + G_3^2\} \quad (6.24)$$

Donde  $a$  y  $b$  son los semiejes del cilindro elíptico,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $k$  el número de onda,  $L$  la altura del cilindro y las demás funciones se definen según:

$$G_1 = A(a_y \sin \theta_r \sin \phi_r + a_z \cos \theta_r) - B(a_x \sin \theta_r \sin \phi_r) \quad (6.25)$$

$$G_2 = a_z \sin \theta_r (A \cos \phi_r + B \sin \phi_r) \quad (6.26)$$

$$G_3 = B(a_x \sin \theta_r \cos \phi_r + a_z \cos \theta_r) - A(a_y \sin \theta_r \cos \phi_r) \quad (6.27)$$

$$A = \sin \theta_t \cos \phi_t + \sin \theta_r \cos \phi_r \quad (6.28)$$

$$B = \sin \theta_t \sin \phi_t + \sin \theta_r \sin \phi_r \quad (6.29)$$

$$D = \cos \theta_r + \cos \theta_t \quad (6.30)$$

Siendo  $a_x, a_y$  y  $a_z$  son las componentes cartesianas del vector dirección del campo magnético  $\hat{a}$ .

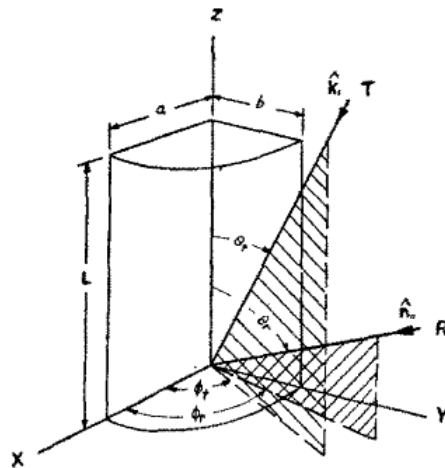


Figura 6.15. Geometría del cilindro elíptico [118]



### 3.1.2 Adaptación del modelo de dispersión de Siegel

Considerando nuestro caso de estudio,  $a=b$  por ser el mástil un cilindro circular. Se supone además polarización horizontal del campo eléctrico, y por tanto, polarización vertical del campo magnético, de manera que el vector magnético  $\hat{\mathbf{a}}$  queda definido por la Ecuación (6.31)

$$\hat{\mathbf{a}} = \cos \phi_i \cos \theta_i \hat{x} + \cos \theta_i \sin \phi_i \hat{y} - \sin \theta_i \hat{z} \quad (6.31)$$

La expresión planteada presenta indeterminaciones en algunos casos de interés, como es el caso de ángulos de transmisión y recepción suplementarios (condición de reflexión especular). Siendo el objetivo disponer de una expresión sencilla y de fácil implementación para herramientas de planificación, se opta por tratar de obtener expresiones separadas para la variación de la RCS en el plano horizontal y vertical, para combinarlas posteriormente.

Así, considerando incidencia frontal al cilindro en el eje x y recepción en el plano horizontal  $\theta_t=90^\circ$  y haciendo el desarrollo matemático pertinente, se obtiene la variación de la sección radar en el plano horizontal XY:

$$\sigma(\phi_r) \Big|_{\theta_t=\theta_r=90^\circ} = kaL^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \quad (6.32)$$

De manera análoga, se busca la variación de la sección radar en el plano vertical YZ suponiendo que el transmisor y el receptor se encuentran en el mismo plano determinado por  $\phi_t = \phi_r = 0^\circ$ :

$$\sigma(\theta_r, \theta_t) \Big|_{\phi_r=0^\circ} = 2kaL^2 \frac{\sin \theta_t^2}{\sin \theta_t + \sin \theta_r} \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{kL(\cos \theta_t + \cos \theta_r)}{2} \right) \quad (6.33)$$

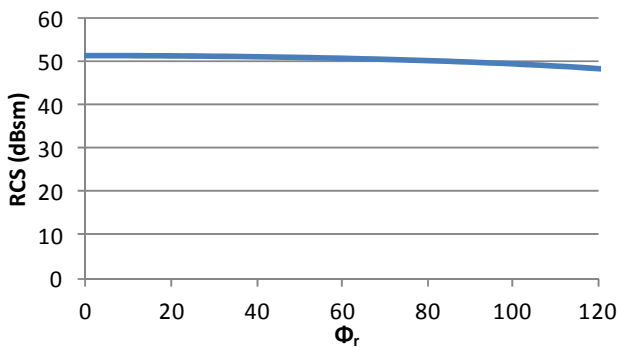
La combinación de las Ecuaciones (6.32) y (6.33) permite obtener una expresión aproximada que caracteriza la variación del diagrama de dispersión del cilindro tanto en el plano horizontal como en el vertical, sin presentar indeterminaciones:

$$\sigma(\phi_r, \theta_r, \theta_t) = 2kaL^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \cdot \frac{\sin \theta_t^2}{\sin \theta_t + \sin \theta_r} \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{kL(\cos \theta_t + \cos \theta_r)}{2} \right) \quad (6.34)$$

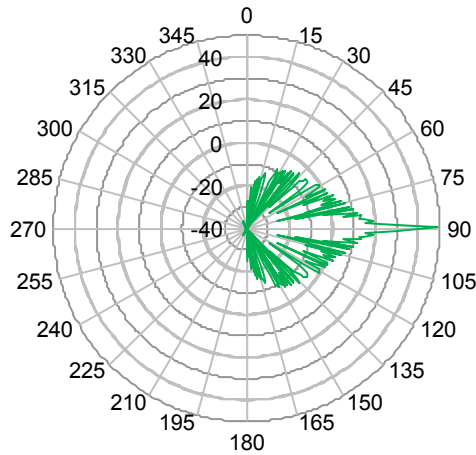
Como se ha comentado anteriormente, la óptica física proporciona peores estimaciones cuando la dirección de observación se aleja de la dirección especular [101]. En la referencia de Siegel no se especifican los límites de aplicabilidad de la expresión proporcionada [123]. Es por ello que para el plano horizontal se aplica el límite que se establece para las esferas, siendo  $|\phi_r| < 120^\circ$  [124], y coincidente con el establecido para cilindros circulares de gran radio en el caso de aplicar el método de óptica geométrica [110]. Para el cálculo del sector de aplicabilidad en el plano vertical, se toma como referencia una placa plana, para la cual la teoría de óptica física proporciona resultados válidos entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$  por encima y por debajo de la dirección de incidencia normal, por lo que tomando el valor más restrictivo, se obtiene el sector  $70^\circ < \theta_t < 110^\circ$  [5],[125],[126]. Además, en el caso de la dispersión biestática, proporciona mayores errores cuando la dirección de recepción se aleja de la dirección especular [5],[127]. Considerando un margen similar al de la condición de la dirección de incidencia, la dirección de recepción podría estar  $20^\circ$  por encima y por debajo de la dirección especular, de manera que  $(160^\circ - \theta_i) < \theta_r < (200^\circ - \theta_i)$  [5],[125].

Las representaciones gráficas de las expresiones dadas por las Ecuaciones (6.32) y (6.33), para una incidencia perpendicular al eje del cilindro ( $\theta_i=90^\circ$ ), y utilizando los valores de frecuencia y dimensiones de nuestro caso en estudio, se muestran en la Figura 6.16 y la Figura 6.17 respectivamente.

Tal y como se puede observar, el diagrama de dispersión en el plano horizontal es prácticamente constante, mientras que el diagrama de dispersión en el plano vertical presenta una gran directividad en la dirección de reflexión especular, al igual que pasaba con las simulaciones del mástil presentadas en el Capítulo 5 – Apartado 2.



**Figura 6.16.** Variación del diagrama de dispersión según la expresión modificada de Siegel en el plano horizontal  $\theta_i=\theta_r=90^\circ$



**Figura 6.17. Variación del diagrama de dispersión (RCS, dBsm) según la expresión modificada de Siegel en el plano vertical  $\phi_r=0^\circ$**

Para validar la aproximación obtenida se realiza una evaluación numérica de la expresión exacta de Siegel y se compara con los valores obtenidos de la expresión aproximada, con objetivo de establecer los rangos de aplicabilidad de la misma.

El error normalizado se evalúa según la Ecuación (6.35)

$$\varepsilon_{RCS} = \frac{RCS_{Siegel} - RCS_{aprox}}{\max(RCS_{Siegel})} \tag{6.35}$$

La evaluación del error se realiza para ángulos de incidencia en elevación  $\theta_t$  desde  $2,5^\circ$  hasta  $90^\circ$  en intervalos de  $2,5^\circ$ . El umbral utilizado para establecer la aplicabilidad de la expresión se fija en un error normalizado del 10%. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5. Límites de error normalizado del 10% de la expresión aproximada de Siegel**

Ángulo de incidencia $\theta_t$	Límite del error normalizado del 10%	
	$\phi_r$	$\theta_r$
$2,5^\circ$	$30^\circ$	$175^\circ$
$5^\circ$	$87,5^\circ$	$172,5^\circ$
$7,5^\circ$	$145^\circ$	$175^\circ$
$10^\circ$	$165^\circ$	$167,5^\circ$
$12,5^\circ$	$162,5^\circ$	$165^\circ$
$15^\circ$	$167,5^\circ$	$162,5^\circ$

17,5°	175°	165°
20°	175°	157,5°
22,5°	175°	155°
25°	175°	157,5°
27,5°	-	-
30°	177,5°	147,5°
32,5°	177,5°	145°
35°	177,5°	147,5°

Los errores correspondientes a ángulos de elevación de incidencia  $\theta_i > 35^\circ$  no se recogen en la tabla por ser despreciables para todos los ángulos de recepción. Es decir, dentro de los límites de aplicabilidad del método de óptica física, los errores cometidos por la expresión simplificada con respecto a la expresión original propuesta por Siegel son siempre despreciables. Por ello, los límites de aplicabilidad del modelo propuesto quedan establecidos por la teoría de la óptica física y no por las simplificaciones realizadas a la expresión original de Siegel, tal y como queda resumido en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6. Aplicabilidad de la expresión simplificada de Siegel**

<b>Incidencia</b>	$70^\circ < \theta_i < 110^\circ$	
<b>Recepción</b>	$-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$	$(160^\circ - \theta_i) < \theta_r < (200^\circ - \theta_i)$

### 3.2 Efectos de campo cercano

La bibliografía sobre aspectos relacionados con RCS es muy amplia, como también lo es la relativa a efectos de campo cercano sobre la sección radar. Se pueden encontrar, por tanto, múltiples referencias que proponen métodos numéricos para calcular la RCS cuando el frente de ondas incidente no es plano, o métodos para convertir medidas de RCS en condiciones de campo cercano en valores de RCS en campo lejano o viceversa [128]-[135].

Sin embargo, de cara a obtener una expresión para su implementación en una herramienta de planificación, se busca un criterio aplicable al modelo desarrollado. En la búsqueda bibliográfica realizada se encuentra el criterio propuesto por Van Lil en [136] y [137], según el cual el tamaño del objeto puede limitarse a un *tamaño de campo cercano* equivalente a la inversa de la distancia de campo lejano. Es decir, la longitud real del mástil, en condiciones de campo

cercano, se vería sustituida por la *longitud de campo cercano* expresada en la Ecuación (6.36)

$$L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}} \tag{6.36}$$

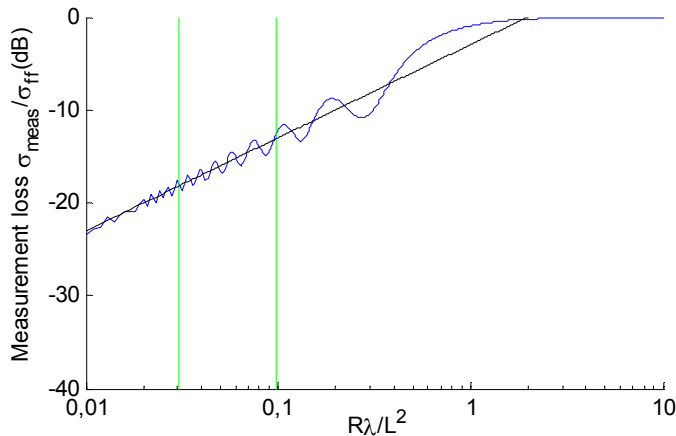
Siendo  $\lambda$  la longitud de onda y  $R$  la distancia entre el transmisor y el mástil.

Este criterio se ve apoyado por el estudio realizado por Welsh en su referencia [115]. En ella, para un cilindro iluminado perpendicularmente a su eje, calcula la relación entre la sección radar medida en condiciones de campo cercano con la sección radar obtenida en campo lejano mediante la Ecuación (6.37):

$$\frac{\sigma_{meas}}{\sigma_{ff}} = \frac{\lambda R}{L^2} \left( C^2 \left( \frac{L}{\sqrt{\lambda R}} \right) + S^2 \left( \frac{L}{\sqrt{\lambda R}} \right) \right) \tag{6.37}$$

Donde  $C(x)$  y  $S(x)$  son las integrales estándar de Fresnel seno y coseno.

Para comprobar la validez de la aproximación propuesta por Van Lil, se hace una evaluación numérica de la expresión de Welsh y se representa gráficamente en la Figura 6.18. En ésta, se muestra también la recta resultante de expresar el criterio de Van Lil en función del parámetro *measurement loss* propuesto por Welsh. Las líneas verticales representan los valores máximo y mínimo del cociente  $R\lambda/L^2$  para los aerogeneradores más próximos a los transmisores de Oiz-I.



**Figura 6.18. Evaluación numérica de los criterios de Welsh y Van Lil para campo cercano**

En la gráfica se puede comprobar que en el rango de valores de  $R\lambda/L^2$  de nuestro caso en estudio, las variaciones de la aproximación de Welsh sobre la aproximación de Van Lil son como máximo de  $\pm 1$  dB.

Más allá de la reducción del valor de sección radar monoestática, en condiciones de campo cercano, debido a que la onda incidente deja de ser una onda plana, se dan una serie de efectos en el patrón de dispersión [126],[132],[138]-[139]. Estos efectos se pueden observar en la Figura 6.19, que presenta varios patrones de RCS predichos para un objeto plano de dimensión  $d=14,4\lambda$  en función de  $p$ , siendo  $p=R\lambda/d^2$  y  $R$  la distancia al objeto.

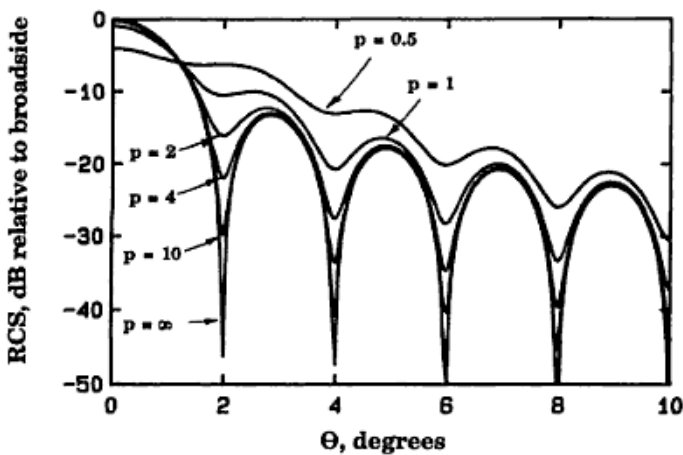


Figura 6.19. Ejemplo de efectos de campo cercano en patrones de RCS [126]

**Relleno de nulos**

Los nulos dejan de ser infinitamente profundos como serían según la teoría, de manera que se desdibuja el diagrama de dispersión.

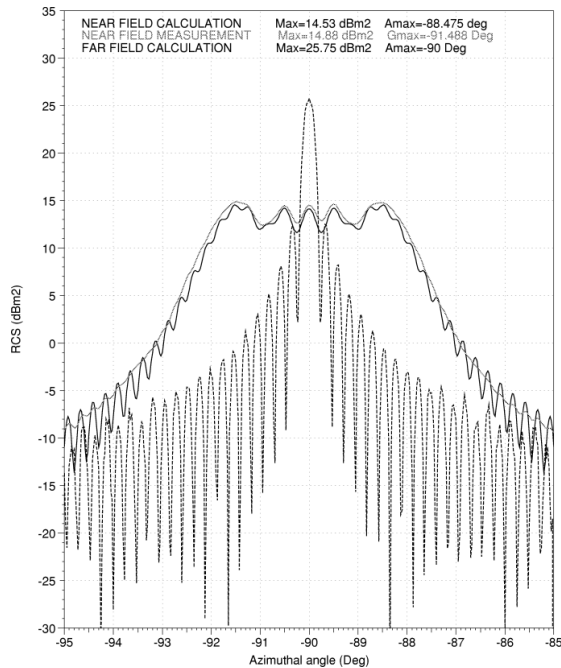
**Aumento de los lóbulos laterales**

Se observan aumentos significativos en la amplitud de los lóbulos laterales, siendo mayor el aumento en los lóbulos laterales próximos al lóbulo principal (incidencia perpendicular).

**Decrecimiento del lóbulo principal**

El último efecto del campo lejano en el diagrama de radiación es la reducción de la amplitud del lóbulo principal (incidencia perpendicular).

Estos efectos coinciden con el análisis teórico y la comprobación empírica realizada en [140] para analizar la RCS en campo cercano de un cilindro conductor. Considerando que su eje es paralelo al plano horizontal, se observa la RCS en  $\pm 5^\circ$  alrededor de la dirección perpendicular al cilindro ( $90^\circ$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.20. La curva negra muestra la RCS teórica mientras que la curva gris corresponde a la RCS medida en campo cercano. La línea discontinua representa la RCS del mismo objeto en campo lejano. En la figura se pueden observar los efectos anteriormente comentados: relleno de nulos, aumento de lóbulos laterales, y decrecimiento del lóbulo principal.



**Figura 6.20. Patrón de RCS en campo cercano de un cilindro conductor [140]**

Estos efectos de campo cercano descritos en la literatura se refieren a patrones de dispersión monoestáticos, es decir, aquéllos que se producen al cambiar el ángulo de aspecto con respecto al objeto, pero transmitiendo y recibiendo en ese mismo ángulo. Sin embargo, cuando la longitud de onda es pequeña en comparación con las dimensiones del objeto, se pueden aplicar los llamados *teoremas de equivalencia monoestático-biestático*. Crispin y Maffet probaron, usando las consideraciones de distribución de corriente determinadas por la óptica física, que la RCS biestática para un ángulo  $\beta$  es aproximadamente igual a la RCS monoestática en  $\beta/2$ . A partir de datos experimentales, se pudo comprobar que el teorema es válido para  $\beta < 130^\circ$  [141],[142].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, los efectos de campo cercano aplicados al modelo simplificado de RCS de un cilindro obtenido en la sección anterior, harían que se perdiera la directividad propia de la *sinc* en el plano vertical. Para evitar errores al considerar un diagrama de dispersión muy directivo que no va a darse en situaciones de campo cercano, se propone utilizar en estas condiciones el caso peor en el plano vertical, que se corresponde con la recepción en la dirección especular, es decir,  $\theta_r = 180^\circ - \theta_t$ .

De esta manera, el modelo propuesto en condiciones de campo cercano deja de depender del ángulo de elevación de recepción  $\theta_r$ , pasando a depender exclusivamente del ángulo de elevación de incidencia  $\theta_t$  y del ángulo de acimut de recepción  $\phi_r$ . Aplicando esta condición y la indicada en la Ecuación (6.36), el modelo propuesto en condiciones de campo cercano queda determinado por la Ecuación (6.38)

$$\sigma(\phi_r, \theta_t)_{nf} = kaL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t \tag{6.38}$$

### 3.3 Modelo de dispersión TSR

La Tabla 6.7 recoge el modelo de dispersión de un aerogenerador en la banda UHF, llamado modelo de dispersión TSR. Los límites de aplicabilidad del modelo quedan expresados en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.7. Modelo de dispersión TSR de un aerogenerador en la banda UHF**

<p><b>Condiciones de campo lejano</b> <math>R \geq \frac{2L^2}{\lambda}</math></p>
$\sigma(\phi_r, \theta_r, \theta_t)_{ff} = 2kaL^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \cdot \frac{\sin \theta_t^2}{\sin \theta_t + \sin \theta_r} \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{kL(\cos \theta_t + \cos \theta_r)}{2} \right)$
<p><b>Condiciones de campo cercano</b> <math>R &lt; \frac{2L^2}{\lambda}</math></p>
$\sigma(\phi_r, \theta_t)_{nf} = kaL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t$ $L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}}$



### 3.3.1 Evaluación empírica del modelo de dispersión TSR

La evaluación empírica de los modelos teóricos de dispersión presentada en el Apartado 2 de este capítulo puede completarse ahora con el análisis de la precisión en la predicción proporcionada por el modelo TSR. Cabe mencionar que en nuestro caso de estudio los aerogeneradores se encuentran en condiciones de campo cercano con respecto a los transmisores, de manera que sólo es posible la comparativa con el modelo  $TSR_{nf}$ . Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.8.

**Tabla 6.8. Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión incluyendo el modelo TSR**

	Error medio	Error medio (módulo)	Desviación estándar	Percentiles 5 / 95
<b>Rec. UIT-R BT.805</b>	5,86 dB	7,19 dB	6,66 dB	-4,80 / 17,08 dB
<b>BBC</b>	14,06 dB	14,14 dB	6,66 dB	4,23 / 25,24 dB
<b>Van Kats</b>	2,68 dB	5,62 dB	6,66 dB	-7,15 / 13,88 dB
<b>Sengupta</b>	-5,62 dB	7,24 dB	6,66 dB	-15,52 / 5,64 dB
<b>Rec. UIT-R BT.1893</b>	-31,75 dB	33,63 dB	24,31 dB	-72,06 / 9,38 dB
<b>Modelo TSR</b>	0,93 dB	5,28 dB	6,58 dB	-8,48 dB / 10,91 dB

Puede observarse que el modelo TSR es el que proporciona menores errores de predicción de todos los modelos presentados. Esto es especialmente significativo en el error medio, menor a 1 dB.

Sin embargo, los valores de desviación estándar son comparables a los ofrecidos por los modelos teóricos, lo que lleva a pensar que estos altos valores de desviación estándar son propios de la variabilidad de las medidas, y no tanto de los modelos de predicción.

Hay que considerar que, para distintas medidas correspondientes a un mismo aerogenerador en un mismo emplazamiento, hay variaciones debido al modo de funcionamiento del mismo. Es decir, habrá variaciones entre los valores de  $C/I_{meas}$  debido a las distintas orientaciones de la turbina para diferentes instantes de toma de las medidas.

En este sentido, hay que tener en cuenta que el modelo de canal propuesto en esta tesis pretende caracterizar las variaciones de la señal dispersada por los aerogeneradores a través de sus espectros Doppler, tal y como se incluye en el siguiente capítulo, y, debido a esto, lo que interesa evaluar es el error de

predicción del modelo propuesto para cada punto de recepción. Por lo tanto, para elegir el valor característico de un aerogenerador en concreto en un punto de recepción se hace la media de los valores medianos obtenidos en el paso anterior.

Así, los nuevos errores de predicción  $\varepsilon'$  se obtienen calculando la diferencia entre la media de los medianos de las  $C/I_{meas}$  de un aerogenerador en distintos instantes de tiempo y las  $C/I_{pred}$ , como indica la Ecuación (6.39)

$$\varepsilon' = mean \{ median \{ C / I_{meas} \} \} - C / I_{pred} \tag{6.39}$$

Para caracterizar estadísticamente el error de predicción se calcula el valor medio y el valor medio utilizando los valores absolutos, la desviación estándar, los percentiles 5 y 95 y el porcentaje de errores comprendidos entre  $\pm 6$  dB. La caracterización estadística de los nuevos errores de predicción, característicos de las ubicaciones de recepción, se recoge en la Tabla 6.9. Al hacer la media de los valores medianos se elimina la variación debida a la orientación del aerogenerador con respecto al viento, por esto, no se puede comparar el modelo propuesto con el modelo descrito en la nueva recomendación Rec. UIT-R BT.1893.

**Tabla 6.9. Caracterización estadística del error de predicción de los modelos de dispersión por localización**

	Error medio	Error medio (módulo)	Desviación estándar	Percentiles 5 / 95	% $\pm 6$ dB
<b>Rec. UIT-R BT.805</b>	6,39 dB	7,28 dB	6,09 dB	-3,63 / 16,98 dB	45%
<b>BBC</b>	14,52 dB	14,54 dB	6,06 dB	5,90 / 24,67 dB	6%
<b>Van Kats</b>	3,15 dB	5,37 dB	6,06 dB	-5,48 / 13,3 dB	63%
<b>Sengupta</b>	-5,16 dB	6,61 dB	6,05 dB	-13,73 / 5,04 dB	49%
<b>Modelo TSR</b>	1,38 dB	4,81 dB	5,83 dB	-6,48 / 11,44 dB	72%

De los resultados obtenidos al aplicar el margen de  $\pm 6$  dB, se puede concluir que el modelo TSR es el que proporciona predicciones más precisas. Un 72% de los datos estimados presenta un error absoluto menor de 6 dB con respecto a los datos obtenidos empíricamente. Este resultado consigue aproximadamente un 10% de mejoría con respecto al modelo de Van Kats.

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio teórico realizado permiten desarrollar un modelo que caracteriza la dispersión de un aerogenerador en la banda UHF. Tras comparar las contribuciones de cada uno de los elementos del aerogenerador, y concluir que el mástil es el reflector principal en el plano horizontal (en la mayoría de direcciones biestáticas) y en el vertical (al menos en la dirección especular), se decide basar en el mástil el modelo de dispersión a desarrollar. Para ello, se aproxima el mástil a un cilindro, para lo que se toma como base teórica el desarrollo de Siegel basado en el modelo de óptica física [123].

Teniendo en cuenta el rango de frecuencias de la banda UHF y las dimensiones típicas de los aerogeneradores, es necesario considerar que la dispersión de señal se dé bajo condición de campo cercano. La propuesta para aplicar efectos de campo cercano en el modelo de dispersión se basa en estimar el valor de sección radar correspondiente a la *longitud de campo cercano* [136]-[137] en la dirección especular del plano vertical, y utilizarla dentro de los límites de aplicación establecidos por la teoría de óptica física en este plano. De esa manera se consigue una expresión aplicable a la propuesta de modelo de canal, fácilmente implementable en herramientas de planificación.

El modelo TSR propuesto para la caracterizar la señal dispersada por un aerogenerador en la banda UHF en condiciones de campo cercano, junto con sus límites de aplicación, se recoge en la Tabla 6.10.

**Tabla 6.10. Resumen del modelo de dispersión TSR de un aerogenerador en la banda UHF en condiciones de campo cercano**

<p><b>Condiciones de campo cercano</b> <math>R &lt; \frac{2L^2}{\lambda}</math>, siendo <math>R</math> la distancia turbina-transmisor y <math>L</math> la longitud del mástil</p>		
$\sigma(\phi_r, \theta_t)_{nf} = kaL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t, \quad \text{siendo } L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}}$ <p>siendo <math>k=2\pi/\lambda</math>, <math>\lambda</math> la longitud de onda, <math>a</math> el radio medio del mástil, <math>\phi_r</math> la posición angular del receptor en el plano horizontal, <math>\theta_t</math> la posición angular del transmisor en el plano vertical</p>		
<p><b>Límites de aplicación</b></p>		
$70^\circ < \theta_t < 110^\circ$	$-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$	$160^\circ - \theta_t < \theta_r < 200^\circ - \theta_t$

Tras la caracterización y la comparativa con los modelos teóricos de dispersión existentes, se concluye que, además de proporcionar resultados más precisos con respecto al resto de modelos, el modelo TSR presenta ciertas ventajas de cara a desarrollar un nuevo modelo de canal.

### **Contribución del mástil a la señal dispersada**

Los modelos de la BBC, de Van Kats, de Sengupta, y los propuestos por la UIT se basan exclusivamente en la reflexión provocada por las aspas. Teniendo en cuenta la composición, forma y tamaño del mástil con respecto a las palas, los demás modelos subestiman la dispersión provocada por el aerogenerador al no considerar el mástil.

### **Geometría y composición de los elementos del aerogenerador**

Los modelos de la BBC, de Van Kats, de Sengupta y los propuestos por la UIT suponen materiales, formas y disposiciones de pala que no concuerdan con la realidad. Además, se habla de factores como el *factor de dispersión* y *área efectiva* de la pala que se obtuvieron empíricamente a partir de medidas sobre aerogeneradores con características diferentes a los actuales. El modelo TSR se basa en la reflexión provocada por el mástil, cuya composición y forma varía poco entre modelos de diferentes fabricantes, de forma que no hay necesidad de hacer suposiciones sobre las palas, cuyo diseño es complejo y específico de cada modelo de aerogenerador.

### **Ángulo de incidencia de elevación**

Además de ser un factor no considerado en ningún método de predicción anterior, el ángulo de elevación  $\theta_i$  puede ser de suma importancia en casos en los que el transmisor y el aerogenerador estén situados en distintas cotas de altura.

### **Efecto de las aspas**

Al basarse en la dispersión provocada por el mástil y no realizar suposición alguna sobre las aspas, el modelo permite añadir el efecto de las palas de manera independiente. Los demás modelos se basan exclusivamente en la reflexión provocada por las palas suponiendo que éstas se encuentran orientadas de tal forma que su reflexión es máxima, sin considerar sus variaciones debido a la rotación y a la orientación del rotor. El modelo TSR proporciona un valor medio de señal dispersada por el aerogenerador, sobre

el que se pueden aplicar las variaciones propias del comportamiento dinámico de las aspas, caracterizadas a través de su espectro Doppler.



*Analyse data just so far as to obtain simplicity and no further.*

*- Henri Poincaré*

---

## **CAPÍTULO 7: CARACTERIZACIÓN DOPPLER**

---

El Capítulo 7 presenta el análisis de la variabilidad temporal del canal debida a la rotación de las aspas mediante la estimación de los espectros Doppler de las señales dispersadas. A partir de estos espectros Doppler estimados, se realiza una caracterización de los mismos mediante curvas de ajuste exponencial. Del amplio conjunto de muestras de espectros Doppler obtenidos, es necesario realizar una selección de los que puedan resultar más representativos o críticos de cara a la propuesta de modelo de canal, para lo cual se realizan simulaciones de curvas BER frente a SNR sobre un sistema OFDM y se realiza un exhaustivo análisis de los resultados obtenidos.





## 1. ESTIMACIÓN ESPECTRAL DE POTENCIA DOPPLER

---

La caracterización empírica de los espectros Doppler debidos a la rotación de las aspas parte de la obtención de las señales dispersadas, estimadas a partir de las respuestas impulsionales complejas de la señal DVB-T.

En teoría es suficiente con realizar una transformada discreta de Fourier de estas señales a lo largo del tiempo de observación y tomar el valor absoluto al cuadrado del resultado para obtener su distribución de potencia en la frecuencia Doppler. Sin embargo, en la práctica se trabaja con un conjunto de datos finito, y por lo tanto, el efecto es equivalente a multiplicar la señal de entrada  $x(n)$  por una ventana rectangular [143].

Al igual que se comenta en el Capítulo 2 – Sección 4.3, siempre que el espectro de la función de enventanado  $W(f)$  sea relativamente estrecho en comparación con el espectro de la señal de entrada  $X(f)$ , la convolución de  $W(f)$  con  $X(f)$  provoca que la energía de  $X(f)$  se distribuya en lóbulos laterales en los cuales el espectro de la señal original era cero. Esta fuga de energía hacia los lóbulos laterales puede reducirse con ventanas cuyos lóbulos laterales sean bajos. Aunque estas funciones de enventanado reducen los lóbulos secundarios, ensanchan las características espectrales de  $X(f)$  [75],[76],[143].

Para evitar estos efectos sobre la señal de entrada, existen diferentes métodos de estimación espectral de potencia, clasificados normalmente en *no paramétricos*, *paramétricos* y *subespaciales* [143]- [145].

Los métodos *no paramétricos* son aquellos en los cuales la densidad espectral de potencia o PSD se obtiene directamente de la señal de entrada, de manera que no se realizan suposiciones sobre la secuencia de entrada. Los métodos *paramétricos* se basan en considerar que la señal de entrada  $x(n)$  es la salida de un sistema lineal cuya entrada es ruido blanco. Estos métodos estiman la PSD, calculando previamente los parámetros o coeficientes del sistema lineal que hipotéticamente genera la señal  $x(n)$ . Por último, los métodos *subespaciales* generan las estimaciones de las componentes frecuenciales de una señal basándose en descomposiciones de la matriz de correlación. Estos métodos son efectivos para la detección de señales sinusoidales en entornos de alto ruido [143]- [145].

Los métodos no paramétricos presentan como limitación que, al estar basados exclusivamente en una señal de entrada de duración finita, la resolución

frecuencial de estos métodos es, como máximo, igual a la anchura espectral de una ventana rectangular de longitud  $N$  igual a la longitud de la señal de entrada, que es aproximadamente  $1/N$  para el corte a 3 dB. En realidad, estas técnicas de estimación espectral disminuyen la resolución frecuencial con objetivo de reducir la varianza en la estimación.

Otra limitación de los métodos no paramétricos es que se basan en la suposición inherente de que los datos son periódicos con periodo  $N$  [143]. Si bien esta suposición no suele coincidir con el caso general, en el caso en estudio las señales dispersadas son periódicas debido al movimiento de las aspas, por lo que, haciendo coincidir la longitud de la ventana  $N$  con un múltiplo del periodo de rotación de las aspas, se cumpliría esa suposición.

Por otra parte, la aplicación de los métodos subespaciales no parece apropiada para el objetivo propuesto, y los métodos paramétricos requieren realizar suposiciones con respecto a la señal de entrada. Por todo ello, se opta por hacer la estimación espectral de potencia Doppler en base a un método no paramétrico.

Cinco métodos no paramétricos se encuentran en la literatura: el periodograma [146], el periodograma modificado, el método de Bartlett [147], Blackman-Tukey, y el método propuesto por Welch [148]. Sin embargo, todos ellos son modificaciones sobre el método clásico del periodograma propuesto por Schuster [146].

El periodograma se define como [143]

$$\hat{S}_{xx}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-\frac{2\pi jkn}{N}\right) \right|^2 \quad (7.1)$$

El periodograma es asintóticamente no sesgado, dado que si  $N$  tiende a infinito, la respuesta frecuencial de la ventana rectangular se aproxima a una función delta de Dirac. Sin embargo, es inconsistente porque su varianza no tiende a cero para valores de  $N$  altos.

El periodograma modificado usa una ventana no rectangular para reducir la amplitud de los lóbulos secundarios, a costa de una reducción en resolución, pero no soluciona el problema de la inconsistencia.

Una manera de reducir la varianza es mediante promediado. El método de Bartlett [147] divide la longitud de la señal  $N$  en  $K$  segmentos de tamaño  $L=N/K$ . El

método del periodograma se aplica a cada uno de estos segmentos, y el promedio de las densidades espectrales de potencia estimadas se toma como la densidad espectral de potencia resultante. De esta manera la varianza se reduce por un factor  $K$ , pero también la resolución espectral se ve reducida por ese mismo factor [143].

El método propuesto por Welch realiza dos modificaciones principales al método de Bartlett para reducir la varianza sin disminuir en el mismo factor la resolución espectral. Por una parte, permite el solapamiento de los segmentos, y por otra, aplica funciones de enventanado diferentes a la rectangular. Si bien el solapamiento de segmentos introduce información redundante, el uso de ventanas no rectangulares hace que se reduzca el peso de las muestras iniciales y finales de cada segmento, es decir, las muestras que se solapan [148].

La naturaleza periódica de las señales dispersadas por los aerogeneradores hace que el método de Welch sea especialmente indicado para la estimación de las densidades espectrales de potencia Doppler correspondientes. Tras diversas pruebas para buscar los parámetros óptimos para la aplicación del método, se opta por hacer que la longitud de los segmentos se adapte a cada señal, haciéndola coincidir con el periodo de la variación de la señal debida a la rotación de las aspas. Además se realiza un solapamiento del 50% y se utiliza una ventana de Hamming para cada segmento.

La estimación de las densidades espectrales de potencia Doppler se realiza sobre el mismo conjunto de muestras utilizadas para la comparativa con los modelos teóricos de dispersión, obteniéndose un total de 328 espectros Doppler correspondientes a las señales dispersadas por los aerogeneradores de Oiz-I A30, A29, A28 y A27, para las emisiones de ambos transmisores de DVB-T. Es por ello que las densidades espectrales de potencia Doppler estimadas corresponderán con situaciones de campo cercano, y podrían diferir de las características espectrales de las señales dispersadas en campo lejano [149].

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ESPECTROS DOPPLER

---

Como paso previo a la caracterización de los espectros Doppler obtenidos, se realizó una búsqueda bibliográfica para identificar los modelos espectrales existentes y determinar sus bases teóricas o empíricas, y sus áreas de aplicación. A continuación se realiza la caracterización de los espectros Doppler debidos a la rotación de las aspas estimados a partir de las medidas de DVB-T.

### 2.1 Modelos de espectro Doppler existentes

#### 2.1.1 Espectro Doppler Jakes o modelo clásico

El modelo clásico o de Jakes [150]-[152] es ampliamente utilizado para la caracterización de la propagación para un receptor móvil. Se basa en las siguientes suposiciones [153]:

- Las ondas de radio se propagan horizontalmente, en un plano bidimensional, y el receptor se encuentra en el centro de un área de dispersión isotrópica
- En el receptor, los ángulos de llegada de las ondas de radio están uniformemente distribuidas entre  $[-\pi, \pi]$
- El diagrama de radiación de la antena en el receptor es omnidireccional

A partir de un desarrollo teórico, se obtiene la densidad espectral de potencia normalizada de Jakes en banda base:

$$S_j(f) = \frac{1}{\pi f_d \sqrt{1 - (f / f_d)^2}}, \quad |f| \leq f_d \quad (7.2)$$

Siendo  $f_d$  el máximo desplazamiento Doppler debido a la velocidad del receptor.

Cuando los ángulos de llegada no están uniformemente distribuidos, lo cual corresponde al caso de un diagrama de radiación de antena directivo, se obtiene un modelo denominado Jakes restringido [153]. Para algunas aplicaciones, como los canales de radiocomunicaciones por satélite, se usa una variante asimétrica en frecuencia del espectro Doppler clásico [153].

### 2.1.2 Espectro Doppler plano

En la referencia [154] se demuestra que en un escenario tridimensional de dispersión isotrópica, donde los ángulos de llegada están uniformemente distribuidos tanto en el plano horizontal como en el vertical, el espectro Doppler resultante es plano, y su densidad espectral de potencia normalizada en banda base viene dada por la Ecuación (7.3):

$$S_f(f) = \frac{1}{2f_d}, \quad |f| \leq f_d \quad (7.3)$$

### 2.1.3 Espectro Doppler gaussiano

El espectro Doppler gaussiano se utiliza para modelar las componentes multitrajecto muy retardadas en las comunicaciones UHF, en el canal HF y en comunicaciones aeronáuticas en la banda VHF [150],[155]. La densidad espectral de potencia normalizada en banda base se expresa según la Ecuación (7.4):

$$S_g(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \exp\left(-\frac{f^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (7.4)$$

A partir del espectro Doppler gaussiano se obtiene el espectro Doppler bi-gaussiano, compuesto por dos espectros gaussianos desplazados en frecuencia [150].

### 2.1.4 Espectro Doppler redondeado

El espectro Doppler redondeado se propone en [156] como una aproximación a densidades espectrales de potencia medidas en la componente dispersa de un canal inalámbrico fijo a 2,5 GHz. La densidad espectral de potencia normalizada en banda base viene dada por la Ecuación

$$S_r(f) = C_r \left[ a_0 + a_2 \left( \frac{f}{f_d} \right)^2 + a_4 \left( \frac{f}{f_d} \right)^4 \right], \quad |f| \leq f_d \quad (7.5)$$

Con el factor de normalización

$$C_r = \frac{1}{2f_d \left[ a_0 + \frac{a_2}{3} + \frac{a_4}{5} \right]} \quad (7.6)$$

Dado que el canal modelado en [156] presenta una componente fija en línea de vista, se incluye una delta de Dirac en la PSD en  $f=0$  Hz.

## 2.2 Caracterización del espectro Doppler debido a la rotación de las aspas

Si bien en la bibliografía se encuentran algunas referencias sobre el análisis de las características espectrales de las señales dispersadas por los aerogeneradores [11],[157]-[159], estos estudios se han centrado en las bandas de frecuencia dedicadas a radar, y no proporcionan modelos de ajuste para caracterizar los espectrogramas obtenidos. Además, son estudios relacionados con las características Doppler monoestáticas, mientras que en nuestro caso se trabaja con frecuencias Doppler biestáticas.

### 2.2.1 Cálculo teórico del desplazamiento Doppler biestático

Es sencillo calcular la frecuencia Doppler máxima teórica  $f_D$  en función de la máxima velocidad de rotación de las aspas y la longitud de éstas, de manera que para el parque eólico en estudio se obtiene  $f_D = \pm 440,64$  Hz. Sin embargo, la frecuencia máxima observable para cada caso estimado es difícil de predecir, ya que varía con el tiempo, al depender no sólo de la velocidad de rotación de las aspas, sino también de la geometría relativa entre transmisor, turbina y receptor, y de la orientación de la turbina con respecto al viento. Más concretamente, el Doppler biestático  $f_B$  viene dado por la Ecuación (7.7) [101]:

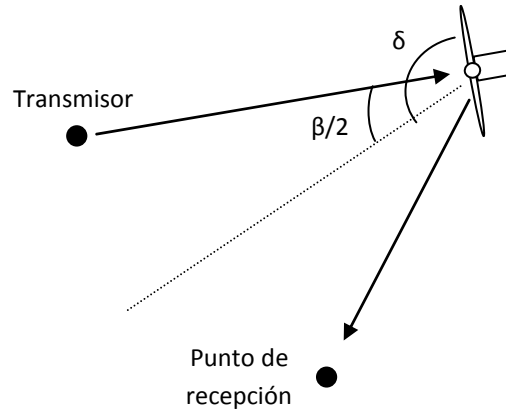
$$f_B = \frac{2v}{\lambda} \cos \delta \cos(\beta / 2) \quad (7.7)$$

Donde  $v$  es la velocidad lineal del aspa,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\beta$  es el ángulo biestático (transmisor-turbina-receptor) y  $\delta$  es el ángulo que define el plano de rotación de las aspas con respecto al bisector biestático (ver Figura 7.1).

Es decir, para una determinada ubicación y considerando todas las orientaciones posibles del aerogenerador, la frecuencia Doppler biestática máxima viene dada por la Ecuación (7.8):

$$f_{B\_max} = \frac{2w_{max}l}{\lambda} \cos(\beta / 2) \quad (7.8)$$

Donde  $w_{max}$  es la velocidad de rotación máxima,  $l$  es la longitud del aspa,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\beta$  es el ángulo biestático (transmisor-turbina-receptor).



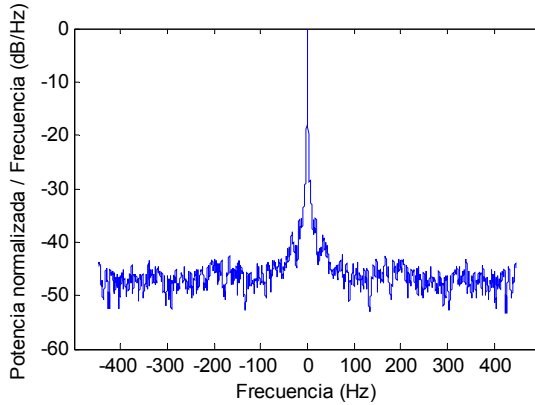
**Figura 7.1. Geometría del Doppler biestático en el plano horizontal**

### 2.2.2 Propuesta de modelo de espectro Doppler

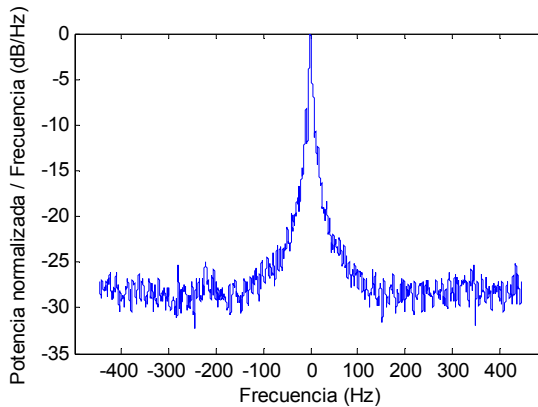
Con esta idea en mente, la Figura 7.2 y la Figura 7.3 muestran dos ejemplos de PSD estimadas a partir de las medidas de DVB-T. La característica común a todas las PSD obtenidas es la presencia de una componente principal en 0 Hz, y densidades espectrales de potencia decrecientes hacia las frecuencias más altas. Por ello, se decide normalizar, de cara a la caracterización, todas las PSD de manera que la componente en 0 Hz se corresponda con 0 dB/Hz, de manera análoga a los resultados presentados en las referencias [160] y [161]. Estas características espectrales son similares a las que se producen en comunicaciones fijas, en las cuales el transmisor y el receptor están estáticos y es el entorno el que provoca variaciones en el canal de propagación [156], [162]-[167].

Por otra parte, la presencia de esta componente principal en 0 Hz coincide con las conclusiones obtenidas de la evaluación de los modelos teóricos de dispersión y las simulaciones basadas en el método de óptica física de la RCS biestática del aerogenerador, ya que esta componente predominante y estática correspondería a la señal procedente del mástil.

Tras comprobar que los modelos existentes presentados en la sección anterior no ajustan a los espectros Doppler estimados, se opta por buscar un nuevo modelo para el ajuste.



**Figura 7.2. Ejemplo 1: PSD Doppler correspondiente al aerogenerador A28**



**Figura 7.3. Ejemplo 2: PSD Doppler correspondiente al aerogenerador A27**

Tomando como referencia otros modelos de PSD utilizados para comunicaciones fijas, se opta por caracterizar el espectro tomando una delta de Dirac en  $f=0$  Hz y buscar una expresión en función de la frecuencia para el resto del espectro [156], [162]-[164]. Tras un concienzudo análisis empírico de los diferentes modelos, finalmente se opta por utilizar ajustes exponenciales separados para las frecuencias negativas y positivas, para poder contemplar los casos en los que las PSD no son simétricas. De esta manera, los espectros Doppler estimados  $S(f)$  se ajustan en dB/Hz (tras la normalización con respecto al máximo en 0 dB/Hz) atendiendo al siguiente modelo:



$$S_{\delta}(f) = \begin{cases} a \exp(bf) - c & f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ d \exp(ef) - g & f > 0 \end{cases} \quad (7.9)$$

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $g$  son constantes positivas,  $f$  es la frecuencia (Hz) y  $\delta(0)=0$  dB/Hz. Los parámetros  $b$  y  $e$  representan las tasas de crecimiento y decrecimiento exponenciales, de manera que las características espectrales son más anchas cuanto menores son los valores de  $b$  y  $e$ , y viceversa. Los parámetros  $c$  y  $g$  están relacionados con los valores asintóticos correspondientes a frecuencias infinitas negativa y positiva respectivamente. Por último, los parámetros  $a$  y  $d$  dan cuenta del valor de la curva en el corte con el eje y ( $f=0$  Hz) con respecto a los valores asintóticos dados por los parámetros  $c$  y  $g$ .

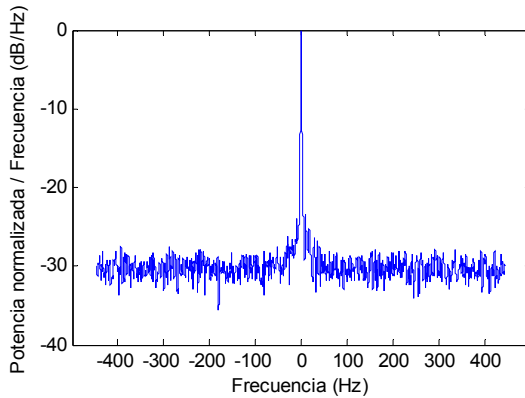
### 2.2.3 Límites en frecuencia de los espectros Doppler

Para hacer una caracterización correcta de los espectros Doppler estimados, es necesario limitarlos en frecuencia para eliminar la influencia del ruido. En ciertos modelos de espectro Doppler estas frecuencias se limitan mediante un cálculo teórico del máximo desplazamiento Doppler debido a la velocidad del receptor o del entorno [150]-[152], pero tal y como se ha comentado, en este caso el desplazamiento teórico máximo dependerá de la orientación exacta del aerogenerador para cada ubicación, por lo que no se puede calcular con precisión. En otros estudios [166], se estima o se mide un nivel de ruido que fija el umbral por debajo del cual se considera que la señal está compuesta exclusivamente de ruido. En nuestro caso, buscar un umbral común para todas las muestras disponibles es complejo, debido a las diferentes condiciones de medida entre ellas y a los diferentes niveles de normalización en potencia llevados a cabo durante el procesamiento de las medidas.

Volviendo al modelo de ajuste propuesto en la Ecuación (7.9), es inmediato deducir que los valores de los parámetros de ajuste  $c$  y  $g$  marcan la tendencia de las exponenciales en los extremos del eje frecuencial, y por tanto son una medida del nivel de ruido presente en cada una de las PSD estimadas. Tras analizar el decrecimiento exponencial de las PSDs estimadas y su relación con el umbral de ruido, se opta por fijar las frecuencias límite al alcanzar el 99% de los valores asintóticos dados por los parámetros  $c$  y  $g$ , según recoge la Ecuación (7.10):

$$\begin{cases} S_{\delta}(f_{\min}) = 0.99c \\ S_{\delta}(f_{\max}) = 0.99g \end{cases} \quad (7.10)$$

El ajuste de la expresión anterior a las PSD empíricas se realiza mediante el método *NonlinearLeastSquares* implementado en Matlab, que utiliza un proceso iterativo para adaptar un modelo no lineal a un conjunto de datos. Después, teniendo en cuenta el ajuste de los parámetros realizado, se calculan los valores de  $f_{min}$  y  $f_{max}$ . Existe un porcentaje residual de PSD estimadas en las cuales el ajuste al modelo  $S_{\delta}$  no converge. La mayor parte de estas PSD corresponden con espectros Doppler muy estrechos, en los que prácticamente toda la potencia se encuentra en un pequeño margen alrededor de 0 Hz (ver Figura 7.4).



**Figura 7.4. Ejemplo 3: PSD Doppler estrecha correspondiente al aerogenerador A28, no ajustable con  $S_{\delta}(f)$**

Con objeto de limitar el espectro en frecuencia en estos casos, se propone un segundo modelo en el cual se utilizan para el eje positivo y negativo dos exponenciales modificando sus parámetros de manera que siempre pasen por el punto (0 Hz, 0 dB/Hz). De esta manera se sigue forzando a que el modelo concuerde con la componente principal en 0 Hz, mientras que la exponencial ajusta al nivel de ruido en las frecuencias más altas, adaptándose mejor a los espectros estrechos como el mostrado en la Figura 7.4.

$$S_{no\_delta}(f) = \begin{cases} a' \exp(b'f) - a' & f \leq 0 \\ d' \exp(e'f) - d' & f \geq 0 \end{cases} \quad (7.11)$$

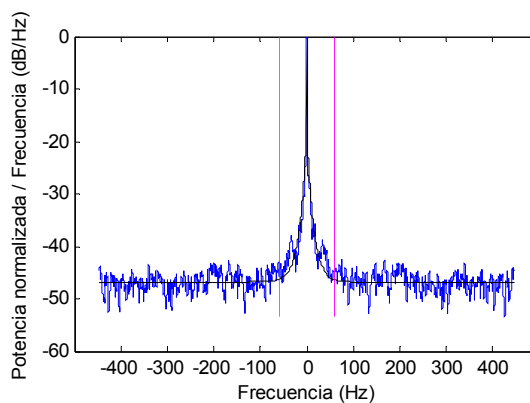
De manera que en este caso, los límites en frecuencia se obtienen según:

$$\begin{cases} S_{no\_delta}(f_{min}) = 0.99a' \\ S_{no\_delta}(f_{max}) = 0.99d' \end{cases} \quad (7.12)$$

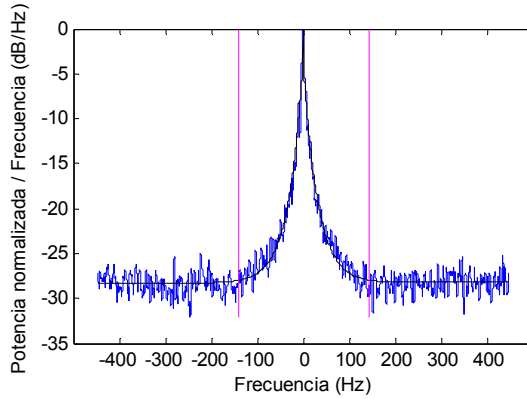
Como parámetro para la evaluación de la bondad del ajuste se utiliza el *coeficiente de determinación*  $R^2$  (también denominado *coeficiente de correlación múltiple al cuadrado* o *coeficiente de determinación múltiple*).  $R^2$  representa el valor cuadrático de la correlación entre los valores reales y los valores predichos por el modelo utilizado, es decir, el porcentaje de varianza justificado por las variables independientes.  $R^2$  puede tomar valores entre 0 y 1. A medida que su valor es mayor, el ajuste del modelo a los datos es mejor, puesto que la variación explicada es mayor; así, el desajuste provocado por la sustitución de los valores observados por los predichos es menor [168].

Utilizando el modelo  $S_\delta(f)$  y el modelo  $S_{no,\delta}(f)$  para los casos en el que este primero no converge, se consigue un valor  $R^2$  promedio de 0,80. Más allá de la bondad del ajuste conseguida, se puede observar que de esta forma se puede limitar el espectro en frecuencia de una manera sistemática, adaptativa y eficiente, tal y como muestran la Figura 7.5, la Figura 7.6 y la Figura 7.7.

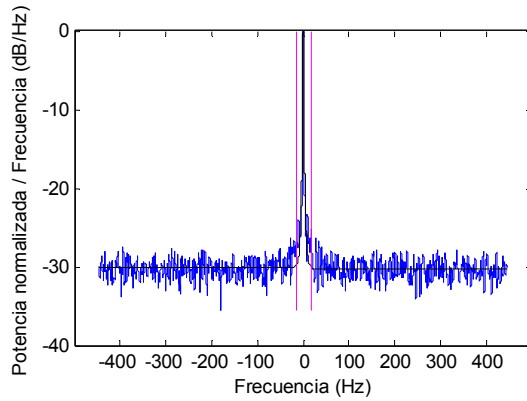
Por último, cabe mencionar que para las PSD estimadas con mayor anchura espectral, el método propuesto de cálculo de los límites  $f_{min}$  y  $f_{max}$  puede hacer que éstas queden fuera del margen teórico  $-f_{B,max} \leq f \leq f_{B,max}$ . Un ejemplo de este caso se muestra en la Figura 7.8, donde se puede observar que la frecuencia límite inferior calculada según el modelo  $S_\delta(f)$ ,  $f_{min}$ , es menor que la frecuencia biestática teórica mínima correspondiente a ese punto de recepción,  $-f_{B,max}$ , de manera que  $f_{min} < -f_{B,max}$ . Ante estas situaciones, se fijan las frecuencias límites coincidiendo con los valores teóricos máximos, es decir,  $f_{min} = -f_{B,max}$  o  $f_{max} = f_{B,max}$ , según corresponda. Cabe mencionar que este caso se da únicamente en 4 de las 328 muestras disponibles.



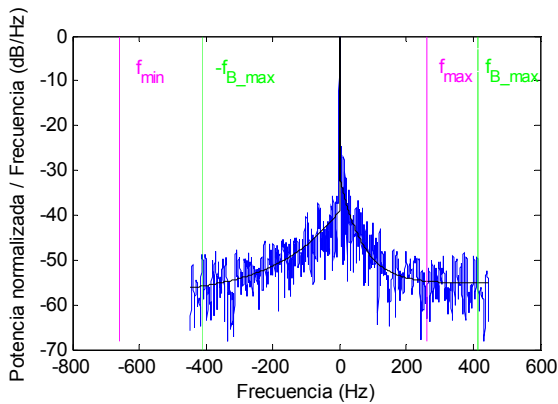
**Figura 7.5. Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 1 tras primer ajuste con el modelo  $S_\delta(f)$**



**Figura 7.6.** Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 2 tras primer ajuste con el modelo  $S_{\delta}(f)$



**Figura 7.7.** Límites en frecuencia (líneas verticales magenta) para el ejemplo 3 tras primer ajuste con el modelo  $S_{no,\delta}(f)$



**Figura 7.8.** Ejemplo 4: PSD Doppler ancha correspondiente al aerogenerador A28, con los límites de frecuencia calculados (magenta) y teóricos máximos (verde)

### 2.2.4 Aplicación del modelo de espectro Doppler propuesto

Esta primera caracterización se utiliza únicamente para determinar los límites de frecuencia y eliminar así la influencia del ruido. Cabe destacar que la presencia de componentes ruidosas de gran amplitud en frecuencias altas podría resultar crítica en la evaluación de la posible degradación debida a la variabilidad del canal, como se analiza posteriormente en el Apartado 3, lo cual justifica la importancia de este paso previo.

Una vez calculados los límites en frecuencia, se realiza una segunda caracterización sólo para las frecuencias  $f_{min} \leq f \leq f_{max}$  utilizando el modelo  $S_\delta(f)$ . De esta manera, para las señales analizadas se consigue un valor de  $R^2$  promedio de 0,87, con una desviación estándar de 0,09.

Sin embargo, la evaluación de la bondad del ajuste ha de hacerse no sólo en términos estadísticos, sino comprobando si el modelo de ajuste  $S_\delta(f)$  provoca en la señales los mismos efectos que los espectros estimados a partir de la señal DVB-T, lo cual se describe en el siguiente apartado.

A modo de resumen, la Figura 7.9 muestra el proceso seguido para la caracterización de los espectros Doppler debidos a la rotación de las aspas.

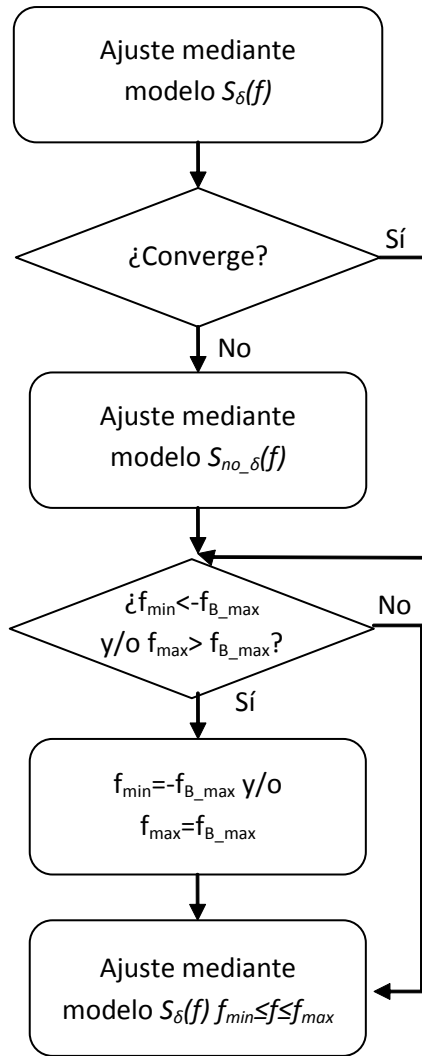


Figura 7.9. Proceso para la caracterización de las PSD Doppler estimadas

### 3. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS ESPECTROS DOPPLER EN SEÑALES OFDM

---

El objetivo de evaluar la influencia de los espectros Doppler obtenidos en las señales OFDM es doble: por una parte, es necesario determinar el nivel de degradación debido a diferentes tipos de espectros Doppler, es decir, comprobar la degradación adicional con respecto al canal en condiciones estáticas que supondría introducir estos espectros Doppler; por otra, se desea comprobar si el modelo de ajuste exponencial propuesto se comporta igual, en términos de degradación de la calidad, que los espectros estimados a partir de la señal DVB-T.

#### 3.1 Selección de condiciones y parámetros de simulación

Las simulaciones se realizan con una configuración OFDM similar a la utilizada para la difusión de DVB-T en España [72]-[73]. Se selecciona una modulación de portadora 64-QAM y  $N=8192$  portadoras por símbolo. Se trabaja con un sistema que ocupa un ancho de banda total de 10 MHz en la banda de 800 MHz. El intervalo de guarda se extiende a un cuarto de la longitud de símbolo,  $\Delta G=1/4$ .

Para evaluar la posible degradación en la señal OFDM debida a la variabilidad introducida en el canal por la rotación de las aspas de los aerogeneradores, se realizan simulaciones de BER frente a SNR sobre diferentes combinaciones de canal (amplitudes-retardos) y espectros Doppler, tanto estimados a partir de las medidas como caracterizados mediante el modelo  $S_{\delta}(f)$ .

Por una parte, en cuanto a la selección de amplitudes-retardos, del conjunto de las medidas utilizadas para evaluar la influencia del parque eólico en la degradación de la calidad de DVB-T, se eligen tres combinaciones con diferentes niveles de *potencia multitrayecto*. Las combinaciones de amplitudes-retardos seleccionadas se recogen en el Anexo IV. Se puede comprobar que los canales denominados como bajo, medio y alto tienen niveles de *potencia multitrayecto*  $P_{mult\_bajo}=-25,3$  dB,  $P_{mult\_medio}=-17,8$  dB y  $P_{mult\_alto}=-9,3$  dB respectivamente, de manera que corresponden a cada uno de los tramos definidos en la Tabla 4.1 para determinar los incrementos máximos de los umbrales de C/N sobre el umbral de C/N teórico de un canal Rice (ver Capítulo 4).

Por otra parte, de los 328 espectros obtenidos, es necesario hacer una selección de una serie de muestras que se consideren representativas con el fin de realizar las simulaciones. Para ello, tras analizar las tipologías de las PSDs

estimadas, se considera la anchura espectral y la asimetría en la distribución de potencia alrededor de la componente principal en 0 Hz como las características principales a analizar. Con objeto de facilitar la clasificación de los espectros disponibles de acuerdo a estas características, se definen los siguientes parámetros:

- $\Delta f = f_{max} - f_{min}$  se utiliza como indicador de la anchura espectral
- $\gamma = \frac{|f_{max} - |f_{min}|}{\Delta f}$  se utiliza como indicador de la asimetría de la densidad espectral de potencia
- $R^2$  se utiliza como indicador de bondad del ajuste

En función de estos parámetros, se eligen 24 espectros con diferentes anchuras espectrales y grados de asimetría para evaluar su influencia en la posible degradación de las señales OFDM, y con diferentes valores de  $R^2$  para valorar el comportamiento del ajuste exponencial realizado frente a los espectros Doppler estimados. Tanto las combinaciones de amplitudes-retardo como los espectros Doppler seleccionados y sus ajustes se incluyen en el Anexo IV.

Cabe mencionar que para las simulaciones, tanto el espectro estimado a partir de las señales medidas como su curva de ajuste se limitan en frecuencia utilizando los valores de  $f_{min}$  y  $f_{max}$  calculados.

### 3.2 Simulación de curvas BER frente a SNR

Para realizar las curvas de BER frente a SNR se dispone del diseño de un sistema OFDM realizado en Matlab que incluye la simulación de canales TDL [56],[169]. Para la obtención de las ganancias de cada trayecto correspondientes a la señal dispersada por un aerogenerador, se genera un proceso complejo de ruido gaussiano con media cero y varianza unidad. Estos procesos complejos se filtran mediante un filtro Doppler cuya respuesta frecuencial  $H(f)$  viene dada por la Ecuación (7.13). El filtro tiene que ser previamente normalizado para no hacer variar la potencia media del trayecto correspondiente [55],[56],[170],[171].

$$H(f) = \sqrt{S_{\delta}(f)} \tag{7.13}$$



El BER se determina usando el método de Monte Carlo. La probabilidad de error de bit se estima pasando  $N_{sym}$  símbolos por el sistema y contando los errores. Suponiendo que se cuentan  $N_e$  símbolos erróneos al pasar  $N_{sym}$  símbolos a través del sistema, el BER es [170][171]

$$\widehat{P}_E = \frac{N_e}{N_{sym}} \quad (7.14)$$

Que es una estimación de la probabilidad de error

$$P_E = \lim_{N_{sym} \rightarrow \infty} \frac{N_e}{N_{sym}} \quad (7.15)$$

Es por ello que ha de seleccionarse un número de símbolos  $N_{sym}$  suficiente como para que la varianza de la estimación sea pequeña, pero sin perder de vista los tiempos de simulación y el volumen de datos generado. Además, el número total de bits ha de ser siempre al menos un orden de magnitud mayor que el BER. Por todo ello, se opta por realizar diez simulaciones de 250 símbolos para cada caso en estudio, y posteriormente promediar los resultados obtenidos, consiguiendo las curvas de BER frente a SNR finales.

Se debe mencionar que el sistema implementado no incluye codificación y supone sincronización perfecta, por lo cual los resultados obtenidos no pueden compararse directamente con los umbrales empíricos incluidos en el Capítulo 4. Sin embargo, nos permite determinar si los espectros Doppler estimados incluyen una degradación adicional con respecto al mismo canal en condiciones estáticas, así como comparar los diferentes espectros Doppler entre sí, y la bondad del ajuste entre los espectros Doppler estimados y sus aproximaciones exponenciales.

### 3.3 Análisis de los resultados

Para evaluar la degradación que podría causar el ensanchamiento Doppler debido al movimiento de las aspas, se toma como referencia ese mismo canal en condiciones estáticas, es decir, cuando no hay variabilidad temporal y la amplitud media de los trayectos se mantiene constante. En concreto, se comparan las curvas de BER frente a SNR obtenidas al introducir los espectros Doppler con respecto a la curva de BER frente a SNR correspondiente al caso estático. El punto de análisis es el valor de SNR correspondiente a un BER de  $2 \cdot 10^{-4}$  (umbral para recepción QEF [72],[73],[81]).

El presente apartado se divide en los diferentes factores que se analizan: la evaluación de los diferentes tipos de canal (combinaciones de amplitud-retardo), los efectos de la anchura espectral y la asimetría, y la bondad del ajuste exponencial propuesto.

### 3.3.1 Efecto del nivel de potencia multitrayecto (combinaciones de amplitud-retardo)

Como cabía esperar, al simular los diferentes canales en condiciones estáticas, las curvas de BER frente a SNR empeoran para los canales con mayor nivel de potencia multitrayecto. Además, en las simulaciones en las que se utiliza un determinado espectro Doppler, la diferencia entre las curvas correspondientes a los casos estático y dinámico es también mayor cuanto mayor es el nivel de potencia multitrayecto, lo cual coincide con las conclusiones obtenidas en el Capítulo 4. La Figura 7.10 muestra las curvas BER frente a SNR correspondientes al caso estático de los tres tipos de canal simulados, así como el efecto del espectro Doppler estimado "Selección 07" sobre cada uno de ellos.

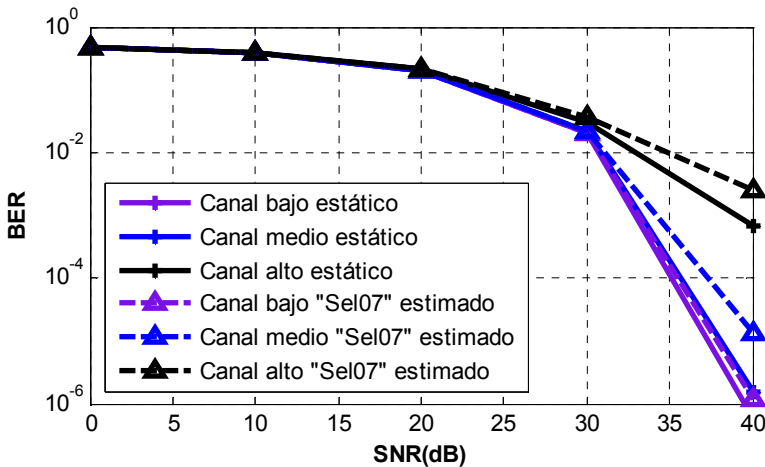


Figura 7.10. Curvas BER frente a SNR de los canales bajo, medio y alto en condiciones estáticas (—) y con espectro "Sel07" estimado (- - -)

Observando los resultados obtenidos, se concluye que, si bien cierta PSD provoca mayores degradaciones con respecto al caso estático cuanto mayor es el nivel de multitrayecto, la comparación entre dos PSDs diferentes es independiente de la combinación de retardos-amplitudes sobre la que se realice. Es decir, si cierta PSD provoca una mayor diferencia con respecto al caso estático que otra, lo hará sobre todos los canales. Por lo tanto, las conclusiones obtenidas con respecto a los

factores de anchura espectral, asimetría y bondad del ajuste son independientes del tipo de canal utilizado, y en los subsiguientes apartados sólo se muestran los resultados correspondientes al canal *medio*. Todas las curvas obtenidas para el canal medio y todos los espectros Doppler seleccionados se muestran en el Anexo V.

### 3.3.2 Efecto de la anchura espectral y de la distribución espectral de potencia

La Figura 7.11 muestra la curva correspondiente al canal en condiciones estáticas (azul), y al canal con la variabilidad temporal correspondiente a los espectros Doppler estimados “Sel\_10” y “Sel\_03” (morado y verde, respectivamente). Se puede comprobar que la diferencia en SNR para un mismo valor de BER entre la curva estática y las curvas correspondientes a los espectros Doppler es significativamente mayor para el caso del espectro “Sel\_03”, dado que tiene una mayor anchura espectral  $\Delta f$ .

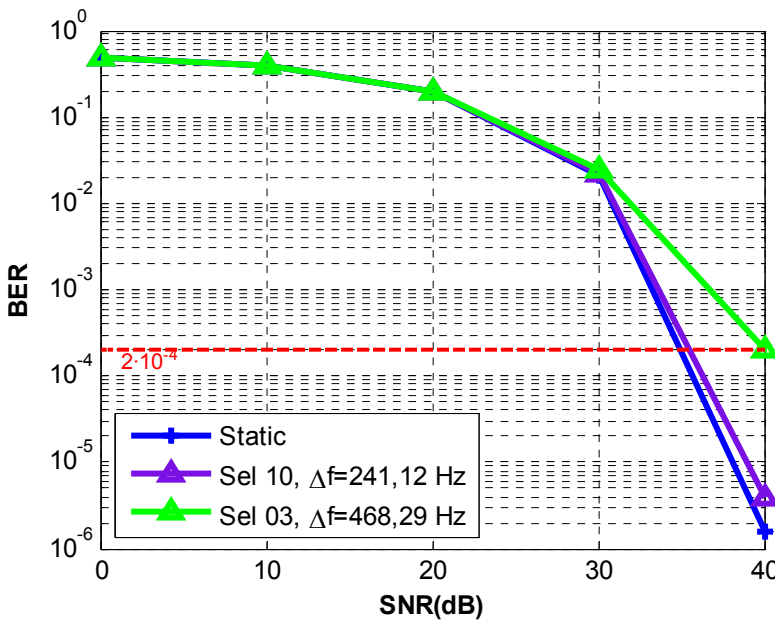
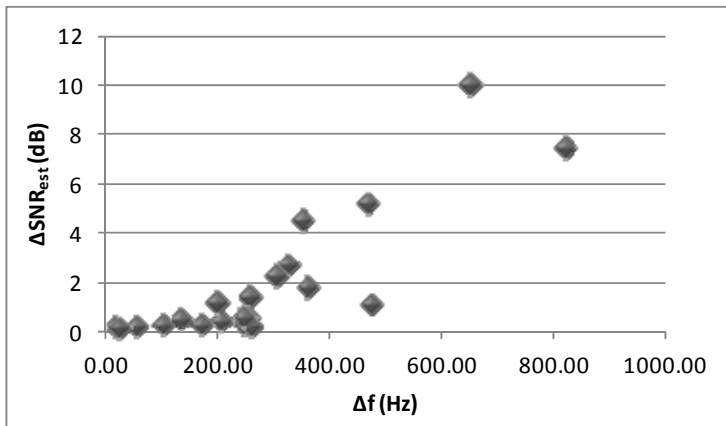


Figura 7.11. Curvas BER frente a SNR para el caso estático y para los espectros Doppler estimados “Sel 10” y “Sel 03” (canal medio)

Tomando como referencia el canal medio estático, la Figura 7.12 muestra las diferencias en valores de SNR correspondientes a un BER de  $2 \cdot 10^{-4}$  para las PSD

seleccionadas en función de su parámetro de anchura espectral  $\Delta f$ . Se puede comprobar que, en los ejemplos de espectro Doppler seleccionados, las diferencias con respecto al caso estático en valores de SNR correspondientes a un BER de  $2 \cdot 10^{-4}$  toman valores entre 0,15 dB y 10,02 dB. En general, la diferencia con respecto al caso estático es mayor cuanto mayor es la anchura espectral. Sin embargo, también se ha de tener en cuenta la densidad espectral de potencia en las frecuencias Doppler más altas. Para ello, se calcula el valor medio de los parámetros de ajuste  $c$  y  $g$ , que tal y como se ha comentado previamente, están relacionados con los valores asintóticos correspondientes a frecuencias infinitas negativa y positiva respectivamente, y por lo tanto dan una idea de los valores de densidad espectral de potencia en las frecuencias límite inferior y superior. Cabe mencionar que, según la definición del modelo incluida en la Ecuación (7.9), valores menores de los parámetros  $c$  y  $g$  suponen mayores densidades espectrales de potencia en los extremos, y viceversa.



**Figura 7.12. Diferencias en SNR con respecto al caso estático ( $\Delta SNR$ ) en función de la anchura espectral ( $\Delta f$ )**

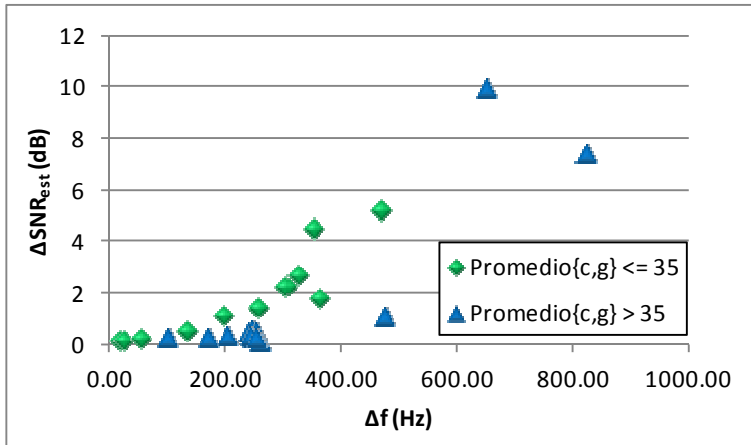
Tomemos como ejemplo dos de las muestras que provocan una mayor diferencia con respecto al caso estático: “Sel\_01” y “Sel\_02”, cuyas anchuras espectrales son respectivamente  $\Delta f_{Sel\_01}=651,11$  Hz y  $\Delta f_{Sel\_02}=821,82$  Hz, y sus diferencias con respecto al caso estático  $\Delta SNR_{Sel\_01}=10,02$  dB y  $\Delta SNR_{Sel\_02}=7,46$  dB (ver Anexo IV). Observando los valores de  $c$  y  $g$  de la curva de ajuste, que proporcionan una idea del nivel de densidad espectral de potencia en los extremos del espectro, se observa que, aún teniendo “Sel\_02” una anchura espectral mayor, “Sel\_01” resulta en una mayor exigencia en términos de SNR dado a sus menores valores de  $c$  y  $g$  (ver Tabla 7.1).

Este efecto se puede comprobar también comparando “Sel\_03” y “Sel\_21”, cuyas anchuras espectrales son prácticamente coincidentes ( $\Delta f_{sel\_03}=468,29$  Hz y  $\Delta f_{sel\_21}=473,87$  Hz), y sin embargo el aumento en SNR con respecto al caso estático es significativamente mayor para “Sel\_03” debido a la mayor densidad espectral de potencia en las frecuencias más altas. La Tabla 7.1 muestra un resumen de los datos comentados:

**Tabla 7.1. Ejemplo de efecto de la anchura espectral y la densidad espectral de potencia en las frecuencias mayores**

	$\Delta SNR$ (dB)	$\Delta f$ (Hz)	c	g
Sel_01	10,02 dB	651,11 Hz	38,05	38,08
Sel_02	7,46 dB	821,82 Hz	51,17	47,15
Sel_03	5,18 dB	468,29 Hz	30,39	29,53
Sel_21	1,13 dB	473,87 Hz	44,62	44,58

Para una representación gráfica de este asunto, los datos de la Figura 7.12 se muestran en la Figura 7.13 en función de sus valores medios de  $c$  y  $g$ : puntos verdes si  $Promedio\{c,g\} \leq 35$ , y puntos azules para  $Promedio\{c,g\} > 35$ . Se puede observar que las diferencias con respecto al caso estático  $\Delta SNR_{est}$  son mayores para los mayores valores de densidad espectral de potencia en las frecuencias límite.



**Figura 7.13. Diferencias en SNR con respecto al caso estático ( $\Delta SNR$ ) en función de la anchura espectral ( $\Delta f$ ) y sus valores  $Promedio\{c,g\}$**

Considerando el efecto conjunto de anchuras espectrales  $\Delta f$  y valores de Promedio  $\{c, g\}$ , los resultados obtenidos se pueden clasificar de acuerdo a los datos recogidos en la Tabla 7.2. Las anchuras espectrales  $\Delta f$  se expresan en función del máximo desplazamiento Doppler para el caso en estudio,  $f_d$ .

**Tabla 7.2. Relaciones entre anchura espectral, densidad espectral de potencia en frecuencias mayores y diferencias en SNR con respecto al caso estático**

$\Delta f$ (Hz)	Promedio $\{c, g\}$	$\Delta SNR$ (dB)
$\Delta f \geq \frac{3}{4} \cdot f_D$	Cualquiera	$> 1$ dB
$\frac{1}{2} \cdot f_D \geq \Delta f > \frac{3}{4} \cdot f_D$	$\leq 35$	$> 1$ dB
	$> 35$	$< 1$ dB
$\Delta f < \frac{1}{2} \cdot f_D$	Cualquiera	$< 1$ dB

Se puede observar que todos los espectros Doppler con anchuras espectrales  $\Delta f \geq \frac{3}{4} \cdot f_D = 330,48$  Hz presentan valores de  $\Delta SNR$  con respecto al caso estático  $\Delta SNR > 1$  dB. De manera análoga, todos los espectros Doppler cuyas anchuras espectrales  $\Delta f < \frac{1}{2} \cdot f_D = 220,32$  Hz presentan diferencias despreciables con respecto al caso estático, con  $\Delta SNR < 1$  dB. Entre estos dos valores de anchura espectral, que la diferencia con respecto al caso estático sea mayor o menor a 1 dB dependerá de la densidad espectral de potencia en las frecuencias más altas.

Se puede concluir por tanto que la anchura espectral es un factor clave a la hora de determinar los espectros Doppler que van a producir una mayor degradación en los sistemas OFDM, así como los valores de densidad espectral de potencia en las frecuencias más altas.

### 3.3.3 Efecto de la asimetría

Los espectros Doppler con mayor grado de asimetría (representado por mayores valores del parámetro  $\gamma$ ) no parecen suponer una mayor degradación a la que correspondería en función de su anchura espectral y su densidad espectral de potencia en los extremos. Se pueden tomar como ejemplo los casos “Selección 10”, “Selección 19” y “Selección 22”, que teniendo similares valores de  $\Delta f$  y Promedio  $\{c, g\}$ , apenas difieren en sus valores  $\Delta SNR$  a pesar de la diferencia en el coeficiente de asimetría que presentan, tal y como se recoge en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Ejemplo de efecto del coeficiente de asimetría

	$\Delta SNR$ (dB)	$\gamma$	$\Delta f$ (Hz)	c	g
Sel_22	0,61 dB	0,06	247,96 Hz	40,20	40,74
Sel_19	0,55 dB	0,10	256,45 Hz	41,87	39,45
Sel_10	0,53 dB	0,31	241,12 Hz	42,64	37,99

### 3.3.4 Bondad del ajuste exponencial

Hasta ahora sólo se han comentado los resultados correspondientes a las curvas BER frente a SNR debidas a los espectros Doppler estimados. Sin embargo, es necesario también valorar la bondad del ajuste exponencial propuesto y examinar las diferencias que puedan existir entre las curvas BER frente a SNR de los espectros estimados y sus correspondientes ajustes exponenciales. Para ello, se toma como referencia el valor de BER de  $2 \cdot 10^{-4}$ , y se calcula la diferencia en los valores de SNR correspondientes a las curvas de las PSDs estimadas y sus ajustes exponenciales, expresándola como  $\Delta SNR_{est-exp}$ .

De los ejemplos obtenidos, se puede comprobar que para ajustes con  $R^2 \geq 0,8$  prácticamente se solapan las curvas correspondientes al espectro estimado a partir de las medidas (limitado en frecuencia) y al ajuste exponencial, siendo la diferencia en SNR en todos los casos  $\Delta SNR_{est-exp} < 0,5$  dB. Cabe recordar que el valor promedio de  $R^2$  de todas las muestras es de 0,87.

Por otra parte, la diferencia entre ambas curvas depende a su vez de la degradación adicional que suponga considerar el espectro Doppler correspondiente. Es decir, en los casos en los que las curvas correspondientes a la PSD estimada y al caso estático prácticamente se solapan, también lo hace la curva correspondiente al ajuste exponencial, incluso cuando los valores de  $R^2 < 0,8$ . Un ejemplo de ello es el espectro correspondiente a “Selección 14”, en el que a pesar de tener un ajuste con  $R^2=0,60$ , la diferencia entre las curvas correspondientes a los espectros estimado y exponencial es despreciable (ver Figura A.41 del Anexo V).

### 3.3.5 Visión general del caso en estudio

Ha de tenerse en cuenta que los 24 espectros Doppler utilizados para las simulaciones buscan casos límite que permitan obtener conclusiones sobre la posible degradación de los sistemas OFDM debida a la variabilidad temporal

introducida por los aerogeneradores, así como su relación con los aspectos expuestos anteriormente.

Sin embargo, estos casos de potencial degradación son escasos dentro del conjunto de datos disponibles. Por ello, aplicando las conclusiones obtenidas en los anteriores subapartados, se puede estimar qué porcentaje de casos de la situación en estudio provocarían una mayor afección a los sistemas OFDM.

Para ello, se considera que el efecto Doppler podría resultar significativo cuando la diferencia en SNR con respecto al caso estático es mayor que 1 dB ( $\Delta SNR_{est} > 1 \text{ dB}$ ). Por el contrario, diferencias menores a 1 dB se consideran despreciables. En lo que respecta a la bondad de ajuste, las diferencias entre las curvas empírica y estimada se consideran aceptables si  $\Delta SNR_{est-exp} < 0,5 \text{ dB}$ . De acuerdo con estos criterios, el porcentaje de espectros Doppler medidos en función de su potencial nivel de degradación y bondad de ajuste se muestra en la Tabla 7.4:

**Tabla 7.4. Porcentaje de medidas en función de la posible degradación de la calidad de recepción y de la bondad del ajuste exponencial**

<b>Degradación <math>\Delta SNR</math></b>	A considerar	9%
	Despreciable	91%
<b>Bondad ajuste</b>	Aceptable	95%
	No aceptable	5%



#### 4. SELECCIÓN DE ESPECTROS DOPPLER PARA EL MODELO DE CANAL

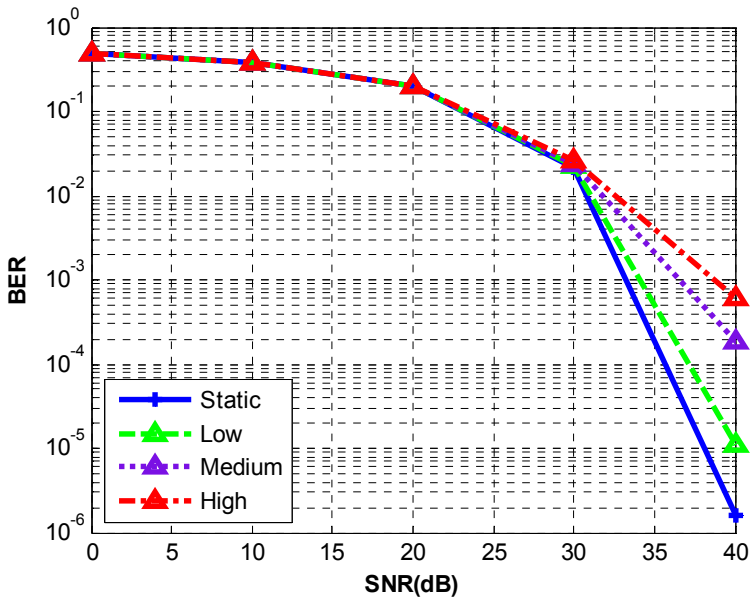
De cara al modelo de canal, se eligen tres ejemplos de PSDs representativas de diferentes niveles de potencial degradación, es decir, diferentes grados de variabilidad del canal, tomando como referencia el parámetro  $\Delta SNR_{est}$ . Estos casos corresponden con los ajustes exponenciales de las medidas “Sel\_01”, “Sel\_03” y “Sel\_23”, que además se caracterizan por altos valores del coeficiente de determinación, lo que asegura la bondad del ajuste. La Tabla 7.5 muestra los parámetros de ajuste de las PSDs seleccionadas, denominadas según su grado de variabilidad como *Alta*, *Media* y *Baja*.

**Tabla 7.5. Parámetros de ajuste de las PSDs seleccionadas para el modelo de canal**

Variabilidad	Parámetros de ajuste						$f_{min}$ (Hz)	$f_{max}$ (Hz)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>g</i>		
Alta	19,7	$1,2 \cdot 10^{-2}$	38,0	21,4	$1,3 \cdot 10^{-2}$	38,1	-337,3	313,9
Media	22,0	$1,7 \cdot 10^{-2}$	30,4	25,1	$2,3 \cdot 10^{-2}$	29,5	-256,2	212,1
Baja	22,9	$4,6 \cdot 10^{-2}$	24,9	23,2	$4,5 \cdot 10^{-2}$	25,0	-99,4	99,9

El comportamiento de las curvas de BER frente a SNR de los ajustes exponenciales correspondientes a estos tres casos sobre el canal medio se muestra en la Figura 7.14. Los valores de  $\Delta SNR_{est}$  correspondientes a los casos de variabilidad *Alta*, *Media* y *Baja* son  $\Delta SNR_{est\_alto}=10,02$  dB,  $\Delta SNR_{est\_medio}=5,18$  dB y  $\Delta SNR_{est\_bajo}=1,16$  dB respectivamente.

Para la aplicación de las PSDs seleccionadas en el modelo de canal, se expresan los ajustes exponenciales anteriores en función de la frecuencia Doppler biestática máxima  $f_{B\_max}$  correspondiente a cada uno de ellos. Como se ha comentado anteriormente, esta frecuencia Doppler biestática máxima depende de las características del aerogenerador (longitud de las aspas y máxima velocidad de rotación), de la frecuencia de trabajo y de la posición angular del receptor con respecto a transmisor y receptor (ver Ecuación (7.8)). Expresar los espectros seleccionados en función de  $f_{B\_max}$  permite que puedan adaptarse a las características concretas del parque eólico y la geometría relativa entre transmisor, turbina y receptor de cualquier nuevo caso de estudio.



**Figura 7.14. Curvas BER frente a SNR sobre canal medio de los ajustes exponenciales seleccionados para el modelo de canal**

Finalmente, los espectros representativos de un caso de variabilidad alta, media y baja (expresados en dB/Hz) se muestran en la Tabla 7.6:

**Tabla 7.6. Espectros Doppler representativos para el modelo de canal**

Variabilidad alta	
$S_{high}(f) = \begin{cases} 19,7 \exp(4,5 \cdot f / f_{B\_max}) - 38,0 & -0,9 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 21,4 \exp(-4,8 \cdot f / f_{B\_max}) - 38,1 & 0 < f \leq 0,9 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	
Variabilidad media	
$S_{medium}(f) = \begin{cases} 22,0 \exp(6,1 \cdot f / f_{B\_max}) - 30,4 & -0,7 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 25,1 \exp(-10,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 29,5 & 0 < f \leq 0,6 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	
Variabilidad baja	
$S_{low}(f) = \begin{cases} 22,9 \exp(17,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 24,9 & -0,3 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 23,2 \exp(-8,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 25,0 & 0 < f \leq 0,3 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	

## 5. CONCLUSIONES

---

En este capítulo se ha presentado la caracterización Doppler de las señales dispersadas por los aerogeneradores. Para ello, se ha demostrado la idoneidad de utilizar el método de Welch adaptando sus parámetros a las condiciones concretas de cada medida para calcular la densidad espectral de potencia Doppler.

Posteriormente, se ha llevado a cabo una evaluación de los modelos de caracterización de espectros Doppler existentes, concluyéndose que ninguno de ellos se adapta a las condiciones especiales de movilidad del canal de propagación en presencia de un parque eólico. Por ello, se ha propuesto un nuevo modelo que se caracteriza por una componente principal en la frecuencia Doppler cero, y componentes laterales de densidad espectral de potencia decreciente. La componente de máxima amplitud está asociada al mástil, que es el elemento estático que más contribuye a la señal dispersada por el aerogenerador, mientras que las componentes laterales responden a la señal dispersada por las aspas durante el movimiento de rotación.

Este nuevo modelo exponencial sirve, en una primera aproximación, para limitar los espectros en frecuencia y así filtrar el ruido, y posteriormente, para caracterizar el espectro una vez limitado en frecuencia. Las frecuencias mínima y máxima de cada espectro vendrán determinadas por la velocidad de las aspas durante la captura de la señal, la orientación del rotor, y la disposición relativa entre transmisor, aerogenerador y receptor. El valor medio del coeficiente de determinación  $R^2 = 0,87$  demuestra la bondad del ajuste propuesto.

Con objetivo de analizar qué tipo de espectros dentro de los obtenidos podrían afectar a la calidad de recepción de sistemas basados en OFDM, y validar la bondad del ajuste exponencial, se han llevado a cabo simulaciones de curvas BER frente a SNR. Como conclusiones principales, cabe destacar que uno de los factores más críticos es la anchura espectral, así como la densidad espectral de potencia en las frecuencias más altas. Se ha corroborado además la bondad del ajuste exponencial, ya que tanto los espectros reales como sus aproximaciones exponenciales dan lugar a curvas de degradación prácticamente coincidentes en una amplia mayoría de los casos.

Además, cabe destacar que generalizando los datos obtenidos al conjunto de datos disponible, parece que la variabilidad temporal de las señales no supondría una degradación adicional de la calidad destacable en un alto porcentaje de los casos.

Por último, el análisis realizado ha permitido seleccionar tres espectros Doppler representativos de tres situaciones de variabilidad alta, media y baja, que serán utilizados para representar la variabilidad temporal del modelo de canal planteado en el siguiente capítulo.

*I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea-shore, and diverting myself in now and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me.*

*- Isaac Newton*

---

## **CAPÍTULO 8: MODELO DE CANAL DE PROPAGACIÓN EN PRESENCIA DE PARQUES EÓLICOS**

---

En el presente capítulo, y basándose en las conclusiones obtenidas en los Capítulos 6 y 7, se realiza la propuesta de modelo de canal para caracterizar la propagación en presencia de un parque eólico. A diferencia de los modelos de canal comúnmente utilizados, el modelo de canal propuesto se adapta a las características propias de cada caso en estudio.



## 1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE CANAL

---

El modelo de canal propuesto es un canal de tipo *tapped delay-line* (TDL), que permite caracterizar, para un servicio de recepción fija en entorno rural, el canal multitrayecto discreto variante con el tiempo típico de la zona de *backscattering* en las cercanías de un parque eólico. Este modelo de canal será de aplicación cuando un transmisor de cierto servicio ofrecido en la banda UHF se encuentre en situación de campo cercano con respecto a los aerogeneradores de un parque eólico. Es precisamente bajo la condición de campo cercano cuando los casos de estudio de una posible degradación del servicio son de especial interés. De hecho, en condiciones de campo lejano, la distancia entre el transmisor y el aerogenerador hace que la potencia recibida en el aerogenerador sea tan pequeña que el efecto de la señal dispersada es despreciable.

Este modelo se adapta a las características concretas del parque eólico, el transmisor y el punto de recepción que se quieran estudiar. En concreto, para un determinado transmisor que pudiera estar potencialmente afectado por la presencia de un parque eólico, y para cada uno de los puntos de recepción incluidos dentro de su zona de cobertura, se obtendría un modelo de canal de tipo TDL, definiendo:

- El número de componentes multitrayecto, dado, en una primera aproximación, por el número de aerogeneradores que conformen el parque eólico.
- El retardo de cada una de estas componentes, obtenido a partir de la diferencia en distancia entre los trayectos directo (transmisor-receptor) e indirecto (transmisor-turbina-receptor).
- La amplitud de cada una de las componentes multicamino, correspondiente a la potencia media de la señal dispersada por el aerogenerador y captada en el punto de recepción. Esta amplitud media viene dada por la señal dispersada por el mástil del aerogenerador.
- El espectro Doppler que caracterice la distribución espectral de la potencia de la señal dispersada, y permita por tanto determinar la variabilidad temporal de cada una de las componentes multicamino. Este espectro Doppler representa la variabilidad temporal de las componentes multitrayecto debida a la rotación de las aspas.

Es por ello que el modelo de canal propuesto requiere de un conjunto de datos de partida que especifiquen las particularidades de cada caso en estudio. Este conjunto de datos se detalla en la sección siguiente.

### 1.1 Datos de partida

Los datos de partida necesarios para adaptar el modelo de canal propuesto a las características concretas de un caso en estudio se recogen en la Tabla 8.1:

**Tabla 8.1. Datos de partida para adaptar el modelo de canal a un caso en estudio**

	Tipo	Descripción
De cada aerogenerador	Datos de posicionamiento	Coordenadas de posición UTM (m), incluyendo cota
	Altura del mástil	Dimensión vertical del mástil (m)
	Diámetros inferior y superior del mástil	Dimensión de los diámetros inferior y superior del mástil (m), normalmente diferentes por ser el mástil una torre tubular troncocónica
	Longitud de las palas	Dimensión longitudinal de las palas (m)
	Velocidad máxima de giro, $w_{max}$	Velocidad máxima de rotación de las aspas (rpm)
Transmisor	Datos de posicionamiento	Coordenadas de posición UTM (m), incluyendo cota
	Diagrama de radiación	Diagrama de radiación del sistema radiante del transmisor, incluyendo su valor de ganancia máxima
	Altura de la antena	Altura del sistema radiante de transmisión dentro de la torre de telecomunicaciones (m)
	Frecuencia, $f$	Frecuencia de trabajo, dentro de la banda UHF, del servicio transmitido (Hz)
	Potencia, $P_f$	Potencia de transmisión del transmisor (W)
Receptor	Datos de posicionamiento	Coordenadas de posición UTM (m), incluyendo cota
	Diagrama de radiación	Diagrama de radiación del sistema radiante del receptor, incluyendo su valor de ganancia máxima
	Altura de la antena	Altura del sistema radiante de recepción (m)

A partir de los datos recogidos en la Tabla 8.1, se pueden calcular el resto de parámetros necesarios para adaptar el modelo de canal (ver Tabla 8.2):



**Tabla 8.2. Datos obtenidos a partir de los datos de partida recogidos en la Tabla 8.1**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción</b>
$R_{tx-aero}$	Distancia transmisor-aerogenerador, para cada aerogenerador
$R_{aero-rx}$	Distancia aerogenerador-receptor, para cada aerogenerador
$R_{tx-rx}$	Distancia transmisor-receptor
$G_{tx-aero}$	Ganancia del sistema radiante del transmisor en dirección al aerogenerador, para cada aerogenerador
$G_{rx-aero}$	Ganancia del sistema radiante del receptor en dirección al aerogenerador, para cada aerogenerador
$G_{tx-rx}$	Ganancia del sistema radiante del transmisor en dirección al receptor
$G_{rx-tx}$	Ganancia del sistema radiante del receptor en dirección al transmisor (ganancia máxima, al estar la antena apuntada hacia el transmisor)
$a$	Radio medio del mástil
$L$	Longitud de la superficie inclinada del mástil troncocónico
$\phi_r$	Ángulo biestático en el plano horizontal (transmisor-turbina-receptor), para cada aerogenerador y punto de recepción
$\theta_t$	Posición angular del transmisor en el plano vertical, con respecto a cada aerogenerador
$\theta_r$	Posición angular del receptor en el plano vertical, para cada punto de recepción y respecto a cada aerogenerador

## 2. PROPUESTA DEL MODELO DE CANAL

---

En esta sección se describe cómo aplicar el modelo de canal propuesto para un caso de estudio determinado. En concreto, se detalla cómo obtener los parámetros del modelo de canal TDL (número de trayectos, retardo y amplitud media de cada uno de estos trayectos, y espectro Doppler) que corresponderían a un determinado punto de recepción.

Una posible manera de aplicar el modelo de canal es utilizar una base digital del terreno para dividir la zona de cobertura analizada en una rejilla con cierta precisión. Para cada uno de los puntos centrales de la rejilla, se calcularían los parámetros correspondientes para adaptar el modelo de canal a las condiciones de ese punto de recepción. Este proceso se puede implementar fácilmente en herramientas de simulación o planificación.

### 2.1 Número de trayectos

En cuanto al número de trayectos, en una primera aproximación ha de considerarse el número total de aerogeneradores que componen el parque eólico. En función de los resultados obtenidos en el cálculo de retardos y amplitudes que recogen los siguientes apartados, el número de trayectos puede verse reducido.

### 2.2 Retardos relativos de los trayectos

Para cada uno de los aerogeneradores del parque eólico, ha de calcularse el retardo relativo de la señal dispersada, teniendo en cuenta la diferencia en distancia entre el trayecto directo (transmisor-receptor) y el trayecto de la señal dispersada (transmisor-turbina y turbina-receptor) según la Ecuación (8.1):

$$\tau_i = \frac{(R_{tx-aero} + R_{aero-rx} - R_{tx-rx})}{c} \quad (8.1)$$

Donde  $\tau_i$  representa al retardo relativo correspondiente a la señal dispersada por el aerogenerador  $i$ ,  $R$  representa las diferentes distancias y  $c$  la velocidad de luz (ver Tabla 8.2).

Al adaptar los retardos a múltiplos del periodo de muestreo utilizado para las simulaciones [55],[171], dependiendo de la configuración del parque eólico y la posición del transmisor, puede que los trayectos correspondientes a dos

aerogeneradores diferentes presenten el mismo valor de retardo. En ese caso, se recomienda pasar al punto siguiente, en el cual se calculan las amplitudes de las señales dispersadas, y tomar para ese retardo la señal dispersada de mayor amplitud.

### 2.3 Amplitud media de los trayectos

El cálculo de la amplitud media de los trayectos viene dado por la relación entre la potencia recibida directamente desde el transmisor,  $P_{tx-rx}$ , y la potencia recibida tras ser dispersada en el aerogenerador,  $P_{aero-rx}$ .

La potencia recibida en el punto de recepción desde el transmisor,  $P_{tx-rx}$  se calcula en función de la distancia  $R_{tx-rx}$  la ganancia del transmisor hacia el receptor, la ganancia del receptor hacia el transmisor, la frecuencia de trabajo, y las pérdidas por propagación correspondientes (ver Tabla 8.2). Si sólo se consideran las pérdidas por espacio libre, la potencia en recepción se puede calcular mediante la Ecuación (8.2):

$$P_{tx-rx} = \frac{P_t G_{tx-rx} G_{rx-tx} \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{tx-rx}^2} \tag{8.2}$$

Para el cálculo de la potencia recibida tras ser dispersada en el aerogenerador,  $P_{aero-rx}$ , se hace uso del modelo de dispersión TSR definido en esta tesis. Así, para cada turbina del parque eólico, en función de la posición de transmisor, aerogenerador y receptor, tomando como referencia en cada aerogenerador la mitad de la altura del mástil, se calcula el ángulo de incidencia en el plano vertical  $\theta_t$ , así como la posición angular del receptor tanto en el plano horizontal  $\phi_r$  como en el plano vertical  $\theta_r$ . La primera comprobación ha de ser si las posiciones angulares calculadas están dentro de los límites de aplicación del modelo recogidos en la Tabla 8.3.

**Tabla 8.3. Límites de aplicabilidad del modelo de dispersión TSR**

<b>Incidencia</b>	$70^\circ < \theta_t < 110^\circ$	
<b>Recepción</b>	$-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$	$(160^\circ - \theta_t) < \theta_r < (200^\circ - \theta_t)$

Posteriormente, haciendo uso de la ecuación radar biestática [5],[6],[66],[101] se calcula la potencia de la señal dispersada en el punto de recepción  $P_{aero-rx}$ , según la Ecuación (8.3):

$$P_{aero-rx} = \frac{P_t G_{tx-aero} G_{rx-aero} \lambda^2 \sigma_{\phi_r, \theta_t}}{(4\pi)^3 R_{tx-aero}^2 R_{aero-rx}^2} \quad (8.3)$$

Donde  $P_t$  es la potencia del transmisor,  $G$  hace referencia a las diversas ganancias de los diagramas de radiación del transmisor o receptor en las direcciones indicadas en sus subíndices (ver Tabla 8.2),  $R$  se refiere a las distancias entre los elementos indicados por su subíndices (ver Tabla 8.2),  $\lambda$  es la longitud de onda y  $\sigma_{\phi_r, \theta_t}$  la sección radar del mástil en la dirección de recepción.

La sección radar biestática del mástil en la dirección de recepción se calcula según la Ecuación (8.4):

$$\sigma_{\phi_r, \theta_t} = kaL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t \quad (8.4)$$

Donde  $k=2\pi/\lambda$ ,  $a$  es el radio medio del mástil,  $\theta_t$  es el ángulo de incidencia en el plano vertical,  $\phi_r$  la posición angular del receptor en el plano horizontal y  $L_{nf}$  se calcula según la Ecuación (8.5):

$$L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R_{tx-aero}}{2}} \quad (8.5)$$

Otras consideraciones a tener en cuenta en el cálculo de la amplitud media de los trayectos:

- El modelo propuesto presupone que todo el mástil del aerogenerador, o al menos un alto porcentaje, se encuentra iluminado por la señal procedente del transmisor. Es por ello que también se ha de comprobar esta condición, analizando el diagrama de dispersión de la antena transmisora. En caso de que así sea, se recomienda tomar como ganancia del transmisor hacia el aerogenerador  $G_{tx-aero}$  el valor máximo del sector del diagrama de radiación que incida sobre el mástil.
- La antena del receptor estará orientada hacia el transmisor, por lo que la ganancia  $G_{rx-WT}$  será en general menor a la ganancia máxima del diagrama de radiación.
- En caso de que alguno de los trayectos pueda presentar pérdidas de propagación por difracción, se pueden calcular estas pérdidas según los métodos recogidos en la Rec. UIT-R P.526 [176] o similares, y considerarlas para el cálculo de las potencias.

- Relaciones de potencia  $P_{aero-rx} / P_{tx-rx}$  menores a -45 dB se pueden considerar despreciables. También han de considerarse despreciables las potencias procedentes del aerogenerador que se encuentren por debajo del umbral de ruido.

## 2.4 Espectro Doppler

El modelo de canal propuesto incluye el efecto de la variabilidad del canal mediante la introducción de un espectro Doppler que se asocia a cada componente multirayecto.

Para ello, se proporcionan tres ejemplos representativos de espectro Doppler. Estos espectros Doppler representan la variabilidad temporal de la señal dispersada por el aerogenerador al rotar sus aspas. Además, cada uno de estos espectros da cuenta de un determinado grado de variabilidad del canal. Para un mismo punto de recepción, el grado de variabilidad dependerá de las condiciones concretas de viento (orientación y velocidad de rotación).

Es decir, teniendo en cuenta que el espectro Doppler representa la variabilidad de la señal dispersada al rotar las aspas, y los tres ejemplos corresponderían a diferentes situaciones de orientación del rotor y velocidad de las aspas, a través de los tres espectros Doppler propuestos se tienen en cuenta las principales características de los movimientos del aerogenerador: rotación de las aspas, velocidad de rotación de las aspas y orientación del rotor con respecto al viento.

Los ejemplos de espectro Doppler propuestos se adaptan a las condiciones particulares del parque eólico (velocidad máxima de rotación, longitud de pala) y del punto de recepción (ubicación relativa con respecto a transmisor y aerogenerador). Para ello, se debe calcular la frecuencia Doppler biestática máxima  $f_{B\_max}$ , según la Ecuación (8.6):

$$f_{B\_max} = \frac{2w_{max}l}{\lambda} \cos(\phi_r / 2) \quad (8.6)$$

Donde  $w_{max}$  es la velocidad de rotación máxima de las aspas del aerogenerador,  $l$  la longitud de la pala,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\phi_r$  el ángulo biestático en el plano horizontal (transmisor-turbina-receptor).

Los espectros representativos de los casos de variabilidad del canal alta, media y baja (expresados en dB/Hz) se muestran en la Tabla 8.4:

**Tabla 8.4. Espectros Doppler representativos para el modelo de canal**

<b>Variabilidad alta</b>	
$S_{high}(f) = \begin{cases} 19,7 \exp(4,5 \cdot f / f_{B\_max}) - 38,0 & -0,9 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 21,4 \exp(-4,8 \cdot f / f_{B\_max}) - 38,1 & 0 < f \leq 0,9 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	
<b>Variabilidad media</b>	
$S_{medium}(f) = \begin{cases} 22,0 \exp(6,1 \cdot f / f_{B\_max}) - 30,4 & -0,7 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 25,1 \exp(-10,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 29,5 & 0 < f \leq 0,6 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	
<b>Variabilidad baja</b>	
$S_{low}(f) = \begin{cases} 22,9 \exp(17,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 24,9 & -0,3 \cdot f_{B\_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 23,2 \exp(-8,9 \cdot f / f_{B\_max}) - 25,0 & 0 < f \leq 0,3 \cdot f_{B\_max} \end{cases}$	

### 3. CONCLUSIONES

---

La descripción general del modelo de canal TDL propuesto es la siguiente. Para cada punto de recepción, en una primera aproximación, se obtiene el número de componentes multitrayecto en función del número de aerogeneradores del parque eólico cuyas zonas de *backscattering* incluyan ese punto de recepción. Posteriormente, los retardos de cada componente multitrayecto se calculan en función de la disposición relativa del transmisor, cada turbina, y el receptor. La amplitud media de cada componente se calcula haciendo uso del modelo de dispersión TSR y, finalmente, la variabilidad del canal debida a las diferentes orientaciones del aerogenerador y rotación de las aspas se refleja en tres ejemplos de densidad espectral de potencia Doppler.

El modelo TDL propuesto es, por lo tanto, adaptable a las condiciones particulares de cada caso en estudio: número de aerogeneradores, dimensiones de los mismos, velocidad máxima de rotación de las aspas, características del transmisor y el receptor, frecuencia de trabajo, etc.

Para la aplicación del modelo de canal propuesto, se contemplan dos tipos de escenarios: planificación de un nuevo servicio en una zona con la presencia de un parque eólico, o evaluación del posible impacto de un parque eólico sobre servicios de telecomunicaciones existentes previamente a su implantación.

En caso de planificar un nuevo servicio, sería necesario estimar la potencia de transmisión necesaria para alcanzar del objetivo de calidad específico del servicio. Cabe destacar que en este caso un aumento de potencia del transmisor no siempre es la solución, ya que se ha de disminuir la potencia que incide en los aerogeneradores, aumentando en la medida de lo posible la potencia transmitida hacia los usuarios del servicio.

Si se trata de evaluar el impacto de un parque y se determina que podría haber una degradación del servicio ofrecido, se pueden plantear algunas medidas preventivas, como la reubicación o cambio de dimensiones de algunos aerogeneradores del parque eólico, modificación del diagrama de radiación del transmisor, etc.

Por último, cabe mencionar que a pesar de que parte del estudio realizado se ha desarrollado basándose en señales medidas de DVB-T, el modelo de canal propuesto es independiente del estándar y por tanto aplicable a cualquier servicio proporcionado en la banda de UHF.





*Science is always wrong. It never solves a problem without creating ten more.*  
- *George Bernard Shaw*

---

## **CAPÍTULO 9: APORTACIONES DE LA TESIS Y LÍNEAS FUTURAS**

---

En este último capítulo se recopilan las aportaciones más significativas de la tesis, se comenta la difusión de los resultados realizada y se presentan las líneas futuras a desarrollar.



## 1. APORTACIONES DE LA TESIS

---

Las conclusiones de esta tesis se pueden clasificar en seis apartados, acorde con los objetivos parciales planteados en el Capítulo 1:

### **Definición de la metodología del análisis empírico para la caracterización de la señal dispersada por los aerogeneradores**

---

Se ha definido una metodología que permite, a partir de emisiones de DVB-T comerciales, caracterizar la señal dispersada por los aerogeneradores. A partir de la información contenida en las portadoras piloto de la señal DVB-T, se ha descrito cómo obtener la respuesta impulsional del canal y cómo identificar las contribuciones correspondientes a cada aerogenerador a partir de sus posiciones relativas. La ventaja principal de la metodología propuesta es que no es necesario disponer de emisiones de prueba o equipamiento de transmisión específico para la realización de las pruebas. Además, permite analizar tanto el diagrama de dispersión de los aerogeneradores, como la variabilidad temporal de las señales dispersadas a través de su espectro Doppler.

La validez de esta metodología se ha comprobado a través de la detallada planificación y realización de dos campañas de medidas en las cercanías de un parque eólico. La planificación de la campaña ha incluido aspectos relativos a la definición de requerimientos de las medidas, selección de ubicaciones de medida y determinación del tipo de medidas a realizar.

Los datos obtenidos en las campañas de medida han sido procesados, filtrados y clasificados, para lo cual se ha diseñado software específico, obteniéndose una amplia base de datos sobre la cual se sustenta el análisis posterior.

### **Evaluación empírica del impacto de un parque eólico en la calidad de recepción del servicio de DVB-T**

---

A través de las medidas empíricas de los umbrales de C/N para recepción QEF, se ha demostrado que la presencia de parques eólicos puede resultar en una situación de propagación más exigente en términos de C/N que los canales utilizados para evaluar el estándar DVB-T. Se han relacionado además estos incrementos en los umbrales de C/N con las características del canal de propagación presente. Para ello, se han definido dos parámetros para

caracterizar el canal multirrayecto: *potencia multirrayecto* y *desviación estándar media*.

De esta manera, se ha obtenido que valores de *potencia multirrayecto* por encima de -15 dB presentan umbrales de C/N mayores que 19,3 dB (valor umbral teórico para un canal Rice, incluidas las pérdidas de implementación), incluso en situaciones con valor de *desviación estándar media* bajo. En términos generales, las medidas con valores de *potencia multirrayecto* por debajo de -15 dB presentan incrementos de la C/N umbral necesaria sólo con valores altos de desviación estándar media. Como guía simple para evaluar la potencial degradación en los umbrales de recepción de DVB-T en presencia de un parque eólico, se pueden considerar los valores recogidos en la Tabla 9.1.

**Tabla 9.1. Conclusiones de la evaluación empírica de la degradación en los umbrales de recepción de DVB-T**

Potencia multirrayecto	Incremento máximo del umbral de C/N sobre el umbral C/N teórico de un canal Rice
$P_{mult} \geq -15$ dB	9,1 dB
$-15$ dB $> P_{mult} \geq -25$ dB	6,6 dB
$-25$ dB $> P_{mult} \geq -35$ dB	2,4 dB

Por último, el efecto sobre la calidad DVB-T de las señales dispersadas parece ser despreciable en la región de *forward scattering*.

**Caracterización de la naturaleza de la señal dispersada por un parque eólico**

Mediante el análisis de las señales dispersadas por los aerogeneradores obtenidas de la campaña de medidas, se ha podido observar la variabilidad de las señales debida a los diferentes movimientos del rotor (orientación con respecto al viento, variación del ángulo de ataque de las aspas y rotación). De este estudio se puede concluir que la mayor variabilidad de las señales dispersadas se debe al movimiento de rotación de las aspas. Además, la orientación del rotor con respecto al viento afecta a la amplitud de las variaciones causadas por el movimiento de rotación. Finalmente, el efecto del ángulo de ataque de las aspas sobre la señal dispersada parece ser despreciable.

Por otra parte, la caracterización del diagrama de dispersión del aerogenerador y sus componentes mediante simulaciones de óptica física ha

demostrado la importancia de la señal dispersada por el mástil, que había sido obviada en los modelos teóricos de dispersión existentes hasta el momento.

### **Obtención de un nuevo modelo de dispersión de señal para los aerogeneradores en la banda UHF**

---

La dispersión de señal sobre la estructura de los aerogeneradores es un fenómeno complejo, por lo que su análisis empírico debe considerar múltiples aspectos: las características del transmisor, las diferentes partes de las que se compone la turbina y sus distintos movimientos, la geometría relativa entre transmisor, turbina y receptor, etc.

La evaluación empírica de los modelos de dispersión existentes ha puesto de manifiesto las limitaciones detectadas en el análisis teórico de los mismos, demostrando que no ofrecen resultados precisos para estimar la señal dispersada por un parque eólico actual.

Este hecho, junto con las conclusiones obtenidas al evaluar el diagrama de dispersión del aerogenerador mediante simulaciones, conduce a proponer un nuevo modelo de dispersión basado en la dispersión debida al mástil, representado mediante un cilindro circular. El denominado *modelo de dispersión TSR*, considera además las condiciones de campo cercano, pues es en esta situación cuando tienen lugar los casos de afección sobre la calidad de los servicios en la banda UHF.

### **Caracterización del espectro Doppler de las variaciones temporales de la señal dispersada debidas a la rotación de las aspas**

---

A partir de las respuestas impulsionales de canal complejas obtenidas mediante medida de señales DVB-T, se han estimado las densidades espectrales de potencia Doppler de las señales dispersadas por los aerogeneradores. Para ello, se ha utilizado el método de Welch, ajustando sus parámetros a las características de la variabilidad temporal de las señales a estudiar.

Posteriormente, tras estudiar los modelos de espectro Doppler comúnmente utilizados y comprobar que no encajan con los espectros obtenidos, se ha propuesto un nuevo modelo de ajuste. Este nuevo modelo, expresado en dB/Hz, se caracteriza por una componente principal de 0 dB/Hz en la frecuencia de 0 Hz, que corresponde a la señal dispersada por el mástil, y densidades espectrales de potencia exponencialmente decrecientes hacia las

frecuencias mayores (o menores en el caso del eje negativo de frecuencia), que corresponden a la señal dispersada por las aspas durante el movimiento de rotación.

Este modelo de ajuste permite, en una primera aproximación, limitar el espectro obtenido en frecuencia para filtrar el ruido, y en un segundo paso, caracterizar la forma de todas las PSD estimadas.

Con objeto de validar el ajuste propuesto y analizar las características espectrales que más pudieran afectar a los sistemas con modulación OFDM, como es el caso de DVB-T, se han realizado simulaciones de curvas BER frente a SNR de una selección de PSDs y sus correspondientes ajustes del modelo exponencial.

De esta manera se ha comprobado que el parámetro más crítico en la posible degradación de la calidad del servicio es la anchura espectral, junto con el nivel de densidad espectral de potencia en las frecuencias más altas. Sin embargo, únicamente un 9% de los espectros Doppler estimados causaría una diferencia crítica con respecto al caso estático.

En cuanto a la bondad del ajuste, se comprueba que para el 95% de las densidades espectrales de potencia Doppler estimadas, el ajuste exponencial propuesto puede calificarse como bueno.

Basándose en los resultados obtenidos, se han seleccionado tres ejemplos de espectros Doppler que caracterizan tres grados diferentes de variabilidad del canal, y con ello, tres niveles diferentes de posible afección sobre un servicio proporcionado en esta banda de frecuencias.

#### **Propuesta de un modelo de canal para caracterizar la señal dispersada por un parque eólico en la banda UHF**

---

Como conclusión final, cabe destacar que se ha propuesto un *modelo de canal para caracterizar la señal dispersada por un parque eólico en la banda UHF*, un estudio que la UIT lleva años reclamando.

Este modelo es de aplicación para servicios de recepción fija, ya que la variabilidad del canal es la propia del movimiento de los aerogeneradores, y no del movimiento de receptor. Además, considera situación de campo cercano entre el transmisor y los aerogeneradores, condición que ha demostrado ser más crítica en la posible degradación de los servicios ofrecidos en esta banda de frecuencias.

El modelo de canal propuesto es de tipo TDL, y representa el canal multitrayecto típico de la zona de *backscattering* que tiene lugar en los alrededores de un parque eólico situado cerca de un transmisor. En este modelo, la amplitud de las señales dispersadas para cada punto de recepción, y la variabilidad temporal del canal varía tanto para cada punto de recepción como dependiendo de las condiciones de funcionamiento del aerogenerador.

El modelo de canal propuesto es, por lo tanto, adaptable a cada caso en estudio, ya que permite calcular los retardos de los diferentes trayectos y su amplitud en función de las condiciones concretas del transmisor, el parque eólico y el punto de recepción considerados. Además ofrece un modelo de espectro Doppler empírico que puede ajustarse también a las características de los aerogeneradores y a la frecuencia de trabajo.

A pesar de que parte del estudio presentado se ha basado en medidas de señal DVB-T, el modelo de canal propuesto es independiente del estándar y por tanto aplicable a cualquier otro estándar de televisión terrestre o servicio ofrecido en la banda UHF.

## 2. LÍNEAS FUTURAS

---

Tomando como punto de partida los resultados obtenidos en la presente tesis, los pasos siguientes más inmediatos deberían ir encaminados hacia completar y validar el trabajo realizado hasta ahora:

- Validar y ampliar el modelo de dispersión y la caracterización del espectro Doppler a la totalidad de la banda utilizada para difusión del servicio de televisión. En el momento de realizar las medidas recogidas en esta Tesis, las emisiones de DVB-T de la zona en estudio se limitaban a los canales C61 y C63 (794 y 810 MHz). Actualmente, se dispone de emisiones comerciales en canales como el C22 (482 MHz) y C38 (610 MHz).
- Ampliar la casuística en cuanto a modelos de aerogenerador, especialmente en lo relativo a dimensiones de mástil y palas, y en cuanto ubicaciones relativas entre transmisor, parque eólico y puntos de recepción, mediante la realización de medidas en las cercanías de otros parques eólicos.
- Ampliar la caracterización de la señal dispersada. La caracterización del modelo de canal en presencia de aerogeneradores se ha centrado en las ubicaciones relativas transmisor-turbina-receptor que dan lugar al canal multitrayecto dinámico que puede producir una mayor degradación en el sistema DVB-T. Sin embargo, la situación que se produce en la zona de sombra del parque eólico o zona de *forward scattering*, no ha sido caracterizada en detalle. Si bien parece que los efectos sobre la calidad de recepción de DVB-T son despreciables, la reducción de potencia añadida a la variabilidad de la señal debida a la rotación de las aspas en esta zona podría causar problemas de recepción en otros estándares, como ATSC [172].
- Estudiar los posibles efectos acumulativos de la señal dispersada por un aerogenerador en la señal dispersada por otros del mismo parque eólico.
- Incluir los efectos de propagación en la aplicación del modelo de dispersión, por ejemplo, propagación tierra-mar para el caso de los aerogeneradores *off-shore*.
- Evaluar la degradación sobre otros estándares de televisión. Se habría de realizar este análisis de degradación del servicio para las otras posibles configuraciones del sistema DVB-T, para el sistema de segunda generación DVB-T2, otros sistemas de televisión como ATSC, ISDB-T o DMB-T/H [173]-[175], etc.



- Ampliar el análisis a otras tecnologías, estudiando el impacto en la telefonía móvil y en los nuevos sistemas de comunicaciones móviles que ocuparán parte del espectro actualmente en uso por la TDT, tras el proceso conocido como dividendo digital.
- Implementar los resultados obtenidos en la herramienta  $Wi^2$ , de forma que se facilite la transferencia tecnológica a empresas y organismos regulatorios: algoritmos que permitan la realización de estudios de impacto, presentación de los modelos de canal y del impacto sobre diferentes estándares, así como el desarrollo de reglas de protección (distancias mínimas a respetar, relación de potencias transmitidas y umbrales de calidad de cada estándar, etc.) en los estudios de impacto de parques eólicos.

### 3. DIFUSIÓN DE RESULTADOS

---

Parte del trabajo recogido en esta Tesis ha dado lugar a varias publicaciones en organismos de regulación y revistas internacionales, así como ponencias en congresos internacionales y nacionales.

#### 3.1 Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT

**Título:** “Recommendation ITU-R BT.1893. Assessment of impairment caused to digital television reception by a wind turbine.”

**Lugar:** Reunión del Grupo de Trabajo 6A de la UIT-R en Ginebra, Suiza

**Fecha:** Mayo de 2011

**Aportaciones:** Tras varias aportaciones a la UIT con el trabajo realizado en esta tesis, la Rec. UIT-R BT.1893 incluye en su Anexo 2 los resultados preliminares sobre el potencial impacto de los aerogeneradores sobre la calidad de recepción de DVB-T en la banda UHF.

---

**Título:** “Report ITU-R BT.2142-1. The effect of the scattering of digital television signals from a wind turbine.”

**Lugar:** Reunión del Grupo de Trabajo 6A de la UIT-R en Ginebra, Suiza

**Fecha:** Octubre de 2010

**Aportaciones:** En este informe técnico oficial de la UIT se recoge la descripción de los primeros resultados de la campaña de medidas llevada a cabo para evaluar las señales de televisión digital dispersadas por los aerogeneradores y su influencia sobre la calidad de recepción de DVB-T.

#### 3.2 Publicaciones internacionales

**Título:** “An Empirical Comparative Study of Prediction Methods for Estimating Multipath Due to Signal Scattering From Wind Turbines on Digital TV Services”

**Autores:** I. Angulo, D. De La Vega, C. Fernández, D. Guerra, Y. Wu, P. Angueira, J.L. Ordiales

**Publicación:** IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 57, no. 2, pp. 195-203

**Fecha:** Junio 2011

**Aportaciones:** En esta primera publicación se recoge el estudio empírico de los errores de predicción de los modelos de dispersión presentes en la bibliografía.

---

**Título:** “Empirical Evaluation of the Impact of Wind Turbines on DVB-T Reception Quality”

**Autores:** I. Angulo, D. De La Vega, O. Grande, N. Cau, U. Gil, Y. Wu, D. Guerra, P. Angueira

**Publicación:** IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 58, no. 1, pp. 1-9

**Fecha:** Marzo 2012

**Aportaciones:** Esta segunda publicación recoge los resultados de la evaluación de la degradación de los umbrales de recepción de DVB-T obtenidos a partir de las medidas realizadas en el entorno del parque eólico de Oiz.

---

**Título:** “Empirical Doppler Characterization of Signals Scattered by Wind Turbines in the UHF Band under Near Field Condition”

**Autores:** I. Angulo, J. Montalbán, J. Cañizo, Y. Wu, D. de la Vega, D. Guerra, P. Angueira, A. Arrinda

**Publicación:** International Journal of Antennas and Propagation, Special Issue on Impact of Wind Farms on Radiocommunication Systems (en revisión)

**Aportaciones:** En esta publicación se recoge una descripción detallada del proceso de obtención y caracterización de los espectros Doppler de las señales dispersadas por los aerogeneradores al rotar sus aspas.

---

**Título:** “A Measurement-based Multipath Channel Model for Propagation in Presence of Wind Farms in the UHF Band – Part I: Scattering Model”

**Autores:** I. Angulo, J. Cañizo, J. Montalbán, Y. Wu, D. de la Vega, D. Guerra, P. Angueira, A. Arrinda

**Publicación:** IEEE Transactions on Wireless Communications (en revisión)

**Aportaciones:** Esta contribución, dividida en dos partes, presenta el modelo de canal completo para caracterizar la propagación multitrayecto en presencia de un parque eólico. En esta primera parte se incluyen los fundamentos del modelo de canal propuesto, así como el primero de los aspectos que ha de ser tratado: el

modelo de dispersión utilizado para proporcionar el valor medio de potencia de las diversas componentes multitrayecto correspondientes a los aerogeneradores.

---

**Título:** “A Measurement-based Multipath Channel Model for Propagation in Presence of Wind Farms in the UHF Band – Part II: Doppler Spectrum”

**Autores:** I. Angulo, J. Montalbán, J. Cañizo, Y. Wu, D. de la Vega, D. Guerra, P. Angueira, A. Arrinda

**Publicación:** IEEE Transactions on Wireless Communications (en revisión)

**Aportaciones:** En esta segunda parte, se analiza la variabilidad temporal del canal mediante la estimación de espectros Doppler de las señales dispersadas obtenidas a partir de capturas de señal en condiciones reales, así como su posterior caracterización. Finalmente, recogiendo las conclusiones de las Partes I y II, se propone el modelo de canal completo.

---

**Título:** “Impact analysis of wind farms on telecommunication services”

**Autores:** I. Angulo, I. Cascón, D. de la Vega, J. Cañizo, Y. Wu, D. Guerra, P. Angueira

**Publicación:** Renewable and Sustainable Energy Reviews (en revisión)

**Aportaciones:** Esta contribución introduce los efectos de los aerogeneradores sobre las señales electromagnéticas, para posteriormente presentar un completo estudio sobre el impacto de los aerogeneradores en los servicios de telecomunicación. La publicación describe la posible afección sobre los servicios que han demostrado ser más sensibles a la presencia de un parque eólico cercano (televisión, radioenlaces, radares meteorológicos, de control de tráfico aéreo y marino, y sistemas de radionavegación), así como la metodología para evaluar esta potencial degradación y medidas de mitigación aplicables.

### 3.3 Congresos Internacionales

**Título:** “Experimental Results on Wind Turbines Impact to Terrestrial DTV Reception in UHF Band”

**Autores:** I. Angulo, D. de la Vega, Y. Wu, P. Angueira, C. Fernández, D. Guerra, J. Yen, I. Armentia

**Congreso:** 59th Annual Broadcast Symposium (IEEE Broadcast Technology Society)

**Lugar:** Washington D.C. (USA)      **Fecha:** Octubre 2009

**Participación:** Ponencia

**Publicación:** Actas del congreso

**Aportaciones:** En este congreso se presentaron las características generales de la campaña de medidas, incluidas su planificación y desarrollo, procesado de las medidas y algunos ejemplos de señales dispersadas.

---

**Título:** “Methodology for the Empirical Analysis of the Scattering Signals from a Wind Turbine”

**Autores:** I. Angulo, D. de la Vega, O. Grande, Y. Wu, C. Fernández, P. Angueira, J. L. Ordiales

**Congreso:** Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2009)

**Lugar:** Loughborough (UK)

**Fecha:** 16-18 Noviembre 2009

**Participación:** Poster

**Publicación:** Actas del Congreso en IEEEXplorer

**Aportaciones:** En este congreso se presentó la metodología para analizar las señales dispersadas por los aerogeneradores, basada en la medida de señales de DVB-T comerciales.

---

**Título:** “First Results of a Field Trial to Evaluate the Impact of Wind Turbines on DTV Reception Quality”

**Autores:** I. Angulo, U. Gil, D. De La Vega, Y. Wu, P. Angueira, C. Fernández

**Congreso:** 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)

**Lugar:** Shanghái (China)

**Fecha:** 24-26 Marzo 2010

**Participación:** Ponencia

**Publicación:** Actas del congreso en IEEEXplorer

**Aportaciones:** En este congreso se recogieron los primeros resultados de la influencia del parque eólico en la calidad de recepción de DVB-T. Estos resultados, basados en la primera campaña de medidas, no incluían las medidas correspondientes a la zona de *forward scattering* ni la definición de los parámetros para caracterizar el canal multitrayecto.

---

**Título:** “An Empirical Comparative Study of Prediction Methods for Estimating DTV Signal Scattering from Wind Turbines”

**Autores:** I. Angulo, D. de la Vega, C. Fernández, Y. Wu, P. Angueira, J.L. Ordiales

**Congreso:** 60th Annual Broadcast Symposium (IEEE Broadcast Technology Society)

**Lugar:** Washington D.C. (USA).      **Fecha:** Octubre 2010

**Participación:** Ponencia      **Publicación:** Actas del congreso

**Aportaciones:** En este congreso se recogieron los primeros resultados del estudio empírico de los errores de predicción de los modelos de dispersión presentes en la bibliografía, cuando sólo se había realizado con las transmisiones correspondientes a un transmisor.

---

**Título:** “Analysis of the mast contribution to the scattering pattern of wind turbines in the UHF band”

**Autores:** I. Angulo, D. De La Vega, O. Rodríguez, O. Grande, D. Guerra, P. Angueira

**Congreso:** *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*

**Lugar:** Roma (Italia)      **Fecha:** 11-15 Abril 2011

**Participación:** Ponencia      **Publicación:** Actas del congreso en IEEE Explorer

**Aportaciones:** En este congreso se presentaron las simulaciones de RCS del aerogenerador según el método de óptica física, destacando la importancia relativa de la RCS del mástil a la RCS del conjunto del aerogenerador.

### 3.4 Jornadas de trabajo de la UIT-R

**Título del comité:** ITU-R Study Group 6A (Radiocommunication Study Groups)

**Entidad de la que depende:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

**Tema:** Radiodifusión terrestre – Televisión. Presentación de contribuciones.

**Fecha:** 7-8 Mayo 2009

**Aportaciones:** Presentación de los resultados preliminares obtenidos en la primera fase de la campaña de medidas correspondientes a la caracterización de las señales dispersadas por los aerogeneradores.

---

**Título del comité:** ITU-R Study Group 6A (Radiocommunication Study Groups)

**Entidad de la que depende:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

**Tema:** Radiodifusión terrestre – Televisión. Asistencia y presentación de contribuciones.

**Fecha:** 4-12 Noviembre 2009

**Aportaciones:** Presentación de resultados adicionales obtenidos en la primera fase de la campaña de medidas. Caracterización de las señales dispersadas por los aerogeneradores en distintas condiciones: aspas estáticas o en rotación, efecto de los movimientos de cambio de ángulo de ataque y orientación de la góndola. Primeros resultados de degradación de los umbrales de señal a ruido de DVB-T en presencia de un parque eólico.

---

**Título del comité:** ITU-R Study Group 6A (Radiocommunication Study Groups)

**Entidad de la que depende:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

**Tema:** Radiodifusión terrestre – Televisión. Presentación de contribuciones.

**Fecha:** 26-29 de Abril de 2010

**Aportaciones:** Presentación de nuevas medidas de degradación de los umbrales de DVB-T en la región de *backscattering* obtenidas durante el inicio de la segunda fase de la campaña de medidas.

Tras consideración de las aportaciones de las reuniones anteriores, aprobación de los documentos oficiales “Draft Revisions to Report ITU-R BT.2142. The effect of the scattering of digital television signals from a wind turbine” y “Preliminary Draft New Recommendation ITU-R [WINTURB]. Assessment of impairment caused to digital television reception by a wind turbine”

---

**Título del comité:** ITU-R Study Group 6A (Radiocommunication Study Groups)

**Entidad de la que depende:** Unión Internacional de Telecomunicaciones

**Tema:** Radiodifusión terrestre – Televisión. Presentación de contribuciones.

**Fecha:** 19-21 de Octubre de 2010

**Aportaciones:** Envío de resultados definitivos con respecto a los cambios en el “Report ITU-R BT.2142” y en la nueva recomendación. Presentación del estudio comparativo de los diferentes modelos de dispersión existentes.

### 3.5 Congresos nacionales

**Título:** “Metodología para la caracterización de la señal dispersada por un parque eólico”

**Autores:** I. Angulo, J. Cañizo, I. Cascón, D. de la Vega, D. Guerra, P. Angueira

**Congreso:** XXVII Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2012)

**Lugar:** Elche (España)

**Fecha:** Septiembre 2012

**Participación:** Ponencia

**Publicación:** Actas del Congreso

**Aportaciones:** En este congreso se presentó la metodología para caracterizar la señal dispersada por el conjunto de un parque eólico, basada en la definición de parámetros para caracterizar el canal multitrayecto.



*[I do not] carry such information in my mind since it is readily available in books. (...) The value of a college education is not the learning of many facts but the training of the mind to think.*

*- Albert Einstein*

---

## **REFERENCIAS Y GLOSARIO**

---



## REFERENCIAS

---

- [1] World Wind Energy Association (WWEA), "Quarterly bulletin. Wind energy around the world", issue 1, March 2012 [available online] [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org), last accessed June 2012
- [2] C. Rose – European Wind Energy Association (EWEA), "Powering the energy debate. The European Wind Energy Association Annual Report 2010", June 2009
- [3] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, "Wind Energy: Handbook", Ed. John Wiley and Sons, ISBN 0471489972, 2001.
- [4] Página oficial de Gamesa [online] [www.gamesacorp.com](http://www.gamesacorp.com)
- [5] E.F. Knott, J.F. Shaeffer, and M.T. Tuley, "Radar Cross Section: Its Prediction, Measurement and Reduction", Norwood, MA: Artech House Radar Library, 1985
- [6] D. C. Jenn, "Radar and Laser Cross Section Engineering", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2nd Edition, 2005
- [7] I.J. Lahaie and D.L. Sengupta, "Scattering of Electromagnetic Waves by a Slowly Rotating Rectangular Metal Plate", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, No. 1, pp. 40-46, January 1979
- [8] I. Etayo Otermin et al., "Análisis de la Variación Temporal y Frecuencial de Señales Radio Dispersadas por un Aerogenerador", Proceedings de URSI 2008 - XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Septiembre 2008
- [9] P. Jago and N. Taylor, "Wind turbines and aviation interests – European experience and practice", DTI, 2002
- [10] Spaven Consulting, "Wind turbines and radar: operational experience and mitigation measures", 2001
- [11] G. J. Poupart, "Wind Farms Impact on Radar Aviation Interests – Final Report", FES W/14/00614/00/REP, DTI PUB URN 03/1294, contracted by QinetiQ, September 2003
- [12] M.M. Butler, D.A. Johnson, "Feasibility of Mitigating the Effects of Windfarms on Primary Radar", ETSU W/14/00623/REP, DTI PUB URN No. 03/976, contracted by Alenia Marconi Systems Limited, 2003
- [13] J.J. Lemmon, J.E. Carroll, F.H. Sanders and D. Turner, "Assessment of the Effects of Wind Turbines on Air Traffic Control radars", NTIA Technical Report TR-08-454, July 2008

- [14] M. Borely, "Guidelines on How to Assess the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors", Eurocontrol, June 2010
- [15] International Civil Aviation Organization, "European Guidance Material on Managing Building Restricted Areas", ICAO EUR Doc 015, September 2009
- [16] P. Tristant, "Impact of Wind Turbines on Weather Radars Band", World Meteorological Organization, CBS/SG-RFC 2006/Doc. 3.1, March 2006
- [17] "Impact of Wind Turbines on Weather Radars", OPERA II WP 1.8, December 2006
- [18] R.J. Vogt, T.D. Crum, M.J.B. Sandifer, "A Way Forward Wind Farm – Weather Radar Coexistence", NEXRAD Radar Operations Center, NOAA's National Weather Service, 2009
- [19] Finnish Meteorological Institute, EUMETNET OPERA PROGRAMME (2004 2006) - Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information, "Final Report", March 2007
- [20] G. Haase, D. Johnson, and K.-Å. Eriksson, "Analyzing the impact of wind turbines on operational weather radar products", Proc. ERAD 2010.
- [21] B. M. Isom, R. D. Palmer, G. S. Secrest, R. D. Rhoton, D. Saxion, T. L. Allmon, J. Reed, T. Crum, and R. Vogt, "Detailed Observations of Wind Turbine Clutter with Scanning Weather Radars", J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 894-910, 2008
- [22] R. J. Vogt, T. D. Crum, W. Greenwood, E.J. Ciardi, R.G. Guenther, "Recent Efforts to Improve Estimates of and Mitigation of Wind Turbine Clutter Impacts on the WSR-88D", Preprints, 27th Int. Conf. on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., Paper 3A.1., 2011
- [23] L.S. Rashid and A.K. Brown, A.K, "Impact modelling of wind farms on marine navigational radar", 2007 IET International Conference on Radar Systems, pp.1-5, 15-18 Oct. 2007
- [24] MARICO Marine report, "Investigation of Technical and Operational Effects on Marine Radar Close to Kentish Flats Offshore Wind Farm", April 2007 [available online, last accessed 24th May 2012]
- [25] C. Brown and M. Howard, "Results of the electromagnetic investigations and assessments of marine radar, communications and position fixing systems undertaken at the North Hoyle wind farm by QinetiQ and the Maritime and Coastguard Agency", MeA Report MNA 53/10/366, Nov 2004
- [26] L. Rashid and A. Brown, "Partial treatment of wind turbine blades with radar absorbing materials (RAM) for RCS reduction," 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp.1-5, 12-16 April 2010.

- [27] International Civil Aviation Organization, "European Guidance Material on Managing Building Restricted Areas", ICAO EUR Doc 015, September 2009
- [28] C. Morlaas, M. Fares and B. Souny, "Wind Turbine Effects on VOR System Performance", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 44, No. 4, pp. 1464-1476, October 2008
- [29] M. Kayton and W. R. Fried, "Avionics Navigation Systems", John Wiley & Sons, 1997
- [30] United Kingdom Civil Aviation Authority, "CAP 670 ATS Safety Requirements", April 1998 [available online, last accessed 27th May 2012] <http://www.caa.co.uk/docs/33/CAP670.pdf>
- [31] OFCOM, "Tall structures and their impact on broadcast and other wireless services", August 2009
- [32] B.S. Randhawa and R Rudd, "RF Measurement Assessment of Potential Wind Farm Interference to Fixed Links and Scanning Telemetry Devices", Ofcom Report 2008-0568, March 2009
- [33] D.F. Bacon, "Fixed-link wind-turbine exclusion zone method", OFCOM report, United Kingdom, October 2002
- [34] BBC and OFCOM Office of Communications, "The Impact of Large Buildings and Structures (including Wind Farms) on Terrestrial Television Reception", March 2004
- [35] C. Salema, C.A. Fernandes, L. Fauro, "TV Interference from Wind Turbines", Proc Conf. on Telecommunications - ConfTele, Vol. 1 , pp. 47 - 51 , Figueira da Foz (Portugal), April 2001
- [36] K.H. Cavcey, L.Y Lee, M.A. Reynolds, "Television Interference due to Electromagnetic Scattering by the MOD-2 Wind Turbine Generators," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-103, no.2, pp.407-412, Feb. 1984
- [37] M. Levent, I. Munro, "Effects of Windmills on Television Reception", CBC Technology Review, January 2006
- [38] D.L. Sengupta and T.B.A. Senior, "Electromagnetic Interference to Television Reception Caused by Horizontal Axis Windmills", Proc. of the IEEE, Vol. 67, No. 8, August 1979
- [39] D.L. Sengupta and T.B.A. Senior, "Wind Turbine Generator Sitting Handbook", Technical Report No.2, University of Michigan, December 1979
- [40] T.B.A. Senior and D.L. Sengupta, "Large Wind Turbine Sitting Handbook: television interference assessment", Technical Report No. 5, University of Michigan, April 1981

- [41] J.L. Eaton, R.I. Black and G.H. Taylor, "Interference to television reception from large wind turbines", BBC RD 1983/2, BBC Research Department, Engineering Division, March 1983
- [42] P.J. Van Kats and O.P.E. Pager, "Reflections of Electromagnetic Waves by Large Wind Turbines and Their Impact on UHF Broadcast Reception", IEEE 1984, p. 91-99
- [43] W. Wright, "Effects of wind turbines on UHF television reception", BBC RD 1992/7, BBC Research Department, Engineering Division, November 1991
- [44] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT.805, "Assessment of impairment caused to television reception by a wind turbine", 1992
- [45] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT.419-3, "Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting", 1992
- [46] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT.500-12, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures", 2009
- [47] International Telecommunication Union, Question ITU-R 69-1/6, "Conditions for a satisfactory television service in the presence of reflected signals", 2004
- [48] The Institute for Telecommunication Science (ITS) Technical Program, "Radio Channel Impulse Response Measurement Systems", [online] [www.its.bldrdoc.gov/programs/rcirms](http://www.its.bldrdoc.gov/programs/rcirms)
- [49] I. Angulo, D. de la Vega, et al. , "Empirical Evaluation of the Impact of Wind Turbines on DVB-T Reception Quality," IEEE Transactions on Broadcasting, vol.58, no.1, pp.1-9, March 2012
- [50] A. Satrústegui et al., "Estudio de propagación del campo eléctrico al atravesar un parque eólico", Proceedings de URSI 2007 - XXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Septiembre 2007
- [51] A. Satrústegui et al., "Estudio de la Influencia de un Parque Eólico en el Nivel Medio y La Desviación Típica de Señales UHF", Proceedings de URSI 2008 - XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Septiembre 2008
- [52] J.H. Causebrook, "Distortion of radio wave signals by wind turbines", Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers, vol.58, no.6, pp.S224-S228, September-December 1988
- [53] B.L. Cragin, "VHF Scattering by Rotating Wind Turbines: Backyard Observations", antenneX online Magazine, no.147, July 2009 [available online] [www.antennex.com](http://www.antennex.com)

- [54] D. R. Pully, M. J. Collins, and J. Parker, "Measurement and Characterization of Distortions in the Digital Terrestrial Television Channel", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 45, No. 3, August 1999
- [55] M.C. Jeruchim, P. Balaban, and K.S. Shanmugan, "Simulation of communication systems: modeling, methodology, and techniques", 2<sup>nd</sup> ed., New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000
- [56] J. Montalbán, "Nueva metodología para la equalización de canales LTV", Tesis de Máster, Máster y Doctorado en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles (TICRM), UPV/EHU, Septiembre 2011
- [57] H.R. Anderson, "Fixed broadband wireless system design", John Wiley and Sons, 2003.
- [58] P. A. Bello, "Characterization of randomly time-invariant linear channels", IEEE Transactions on Communications Systems, vol.11, no.4, pp.360-393, December 1963
- [59] M. Pätzold, "Mobile Fading Channels", J. Wiley, 2002
- [60] S. Saunders and A. Aragón-Zavala, "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems", 2nd Edition, Wiley, May 2007
- [61] J.D. Parsons, "The mobile radio propagation channel", Halsted Press, 1992
- [62] M. Failli. "Cost 207 digital land mobile radio communications", Final report, Commission of the European Communities, 1989
- [63] Y. Zhang, A. Huston, et al., "Using Scaled Models for Wind Turbine EM Scattering Characterization: Techniques and Experiments," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.60, no.4, pp.1298-1306, April 2011
- [64] J. I. Glaser, "Some Results in the Bistatic Radar Cross Section (RCS) of Complex Objects", Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No. 5, pp. 639 – 647, May 1989
- [65] P. Blacksmith et al., "Introduction to Radar Cross-Section Measurements", Proceedings of the IEEE, August 1965
- [66] M.I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", Ed. McGraw-Hill, ISBN 007118189X, 9780071181891, 2001
- [67] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT.1439-1, "Measurement methods applicable in the analogue television studio and the overall analogue television system", 2006
- [68] L. E. Weaver, "Medidas en la transmisión de señales de vídeo", Ediciones Técnicas Rede, ISBN 8424702662, 9788424702663, 1988
- [69] D. de la Vega et al., "Use of the Channel Impulse Response of the DVB-T Service for the Evaluation of the Reflected Signals of Wind Farms", I<sup>2</sup>MTC

2008 – IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Canada, May 2008

- [70] C.-S. Yeh, Y. Lin, "Channel Estimation Using Pilot Tones in OFDM Systems", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 45, No. 4, December 1999
- [71] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems," IEEE Trans. Broadcast., vol. 45, no. 1, Mar. 1999
- [72] ETSI, ETSI EN 300 744 V1.6.1, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", 2009
- [73] ETSI, ETSI TR 101 290 V1.3.1, "Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems", 2008
- [74] ETSI, ETSI TR 101 190 V1.3.1, "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects", Oct. 2008
- [75] F.J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," Proceedings of the IEEE , vol.66, no.1, pp. 51- 83, Jan. 1978
- [76] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, I. T. Young, "Signals and Systems", Ed. Prentice-Hall, 1983
- [77] International Telecommunication Union, Report BT.2035-1 "Guidelines and techniques for the evaluation of digital terrestrial television broadcasting systems", 2004.
- [78] I. Angulo, D. de la Vega, et al., "Experimental Results on Wind Turbines Impact to Terrestrial DTV Reception in the UHF Band", 59th Annual Broadcast Symposium (IEEE Broadcast Technology Society), Washington D.C. (USA), October 2009
- [79] I. Angulo, D. de la Vega et al., "Methodology for the Empirical Analysis of the Scattering Signals from a Wind Turbine", Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2009), Loughborough (UK), 16-18 November 2009
- [80] I. Angulo et al., "First Results of a Field Trial to Evaluate the Impact of Wind Turbines on DTV Reception Quality", 2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, Shanghai (China), 24-26 March 2010
- [81] C. Muschallik, "Measuring performance of DVB consumer receivers," IEEE Trans. Broadcast., vol. 43, no. 4, pp. 393–402, Dec. 1997
- [82] International Telecommunication Union, Rec. ITU-R BT.1735, "Methods for objective quality coverage assessment of digital terrestrial television



- broadcasting signals of System B specified in Recommendation ITU-R BT.1306”, 2005
- [83] Página oficial de Iberdrola Renovables [online] [www.iberdrolarenovables.es](http://www.iberdrolarenovables.es)
- [84] ADIVIC, “TCX3000 RF recorder/player operation manual”, Febr. 2008. [online] [www.adivic.com](http://www.adivic.com)
- [85] ANRITSU, “MS2690A/MS2691A/MS2692A Signal Analyzer Operation Manual”, 24th Edition, January 2012 [online] [www.anritsu.com](http://www.anritsu.com)
- [86] “Digital Broadcast Analysis Software” [online] [www.arbitrary.es](http://www.arbitrary.es)
- [87] C. Fernández et al., “DVB-T/H receiver architecture for advanced system performance measurement,” 3rd IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Mar./Apr. 2008
- [88] Rohde&Schwarz, “EFA40/43 TV Test Receiver (DVB-T) Data Sheet”, version 03.00, March 2007 [online] [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)
- [89] Televés, “Catálogo de Antenas 2010”, Mayo 2010 [online] [www.televes.com/espanol/producto/catalogos/catalogo2010/antenas.pdf](http://www.televes.com/espanol/producto/catalogos/catalogo2010/antenas.pdf)
- [90] Garmin, “GPSmap 76 - Manual de usuario”, Mayo 2010 [online] [www.garmin.com](http://www.garmin.com)
- [91] Matlab, “User Manual”, [online] [www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/)
- [92] J.M. Hernando Rábanos, “Transmisión por radio”, Editorial Universitaria Ramón Areces, 6ª Ed., ISBN: 8480048565, ISBN-13: 9788480048569, 2008
- [93] I. Angulo, D. de la Vega, et al., "Analysis of the mast contribution to the scattering pattern of wind turbines in the UHF band," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp.707-711, 11-15 April 2011
- [94] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT.1368-8, “Planning criteria for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands”, May 2009
- [95] E. P. J. Tozer, “Broadcast Engineer’s Reference Book”, Burlington, MA: Elsevier/Focal Press, 2004
- [96] International Telecommunication Union, Report ITU-R BS.945-2, “Methods for the Assessment of Multiple Interference”, 1990
- [97] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BS.638, “Terms and definitions used in frequency planning for sound broadcasting”, 1986
- [98] EBU Technical Report, “Criteria for Planning DVB-T - Annex to ECC Report 4. Initial Ideas Concerning the Revision of the Stockholm (1961) Agreement”, Lisbon, January 2002

- [99] D.A. Spera and D.L. Sengupta, "Equations for Estimating the Strength of TV Signals Scattered by Wind Turbines", NASA Contractor Report 194468, May 1994
- [100] International Telecommunication Union, Rec. ITU-R P.1407-4, "Multipath propagation and parameterization and its characteristics," 2009
- [101] M. Skolnik, "Radar Handbook", 3rd ed. New York, New York: Mc-Graw-Hill, 2008
- [102] IEEE Std 211-1997, "IEEE Standard Definitions of Terms for Radio Wave Propagation", IEEE Standards Board, sponsored by Wave Propagation Standards Committee of the Antennas and Propagation Society, December 1997
- [103] Dr. David C. Jenn website, POFACETS for free download [online] [www.dcjenn.com](http://www.dcjenn.com)
- [104] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R BT. 1893, "Assessment of impairment caused to digital television reception by a wind turbine", May 2011
- [105] D.L. Sengupta and T.B.A. Senior, "Electromagnetic Interference from Wind Turbines", Chapter 9, pp. 447-486 from the book "Wind Turbine Technology. Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering", Ed. ASME Press, ISBN No. 0-7918-1205-7, New York, 1994
- [106] International Telecommunication Union, Document 6E/398-E, "Proposed Working Document Toward a Modification to Recommendation ITU-R BT.805. Assessment of impairment caused to television reception by a wind turbine", August 2006
- [107] International Telecommunication Union, Document 6D/40-E, "Preliminary Draft Revision to Recommendation ITU-R BT. 805. Assessment of impairment caused to television reception by a wind turbine", May 2008
- [108] International Telecommunication Union, Document 6A/TEMP/166-E, "Preliminary Draft New Recommendation ITU-R [WINTURB]. Assessment of impairment caused to television reception by a wind turbine", April 2010
- [109] I. Angulo, D. de la Vega et al., "An Empirical Comparative Study of Prediction Methods for Estimating Multipath Due to Signal Scattering From Wind Turbines on Digital TV Services", IEEE Transactions on Broadcasting, vol.57, no. 2, pp. 195-203, June 2011
- [110] P. Knight, "Re-radiation from masts and similar obstacles at radio frequencies". Proc. Instn. Elect. Engrs., 1967, 114, pp. 30-42
- [111] J. Pinto, J. C. G. Matthews, and G. C. Sarno, "Stealth technology for wind turbines," IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 4, no. 1, pp. 126-133, Feb. 2010

- [112] J. Pinto, J. C. G. Matthews, and G. C. Sarno, "Radar signature reduction of wind turbines through the application of stealth technology," in 3rd Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), pp. 3886–3890, 23-27 Mar., 2009
- [113] International Telecommunication Union, Report ITU-R BT.2142-1, "The effect of the scattering of digital television signals from a wind turbine", October 2010
- [114] E.F. Knott, T.B.A Senior, "How far is far?", IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. AP-22, pp 732-734, September 1974
- [115] B.M. Welsh and J.N. Link, "Accuracy Criteria for Radar Cross Section Measurements of Targets Consisting of Multiple Independent Scatterers", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, no. 11, November 1988
- [116] D. de la Vega, C. Fernandez, et al., "Software tool for the analysis of potential impact of wind farms on radiocommunication services," 2011 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), pp.1-5, 8-10 June 2011
- [117] Página oficial de Google Earth [online] [www.earth.google.es](http://www.earth.google.es)
- [118] T.J Hestilow, "Simple formulas for the calculation of the average physical optics RCS of a cylinder and a flat plate over a symmetric window around broadside," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.42, no.5, pp.48-52, Oct. 2000
- [119] M. Andreasen, "Scattering from bodies of revolution," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.13, no.2, pp. 303- 310, Mar 1965
- [120] V. DiCaudo and W. Martin, "Approximate solution to bistatic radar cross section of finite length, infinitely conducting cylinder," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.14, no.5, pp. 668- 669, Sep 1966
- [121] R.G. Kouyoumijian, "Asymptotic High-Frequency Methods", Proceedings of the IEEE, vol.53, pp. 864-876, August 1965
- [122] J.W. Crispin, A.L. Maffett, "Radar cross-section estimation for simple shapes," Proceedings of the IEEE, vol.53, no.8, pp. 833- 848, Aug. 1965
- [123] K.M. Siegel, H.A. Alperin et al., "Bistatic Radar Cross Sections of Surfaces of Revolution", Journal of Applied Physics, Vol. 26, N. 3, March 1955
- [124] K.M. Siegel, H.A. Alperin et al., "Studies in radar-cross sections – VIII – Theoretical cross sections as a function of separation angle between transmitter and receiver at small wavelengths", Report UMM-115, Willow Run Research Center, University of Michigan, October 1953
- [125] R.A. Ross, "Radar cross section of rectangular flat plates as a function of aspect angle," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-14, pp. 329-335, May 1966

- [126] E.F. Knott, "Radar Cross Section Measurements", SciTech Publishing, 2006
- [127] L.L. Williams, "Physical Optics Theory of Radar Cross Section", January 1999 [available online] [http://konfluence.org/PO\\_RCS.pdf](http://konfluence.org/PO_RCS.pdf)
- [128] W.B.E. Gordon, "Near field calculations with far field formulas", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1996. AP-S. Diges , vol.2, no., pp.950-953 vol.2, 21-26 Jul 1996
- [129] S.-K. Jeng, "Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997 Digest , vol.2, pp.1176-1179, 13-18 Jul 1997
- [130] C. Shyh-Ryan, E. Weaver, B. Cown, "Plane wave spectrum scattering analysis of near-field obstacle effects on directive antenna patterns", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.27, no.6, pp. 772- 778, Nov 1979
- [131] Y.-H. Bi, B.-Z. Wang, "Near-field scattering characteristics of electrically large metallic plate in local illumination," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, pp.243-246, 9-14 July 2006
- [132] D.G. Falconer, "Extrapolation of Near Field RCS Measurements to the Far Zone", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.36, no.6, June 1988
- [133] M. Sui, X. Xu, "Near-field iterative physical optics based on distinct wave propagation vector", 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp.1-4, 11-17 July 2010
- [134] M.S. Narasimhan, K.Varadarangan, "An efficient technique for spherical near-field to far-field transformation and evaluation of far fields of perfectly conducting scatterers", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.37, no.12, pp.1529-1536, Dec 1989
- [135] I.J. LaHaie, "Overview of an image-based technique for predicting far-field radar cross section from near-field measurements", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.45, no.6, pp. 159- 169, Dec. 2003
- [136] E. Van Lil, D. Trappeniers, J. De Bleser, A. Van de Capelle, "Computations of Radar Returns of Wind Turbines", Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2009, pp. S19P16:1-S19P16:5, Berlin, 23-27 March 2009
- [137] E. Van Lil, J. De Bleser, A. Van de Capelle, "Computations of the effects of wind turbines in the close near field of RF installations," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2011, pp.1362-1366, 11-15 April 2011
- [138] N.-J. Li, W.-J. Chen, C.-F. Hu, and L.-X. Zhang, "Investigation on the RCS Measurement Technique of Large Targets at Near Distance", Progress In

- Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou, China, 24-28 March 2008
- [139] K. J. Nicholson, C. H. Wang, "Improved Near-Field Radar Cross-Section Measurement Technique", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, 2009.
- [140] P. Pouliguen, L. Lucas, et al., "Calculation and Analysis of Electromagnetic Scattering by Helicopter Rotating Blades", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 50, No. 10, October 2002
- [141] A.L. Maffett, "Topics for a statistical description of radar cross section", *Wiley series in remote sensing*, Volume 9, Wiley, 1989
- [142] J.W. Crispin, A.L. Maffett, "Radar cross-section estimation for simple shapes", *Proceedings of the IEEE*, vol.53, no.8, pp. 833- 848, Aug. 1965
- [143] J.G. Proakis, and D.G. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996
- [144] P. Stoica, and R. Moses, "Introduction to Spectral Analysis", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997
- [145] S.L. Marple, "Digital Spectral Analysis", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987
- [146] A. Schuster, "On the investigation of hidden periodicities," *Terrestr. Magn.*, vol. 3, pp. 13–41, 1898
- [147] M. S. Bartlett, "Smoothing periodograms from time series with continuous spectra," *Nature*, vol. 161, pp. 686–687, 1948
- [148] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol.15, no.2, pp. 70- 73, June 1967
- [149] N. Whiteloni, Shang-Te Yang, Hao Ling, "Application of Near-Field to Far-Field Transformation to Doppler Features From Wind Turbine Scattering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.60, no.3, pp.1660-1665, March 2012
- [150] C.-D. Iskander, "A MATLAB® -based Object-Oriented Approach to Multipath Fading Channel Simulation", [available online] [www.mathworks.com/matlabcentral/forums/18869/1/ChannelModelingWhitePaper.pdf](http://www.mathworks.com/matlabcentral/forums/18869/1/ChannelModelingWhitePaper.pdf)
- [151] W.C. Jakes, "Microwave Mobile Channels", New York: Wiley, 1974
- [152] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception", *Bell Sys.Tech. J.*, vol. 47, no. 6, pp. 957–1000, July-Aug. 1968
- [153] M. Patzold, "Mobile Fading Channels", Wiley, 2002

- [154] R.H. Clarke and W.L. Khoo, "3-D mobile radio channel statistics", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, no. 3, pp. 798–799, Aug. 1997
- [155] D. Cox, "Delay Doppler characteristics of multipath propagation at 910 MHz in a suburban mobile radio environment," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.20, no.5, pp. 625- 635, Sep 1972
- [156] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, "Channel models for fixed wireless applications", IEEE 802.16a-03/01, June 2003
- [157] A. Naqvi, S.-T. Yang, H. Ling, "Investigation of Doppler Features From Wind Turbine Scattering," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.9, pp.485-488, 2010
- [158] A. Naqvi, "Investigation of Doppler Features Resulting from Wind Turbine Scattering", MSc Thesis, The University of Texas at Austin, December 2010
- [159] B. Gallardo-Hernando, F. Perez-Martinez, F. Aguado-Encabo, "Statistical characterization of wind turbine clutter in C-band radars", 2008 International Conference on Radar, pp.360-364, 2-5 Sept. 2008
- [160] H. Hashemi, M. McGuire, T. Vlasschaert, D. Tholl, "Measurements and modeling of temporal variations of the indoor radio propagation channel", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.43, no.3, pp.733-737, Aug 1994
- [161] A. Domazetovic, L.J. Greenstein, N.B. Mandayam, I. Seskar, "Estimating the Doppler spectrum of a short-range fixed wireless channel", IEEE Communications Letters, vol.7, no.5, pp. 227- 229, May 2003
- [162] V. Erceg, L. Schumacher, P. Kyritsi, A. Molisch, D.S. Baum, A.Y. Gorokhov, C. Oestges, Q. Li, K. Yu, N. Tal, B.D. Dijkstra, A. Jagannatham, C. Lanzl, V.J. Rhodes, J. Medbo, D. Michelson, and M. Webster, "TGN Channel Models," IEEE P802.11 Wireless LANs, Tech. Rep., May 2004
- [163] W. Yamada, K. Nishimori, Y. Takatori, and Y. Asai, "Statistical Analysis and Characterization of Doppler Spectrum in Large Office Environment", Proc. of the 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009), pp. 564–567, Bangkok, Thailand, 2009
- [164] D.S. Baum, D. Gore, et al., "Measurement and characterization of broadband MIMO fixed wireless channels at 2.5 GHz", IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, pp.203-206, 2000
- [165] S.Thoen, L. Van der Perre, M. Engels, "Modeling the channel time-variance for fixed wireless communications", IEEE Communications Letters, vol.6, no.8, pp. 331- 333, Aug 2002
- [166] A. Liou, W. Muneer, K.N. Sivertsen, D.G. Michelson, "Accounting for Wind Effects on Fixed Wireless Channels in Suburban Macrocell Environments", 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference, VTC 2008-Fall, pp.1-4, 21-24 Sept. 2008

- [167] J.B. Andersen, J.O. Nielsen et al., "Doppler spectrum from moving scatterers in a random environment," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.6, pp.3270-3277, June 2009
- [168] M. J. Norusis, *Documentation SPSS for Windows*, SPSS, Inc., Chicago, 1993
- [169] J. Montalbán et al., "On approaching to Generic Channel Equalization Techniques for OFDM Based Systems in Time Variant Channels", 2011 IEEE International Symposium Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), pp.1-6, 8-10 June 2011
- [170] W.H. Tranter, K.S. Shanmugan, T.S. Rappaport, K.L. Kosbar, "Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications", 1st edition, Prentice Hall, 2004
- [171] F. Pérez-Fontán, P. Mariño Espiñeira, "Modeling the wireless propagation channel: a simulation approach with MATLAB", Volumen 14 of Wiley series on wireless communications and mobile computing, John Wiley & Sons, 2008
- [172] J. van den Berg, "Wind Turbines and Interference to Broadcast Signals", [available online, last accessed 25th May 2012] [www.broadcastwind.com](http://www.broadcastwind.com), April 2012
- [173] L.E. Polisky, "Post digital television transition - the evaluation and mitigation methods for off-air digital television reception in-and-around wind energy facilities", Comsearch Whitepaper, TP-103160.1-EN, April 2009 [available online] [www.comsearch.com](http://www.comsearch.com)
- [174] Y. Wu et al., "Comparison of terrestrial DTV transmission systems: The ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM, and the ISDB-T BST-OFDM," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 46, no. 2, Jun. 2000
- [175] J. Song et al., "Technical review on Chinese digital terrestrial television broadcasting standard and measurements on some working modes," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 53, no. 1, Mar. 2007
- [176] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R P.526-12, "Propagation by diffraction", February 2012

## GLOSARIO

---

A continuación se detallan en orden alfabético los acrónimos y las abreviaturas aparecidas en el presente documento.

BBC	British Broadcasting Corporation
BER	Bit Error Rate
C/I	Carrier to Interference Ratio
C/N	Carrier to Noise Ratio
DBA	Digital Broadcast Analysis
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EWEA	European Wind Energy Association
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
LOS	Line Of Sight
OFCOM	Office of Communications
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PEC	Perfect Electric Conductor
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence
PSD	Power Spectral Density
QEF	Quasi-Error-Free
RCS	Radar Cross Section
RF	Radiofrecuencia
rpm	Revoluciones por minuto
SNR	Signal to Noise Ratio
TDT	Televisión Digital Terrestre
TSR	Tratamiento de la Señal y Radiocomunicaciones
UE	Unión Europea
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Unión Internacional de Telecomunicaciones – Radiocomunicaciones
UPV/EHU	Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
WWEA	World Wind Energy Association



*To measure is to know... If you cannot measure it, you cannot improve it.*  
- Lord Kelvin

---

## **ANEXOS**

---

El Anexo I recoge las localizaciones de los aerogeneradores del parque eólico de Oiz en sus fases I y II, así como las coordenadas de los centros de transmisión de DVB-T y de otros servicios. El Anexo II muestra un ejemplo de la información recopilada para la planificación de las campañas de medida. El Anexo III recopila las coordenadas de los puntos donde se realizaron las medidas. El Anexo IV incluye la información relativa a la configuración de las simulaciones utilizada para obtener las curvas de BER frente a SNR en función de los espectros Doppler estimados y caracterizados. Por último, el Anexo V recoge las curvas BER frente a SNR relativas a los espectros seleccionados, cuando se simula el canal *medio*.



## ANEXO I: Coordenadas de los aerogeneradores y otros centros

**Tabla A.1. Coordenadas de los aerogeneradores del Parque Eólico Oiz I**

<b>Aerogenerador</b>	<b>UTMx</b>	<b>UTMy</b>	<b>Cota (m)</b>
Oiz I - 30	533382	4786188	933
Oiz I - 29	533463	4786127	960
Oiz I - 28	533533	4786053	961
Oiz I - 27	533587	4785966	959
Oiz I - 26	533672	4785911	948
Oiz I - 25	533743	4785855	939
Oiz I - 24	533808	4785770	930
Oiz I - 23	533896	4785720	920
Oiz I - 22	533981	4785662	920
Oiz I - 21	534057	4785593	921
Oiz I - 20	534130	4785516	914
Oiz I - 19	534200	4785440	899
Oiz I - 18	534265	4785339	885
Oiz I - 17	534319	4785245	881
Oiz I - 16	534379	4785151	879
Oiz I - 15	534458	4785037	850
Oiz I - 14	534425	4784759	846
Oiz I - 13	534500	4784685	841
Oiz I - 12	534556	4784605	848
Oiz I - 11	534660	4784548	850
Oiz I - 10	534716	4784406	853
Oiz I - 9	534856	4784483	846
Oiz I - 8	535198	4784930	805
Oiz I - 7	535285	4784860	792
Oiz I - 6	535358	4784784	800
Oiz I - 5	535446	4784717	801
Oiz I - 4	535540	4784671	810
Oiz I - 3	535600	4784586	809
Oiz I - 2	535658	4784498	802
Oiz I - 1	535687	4784400	778

**Tabla A.2. Coordenadas de los aerogeneradores del Parque Eólico Oiz II**

<b>Aerogenerador</b>	<b>UTMx</b>	<b>UTMy</b>	<b>Cota (m)</b>
Oiz II - 1	531335	4787469	983
Oiz II - 2	531418	4787428	942
Oiz II - 3	531507	4787366	780
Oiz II - 4	531602	4787279	790
Oiz II - 5	531773	4787118	809
Oiz II - 6	531851	4787040	821
Oiz II - 7	531944	4786972	841
Oiz II - 8	532186	4786614	900
Oiz II - 9	532293	4786563	911
Oiz II - 10	532418	4786519	910

**Tabla A.3. Coordenadas de los otros centros de telecomunicación en Oiz**

<b>Centro</b>	<b>UTMx</b>	<b>UTMy</b>	<b>Cota (m)</b>
Vodafone	533083	4786436	1007
Iberdrola	533140	4786440	1008
Telefónica	533215	4786400	1020

## ANEXO II: Ejemplo de ficha de planificación

En el presente anexo se recoge un ejemplo de la información previamente recopilada e incluida en la ficha de planificación antes de realizar las medidas en una determinada localización.

**Tabla A.4. Ejemplo de ficha de planificación**

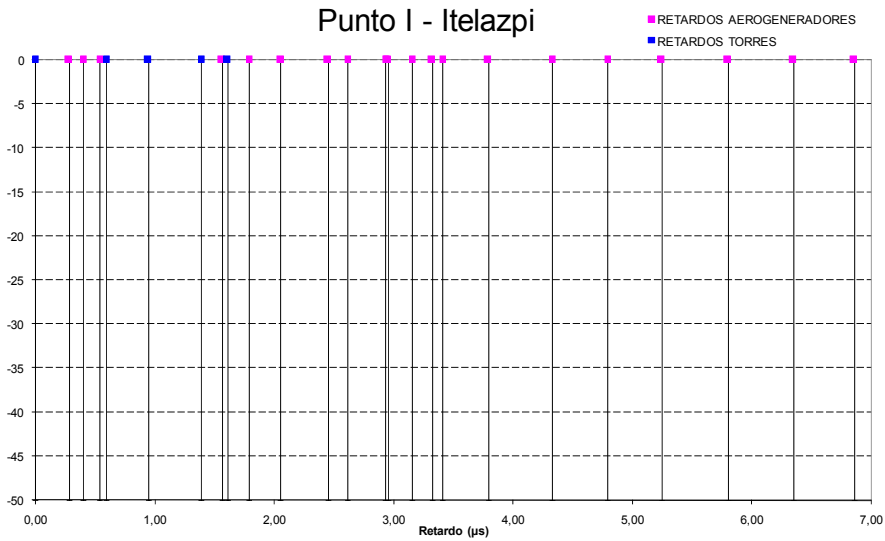
<b>Nombre localización</b>	Punto I	
<b>Descripción</b>	Barrio de Bederiaga, Amorebieta-Etxano	
<b>Coordenadas</b>	UTMx: 0524210 m, UTMY: 4782449 m	
<b>Cota</b>	168 m	
<b>Distancia a los transmisores</b>	Itelazpi	9652,1 m
	Abertis-Telecom	9865,7 m



**Figura A.1. Ejemplo de vista aérea en la ficha de planificación (punto I)**

**Tabla A.5. Información relativa a los aerogeneradores en estudio (punto I, Itelazpi)**

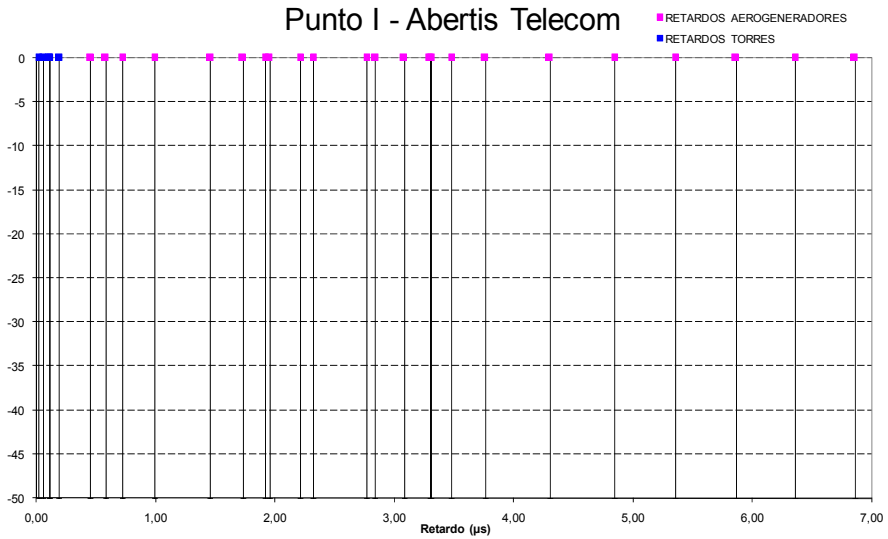
Aero	Retardo relativo directo/reflejado ( $\mu\text{s}$ )	Elevación ( $^{\circ}$ )	Acimut ( $^{\circ}$ )	Visión directa (LoS)
30 – Oiz I	2,45	4,5	59,1	Completa
29 – Oiz I	2,95	4,7	58,1	Completa
28 – Oiz I	3,41	4,7	59,0	Completa
8 – Oiz II	0,28	4,8	147,8	Completa
9 – Oiz II	0,40	4,8	145,0	Completa
10 – Oiz II	0,54	4,8	142,0	Completa



**Figura A.2. Ejemplo de gráfica de retardos en la ficha de planificación (punto I, Itelazpi)**

**Tabla A.6. Información relativa a los aerogeneradores en estudio (punto I, Abertis-Telecom)**

Aero	Retardo relativo directo/reflejado (μs)	Elevación (°)	Acimut (°)	Visión directa (LoS)
30 – Oiz I	0,98	4,5	82,0	Completa
29 – Oiz I	1,46	4,7	74,6	Completa
28 – Oiz I	1,92	4,7	72,6	Completa
8 – Oiz II	0,45	4,8	145,6	Completa
9 – Oiz II	0,58	4,8	143,5	Completa
10 – Oiz II	0,72	4,8	141,2	Completa



**Figura A.3. Ejemplo de gráfica de retardos en la ficha de planificación (punto I, Abertis-Telecom)**

## ANEXO III: Coordenadas de las localizaciones de medida

Tabla A.7. Coordenadas de las localizaciones de medida para el análisis del canal de propagación

Localización	UTMx	UTMy	Cota (m)
1	520080	4786951	117
2	537284	4779795	240
3	538037	4781383	309
4	527610	4781336	99
5	535454	4778453	253
6	536443	4777721	302
7	536178	4777271	257
8	533101	4791593	160
9	531214	4785055	569
10	529358	4782031	238,9
11	524210	4782449	170
12	534866	4790257	428
13	534155	4790693	429
14	533848	4791152	359
15	533513	4791107	327
16	534049	4790552	372
17	520482	4787779	171
18	522352	4790492	457
19	524288	4783052	84
20	523054	4783524	183
21	522078	4785467	80
22	522024	4785001	74
23	523900	4787409	300
24	520605	4786266	93
25	521689	4785888	80
26	529070	4780836	110
27	527945	4781040	100
28	529779	4780937	130
29	527945	4780858	100
30	524163	4782322	170
31	527752	4780024	176
32	527283	4779955	223
33	526380	4779015	381
34	532029	4782320	283
35	537650	4787708	314
36	536584	4788788	190
37	536134	4789603	333
38	526211	4779164	422



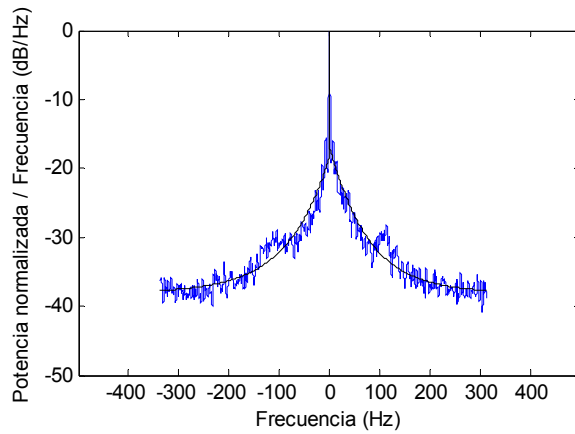
**Tabla A.8. Coordenadas de las localizaciones de medida para el análisis de la calidad de DVB-T**

Localización	UTMx	UTMy	Cota (m)
1	522344	4790484	455
2	534030	4790528	357
3	533839	4791147	359
4	529244	4782735	307
5	528974	4780835	106
6	527791	4780970	100
7	527611	4781372	100
8	531240	4785048	569
9	530769	4781547	273
10	529370	4782052	240
11	531120	4782002	259
12	526887	4780468	262
13	527755	4780030	176
14	527178	4779940	235
15	535419	4790153	381
16	526218	4779155	419
17	528471	4778688	240
18	535874	4788643	289
19	535180	4789887	391
20	539355	4790745	156
21	533199	4790176	219
22	538642	4790983	210
23	537375	4792014	390
24	534050	4789409	314
25	537028	4792622	298
26	528339	4786742	404
27	529233	4786948	407
28	526060	4789154	147
29	527680	4788972	242
30	529439	4790005	290
31	524441	4789369	179
32	523915	4787408	300
33	526233	4787946	149
34	541903	4780655	249
35	541398	4776016	520
36	542823	4778941	467

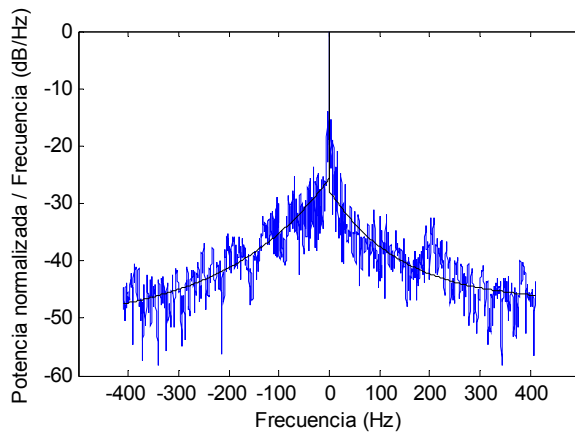
## ANEXO IV: Configuración de las simulaciones BER vs SNR

Tabla A.9. Combinaciones de amplitudes-retardos utilizadas para las simulaciones de las curvas BER frente a SNR

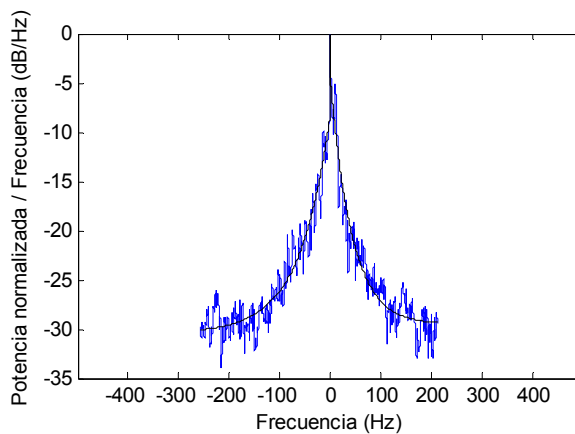
Canal bajo		Canal medio		Canal alto	
Retardo ( $\mu\text{s}$ )	Amplitud (dB)	Retardo ( $\mu\text{s}$ )	Amplitud (dB)	Retardo ( $\mu\text{s}$ )	Amplitud (dB)
0	0	0	0	0	0
0,5	-32,8	0,9	-30,2	1,0	-34,6
1,1	-32,3	1,2	-31,7	1,5	-37,0
1,5	-29,0	1,5	-32,3	1,9	-33,8
1,7	-37,0	1,9	-37,5	2,3	-34,2
2,2	-35,7	2,2	-32,4	2,6	-27,8
2,6	-38,9	2,4	-28,4	3,0	-27,8
		2,8	-23,9	3,4	-28,1
		3,1	-28,0	3,8	-36,7
		3,4	-27,2	4,1	-22,7
		3,7	-33,3	4,6	-21,1
		4,1	-39,5	5,1	-24,6
		4,6	-36,6	5,5	-25,6
		5,0	-32,7	6,1	-23,7
		5,5	-31,1	6,7	-18,4
		6,2	-30,7	6,9	-40,5
		7,3	-32,4	7,2	-19,5
		7,6	-41,6	8,0	-39,7
		8,1	-41,8	8,4	-42,1
		8,6	-40,2	8,8	-32,2
		9,0	-37,1	9,1	-30,1
		9,4	-36,1	9,5	-31,0
		9,8	-39,7	10,0	-26,6
		10,3	-41,6	10,5	-20,8
		10,7	-36,4	11,1	-28,9
				12,0	-19,5
				11,5	-16,3
				12,6	-20,0
				13,2	-23,7



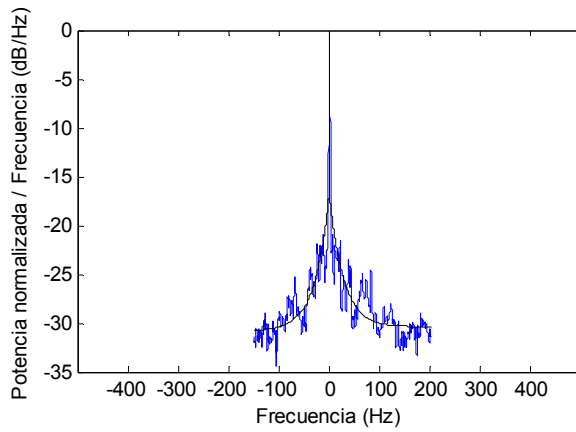
**Figura A.4. Selección 01: espectro Doppler y ajuste exponencial**



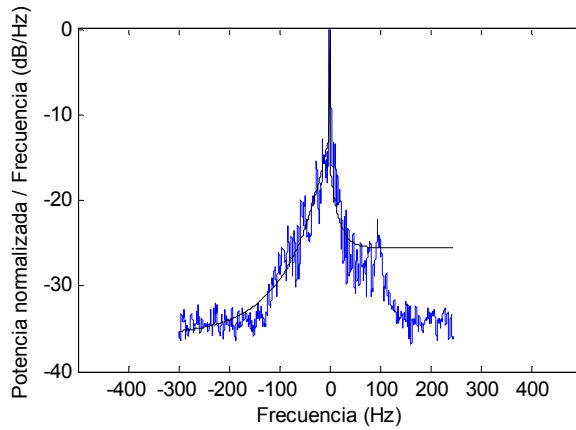
**Figura A.5. Selección 02: espectro Doppler y ajuste exponencial**



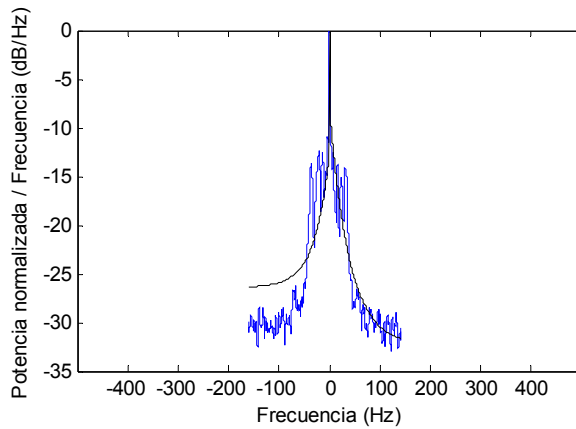
**Figura A.6. Selección 03: espectro Doppler y ajuste exponencial**



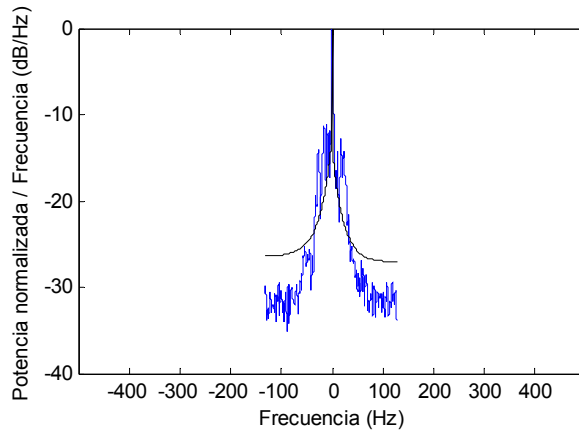
**Figura A.7. Selección 04: espectro Doppler y ajuste exponencial**



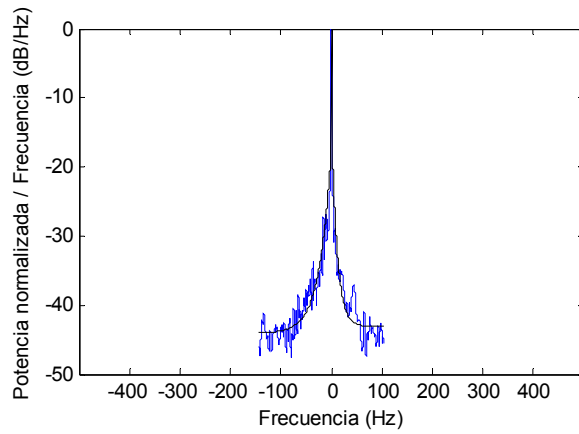
**Figura A.8. Selección 05: espectro Doppler y ajuste exponencial**



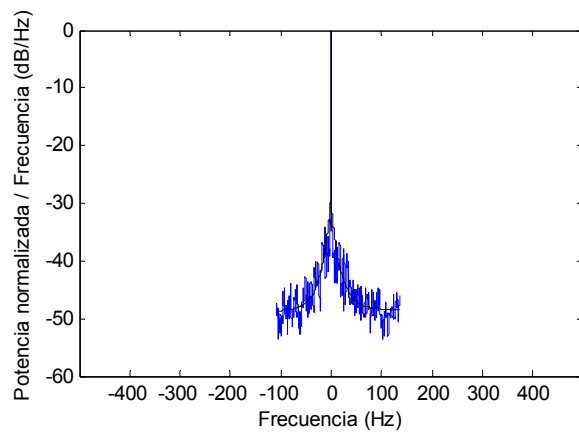
**Figura A.9. Selección 06: espectro Doppler y ajuste exponencial**



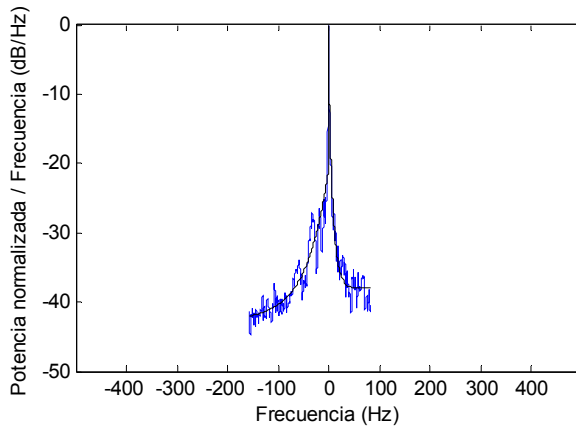
**Figura A.10. Selección 07: espectro Doppler y ajuste exponencial**



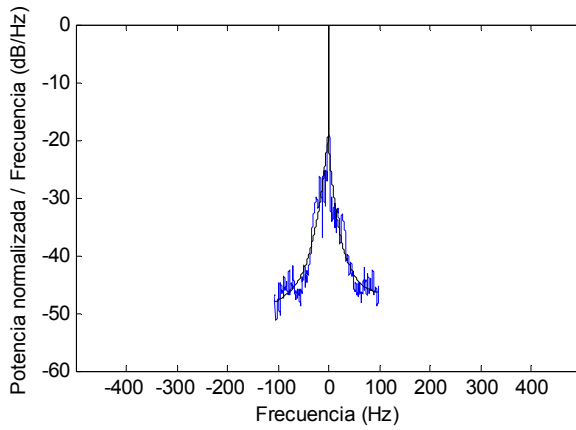
**Figura A.11. Selección 08: espectro Doppler y ajuste exponencial**



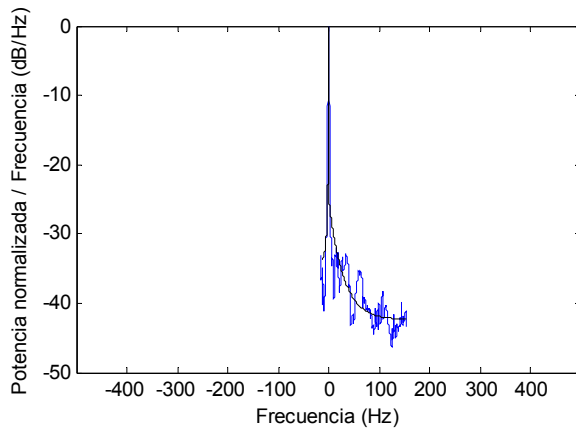
**Figura A.12. Selección 09: espectro Doppler y ajuste exponencial**



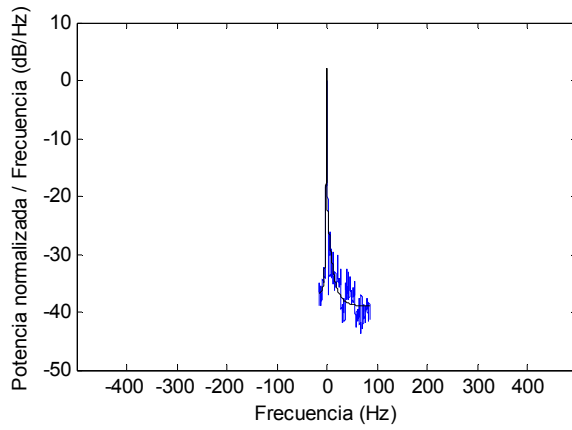
**Figura A.13. Selección 10: espectro Doppler y ajuste exponencial**



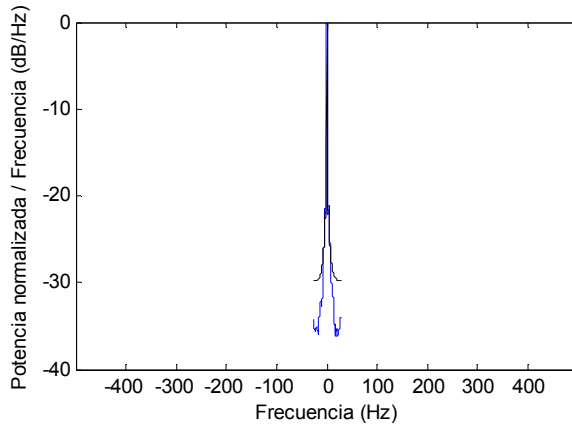
**Figura A.14. Selección 11: espectro Doppler y ajuste exponencial**



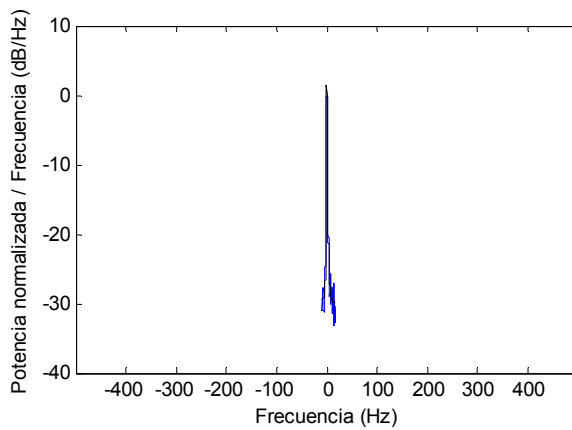
**Figura A.15. Selección 12: espectro Doppler y ajuste exponencial**



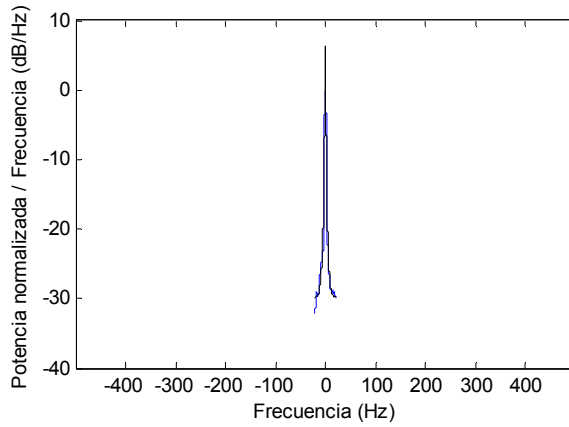
**Figura A.16. Selección 13: espectro Doppler y ajuste exponencial**



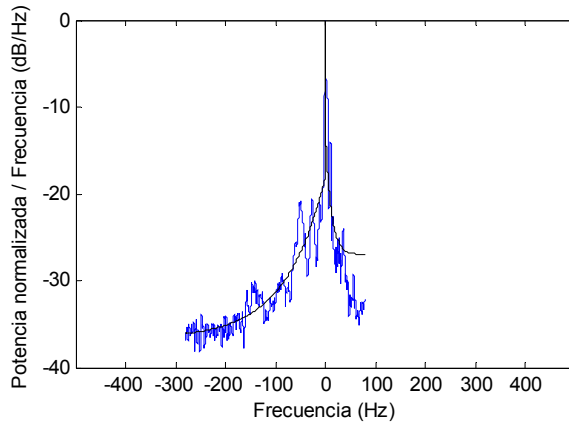
**Figura A.17. Selección 14: espectro Doppler y ajuste exponencial**



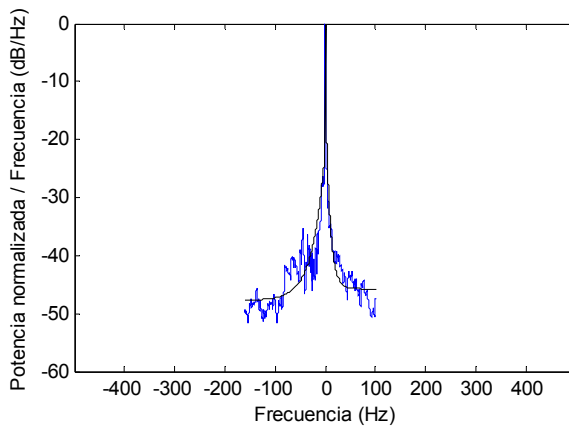
**Figura A.18. Selección 15: espectro Doppler y ajuste exponencial**



**Figura A.19. Selección 16: espectro Doppler y ajuste exponencial**

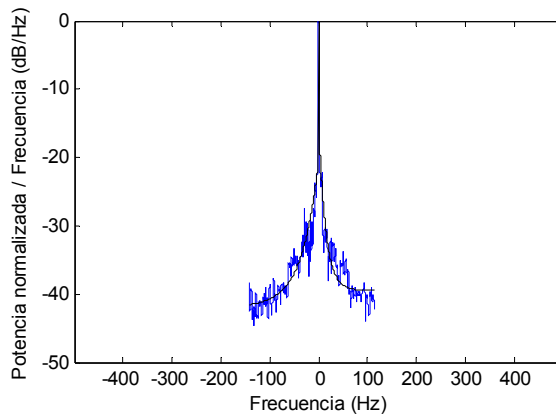


**Figura A.20. Selección 17: espectro Doppler y ajuste exponencial**

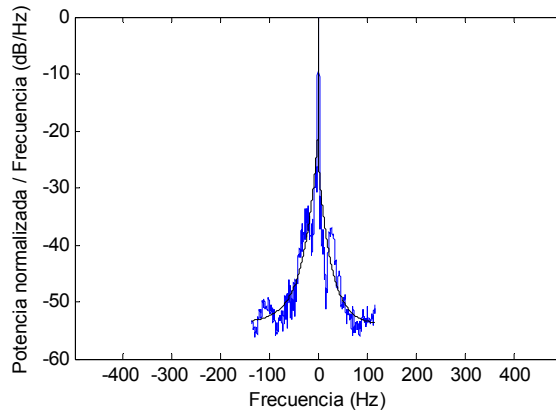


**Figura A.21. Selección 18: espectro Doppler y ajuste exponencial**

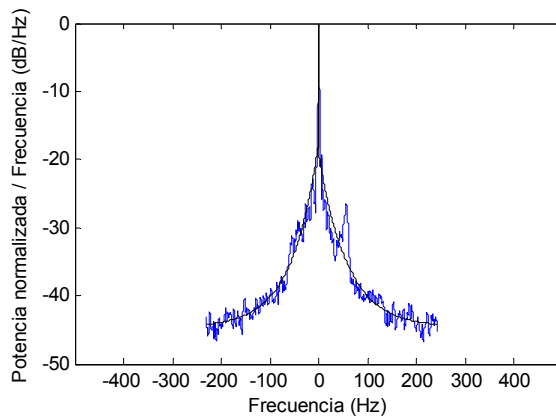




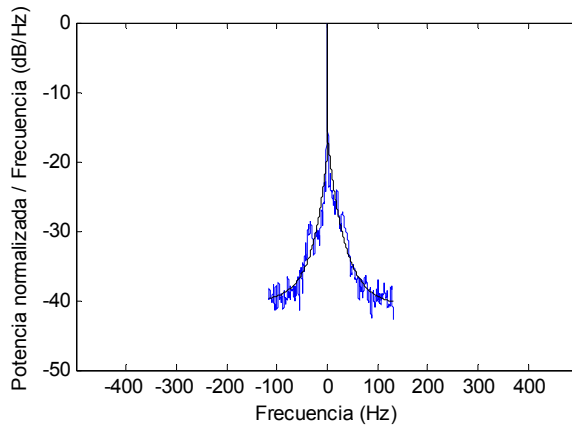
**Figura A.22. Selección 19: espectro Doppler y ajuste exponencial**



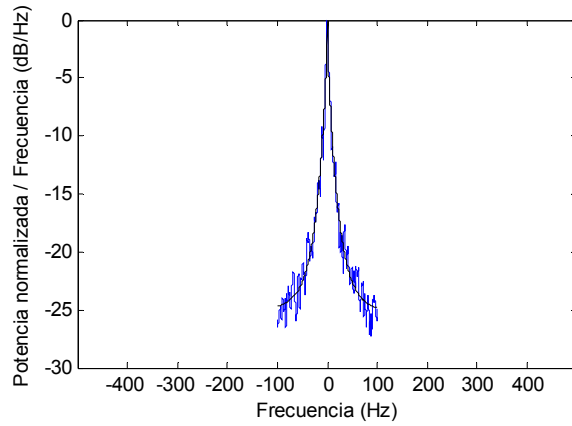
**Figura A.23. Selección 20: espectro Doppler y ajuste exponencial**



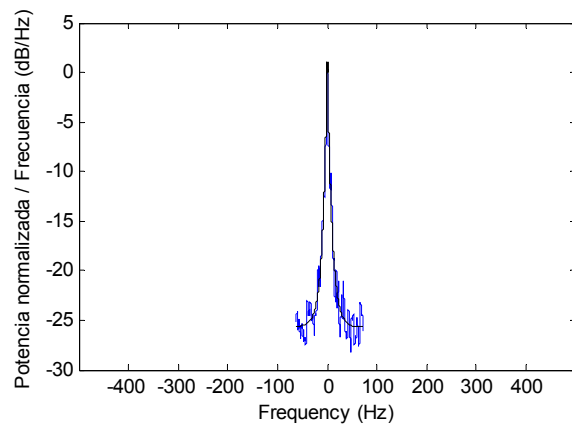
**Figura A.24. Selección 21: espectro Doppler y ajuste exponencial**



**Figura A.25. Selección 22: espectro Doppler y ajuste exponencial**



**Figura A.26. Selección 23: espectro Doppler y ajuste exponencial**



**Figura A.27. Selección 24: espectro Doppler y ajuste exponencial**

## ANEXO V: Curvas BER vs SNR correspondientes al canal medio

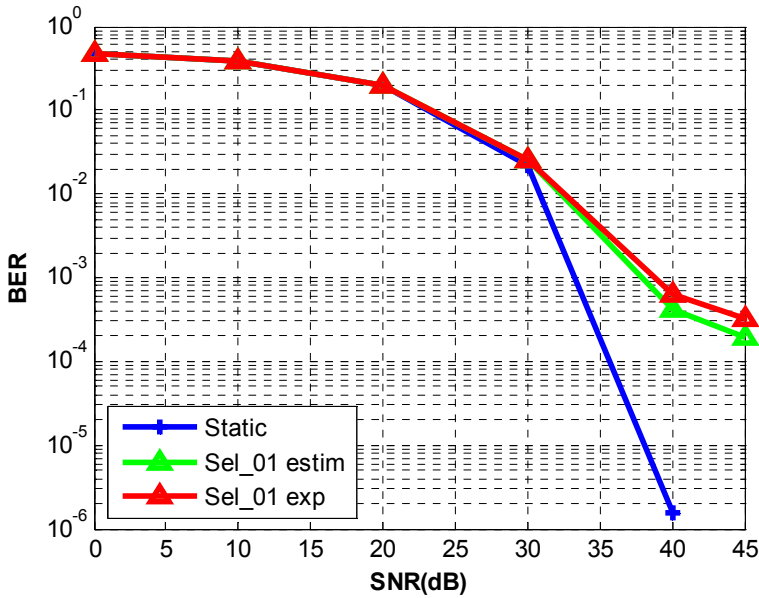


Figura A.28. Selección 01: curvas BER frente a SNR para canal medio

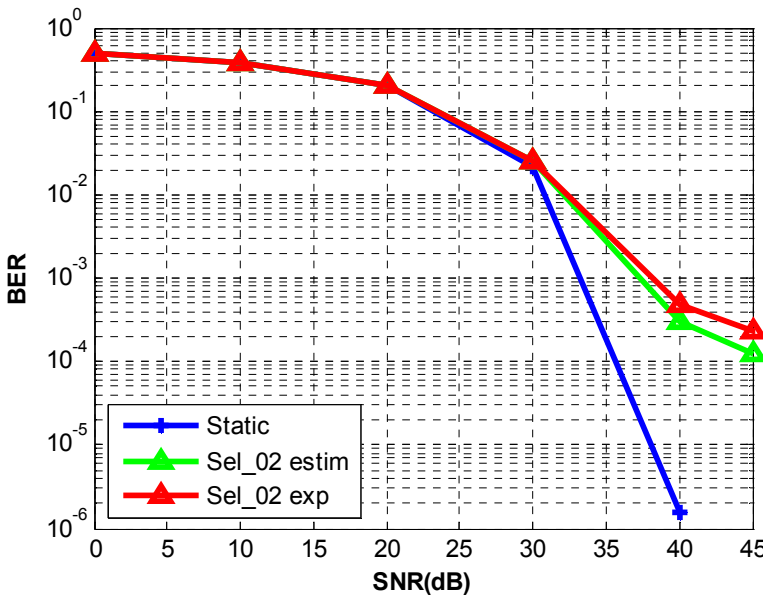


Figura A.29. Selección 02: curvas BER frente a SNR para canal medio

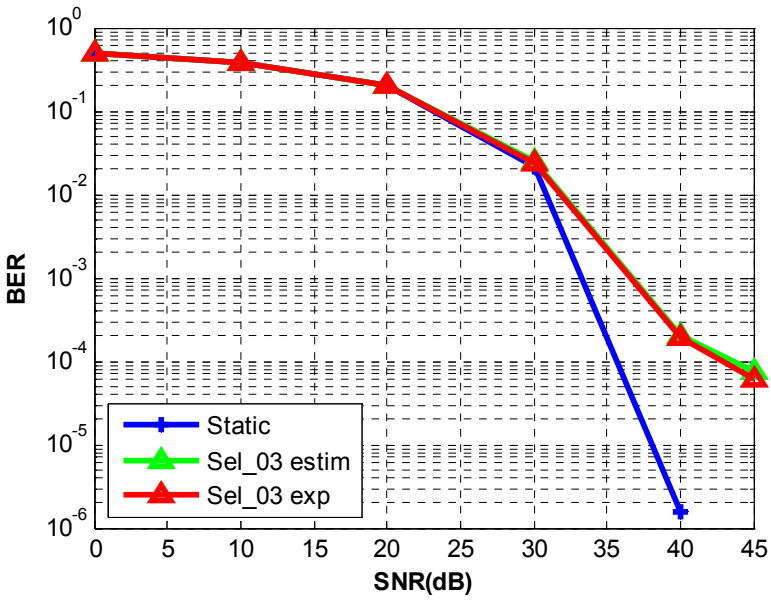


Figura A.30. Selección 03: curvas BER frente a SNR para canal medio

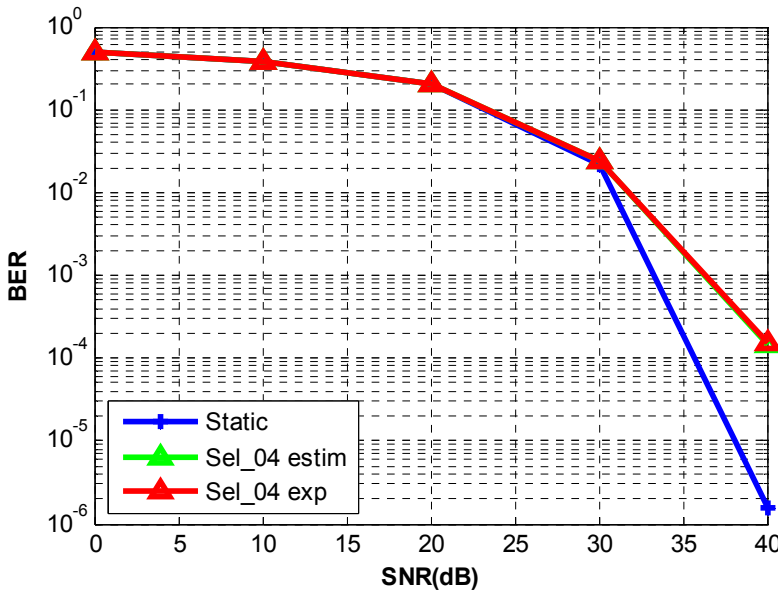


Figura A.31. Selección 04: curvas BER frente a SNR para canal medio

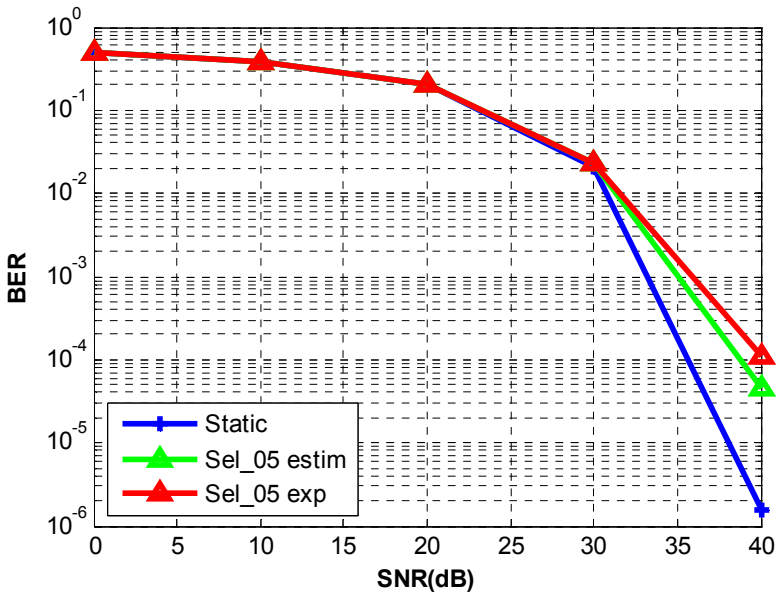


Figura A.32. Selección 05: curvas BER frente a SNR para canal medio

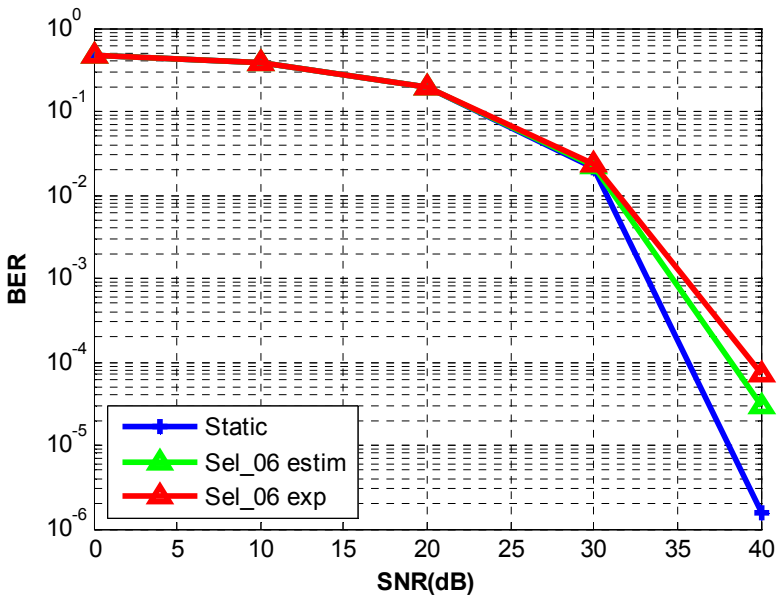


Figura A.33. Selección 06: curvas BER frente a SNR para canal medio

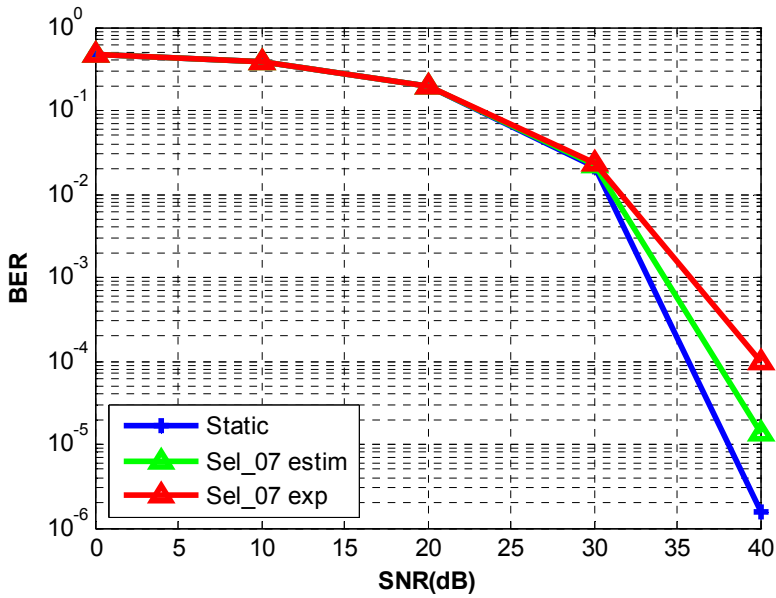


Figura A.34. Selección 07: curvas BER frente a SNR para canal medio

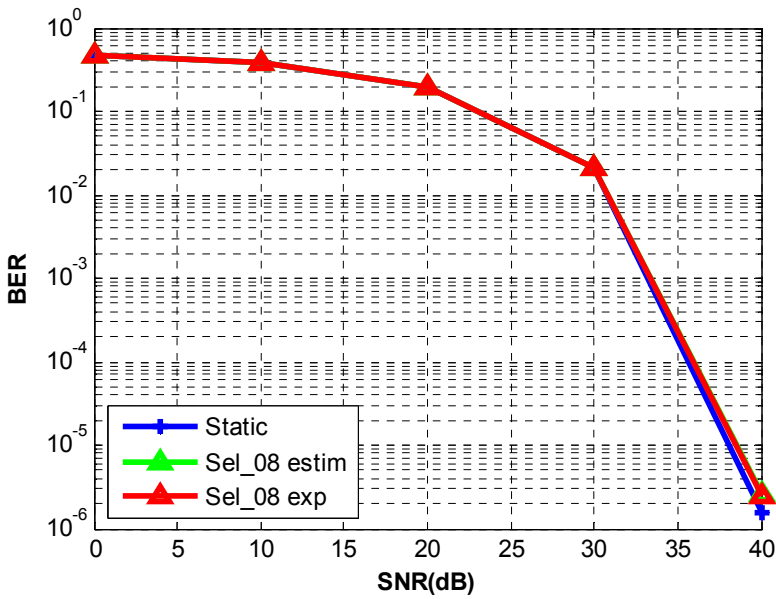


Figura A.35. Selección 08: curvas BER frente a SNR para canal medio

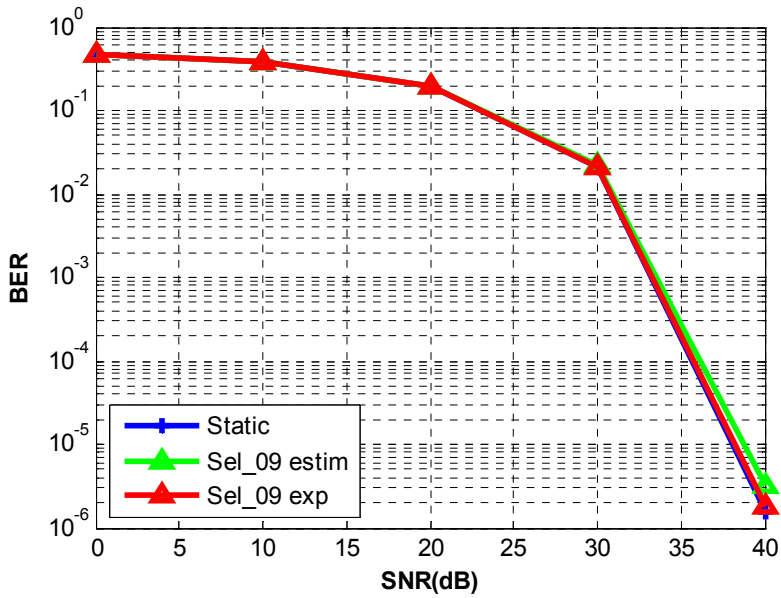


Figura A.36. Selección 09: curvas BER frente a SNR para canal medio

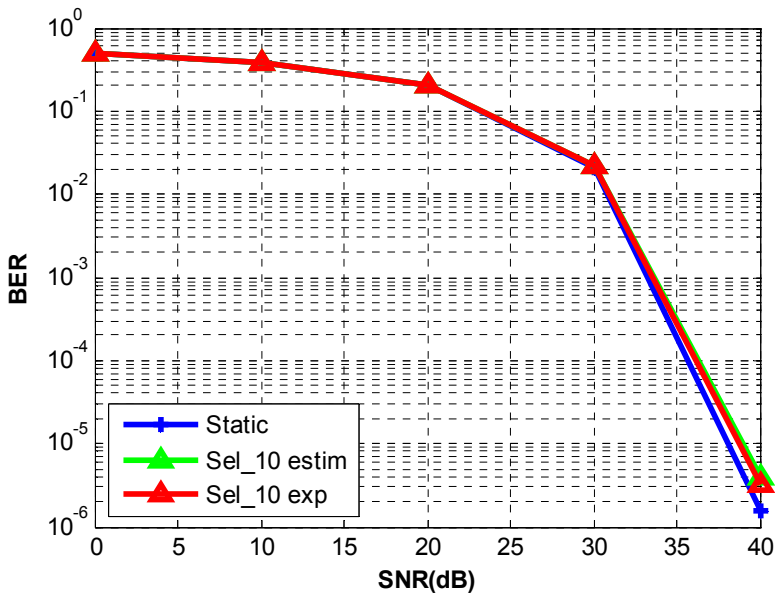


Figura A.37. Selección 10: curvas BER frente a SNR para canal medio

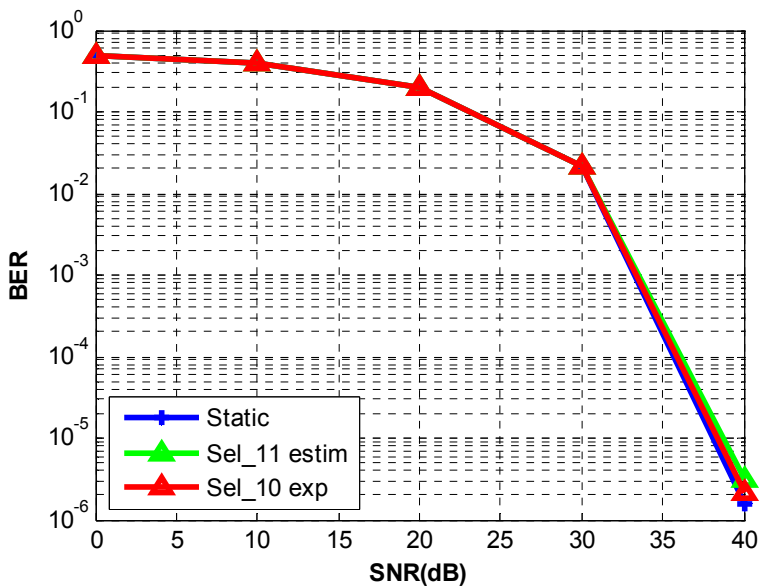


Figura A.38. Selección 11: curvas BER frente a SNR para canal medio

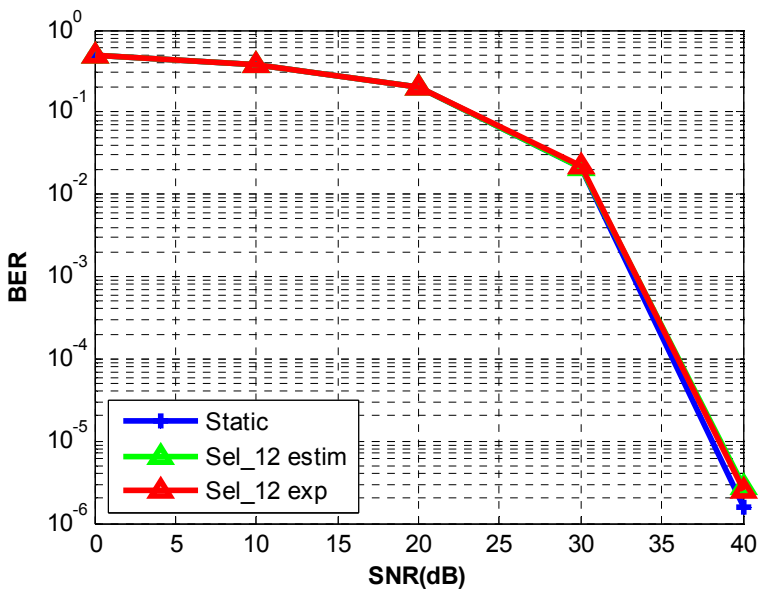


Figura A.39. Selección 12: curvas BER frente a SNR para canal medio



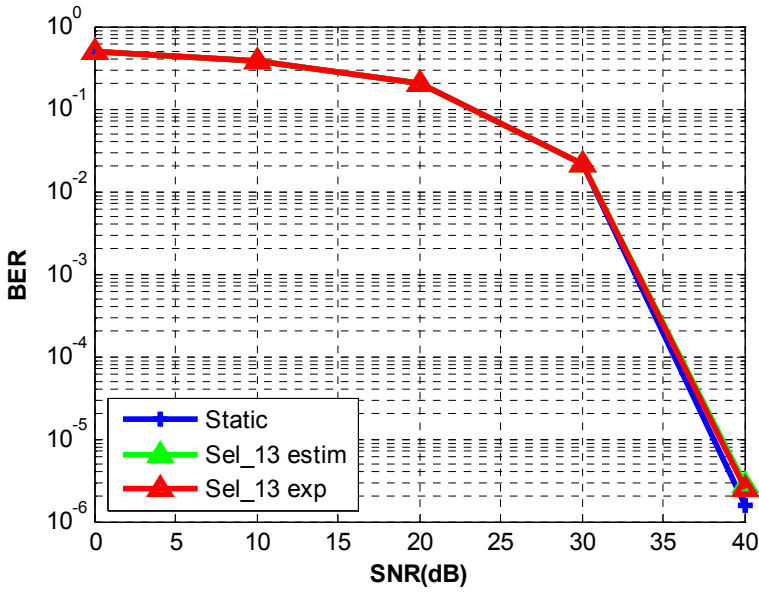


Figura A.40. Selección 13: curvas BER frente a SNR para canal medio

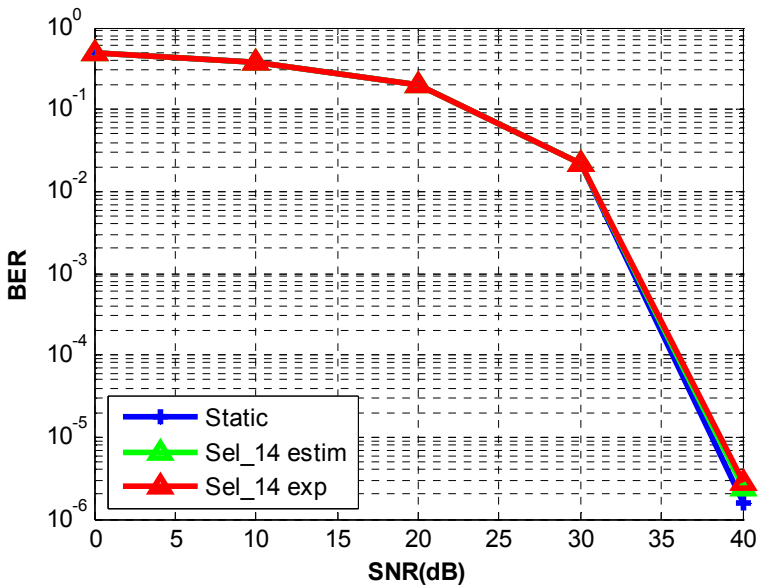


Figura A.41. Selección 14: curvas BER frente a SNR para canal medio

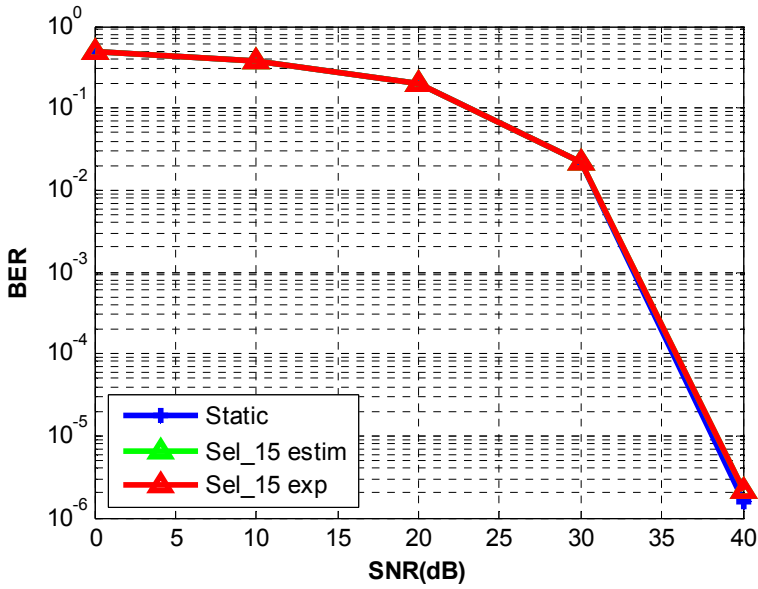


Figura A.42. Selección 15: curvas BER frente a SNR para canal medio

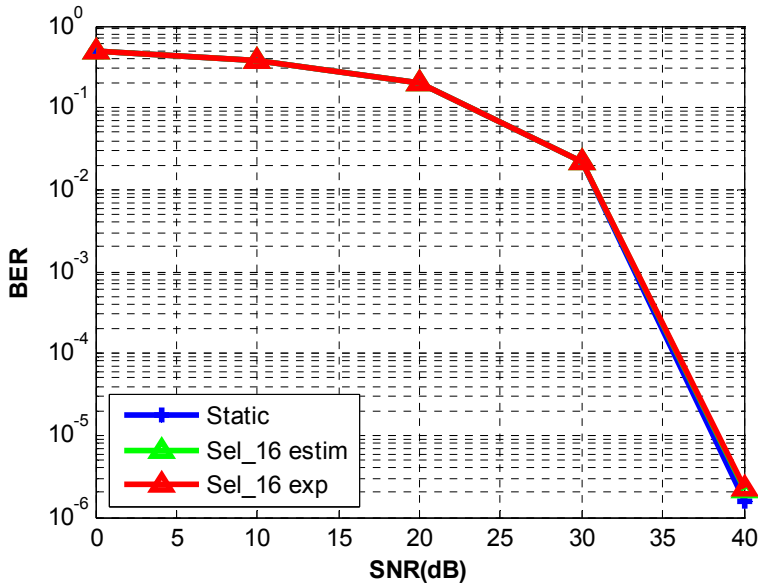


Figura A.43. Selección 16: curvas BER frente a SNR para canal medio

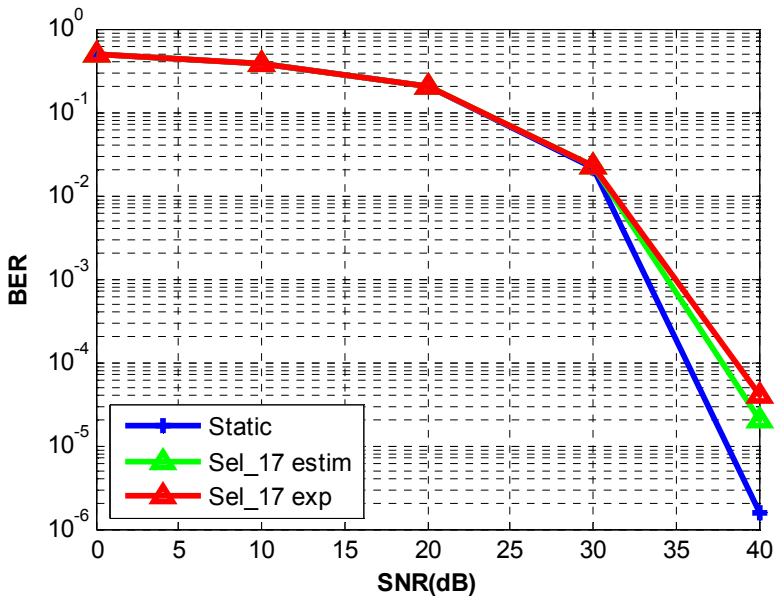


Figura A.44. Selección 17: curvas BER frente a SNR para canal medio

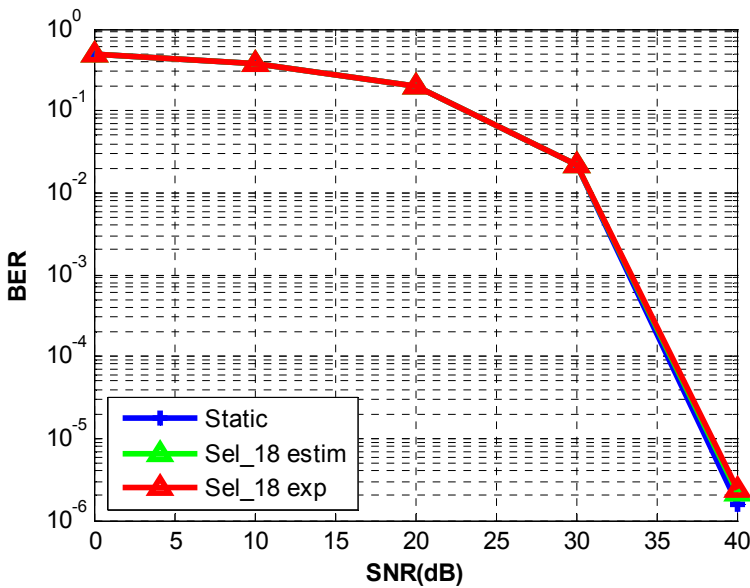


Figura A.45. Selección 18: curvas BER frente a SNR para canal medio

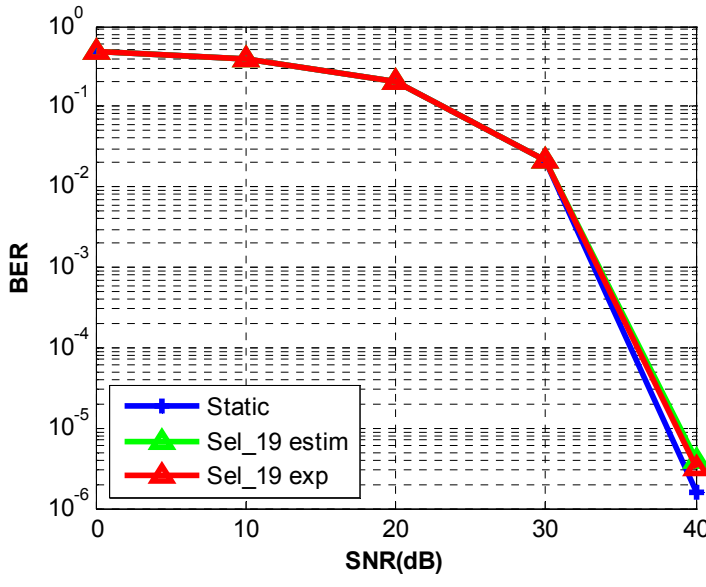


Figura A.46. Selección 19: curvas BER frente a SNR para canal medio

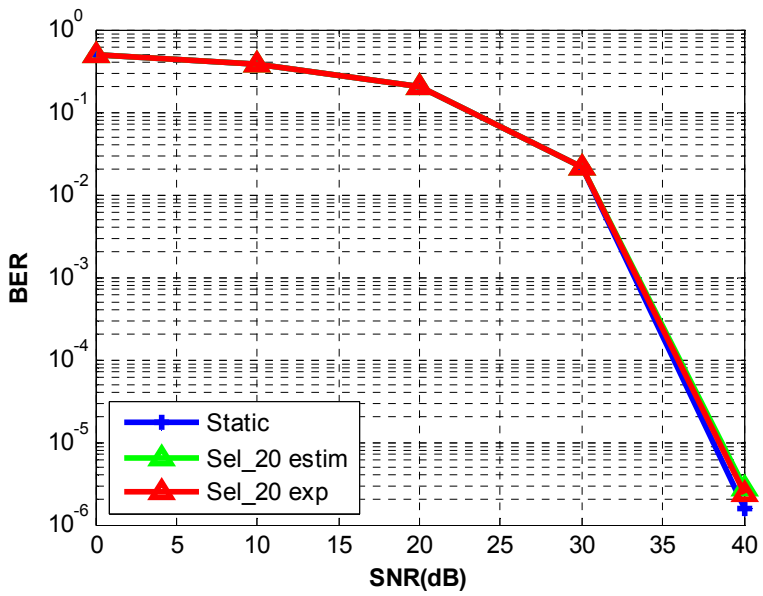


Figura A.47. Selección 20: curvas BER frente a SNR para canal medio

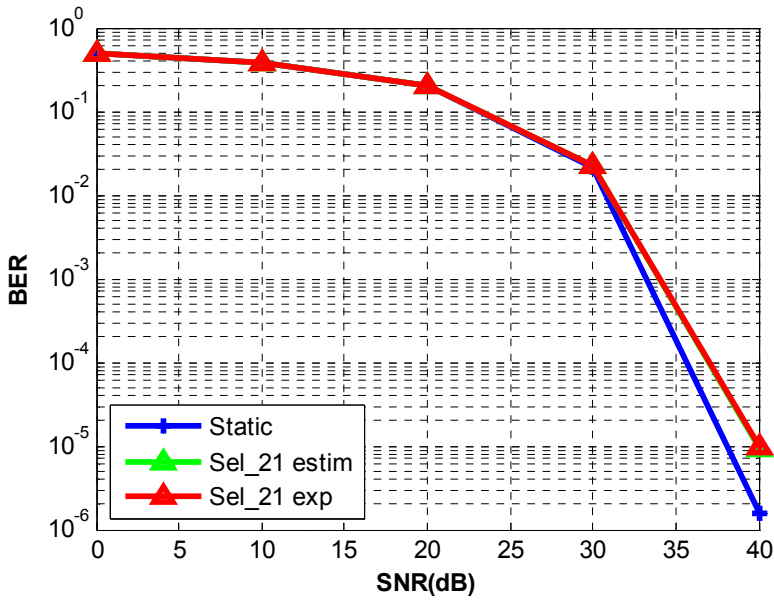


Figura A.48. Selección 21: curvas BER frente a SNR para canal medio

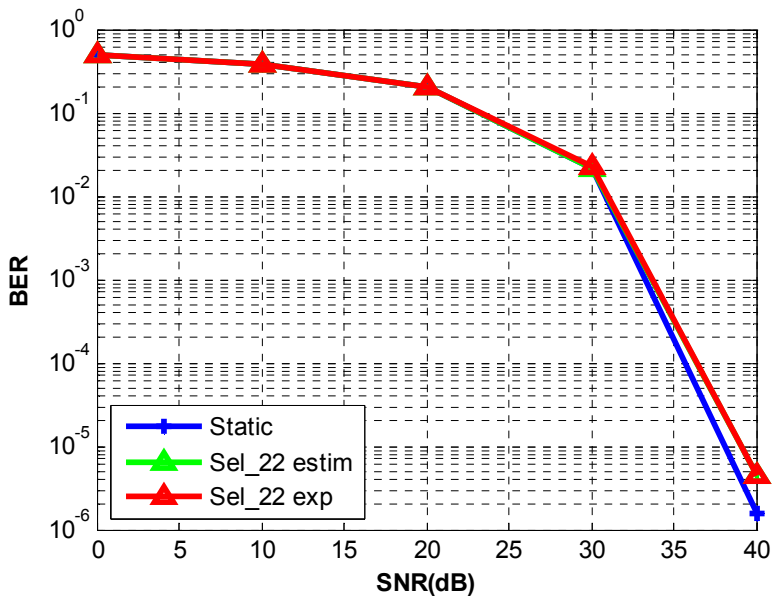


Figura A.49. Selección 22: curvas BER frente a SNR para canal medio

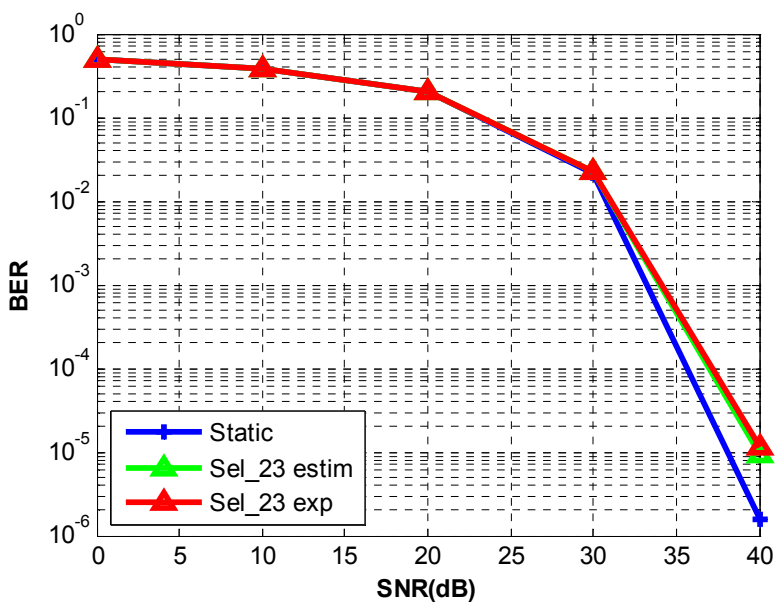


Figura A.50. Selección 23: curvas BER frente a SNR para canal medio

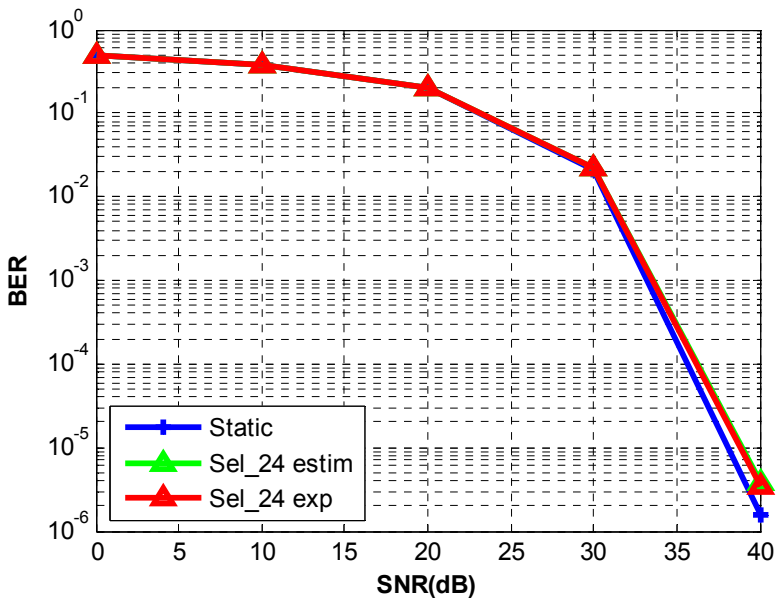


Figura A.51. Selección 24: curvas BER frente a SNR para canal medio

**Tabla A.10. Parámetros de los espectros Doppler seleccionados**

Espectro	$\Delta f$ (Hz)	$\gamma$	Promedio {c, g}	$\Delta SNR_{est}$ (dB)	$R^2$	$\Delta SNR_{exp}$ (dB)
Sel 01	651,11	0,04	38,06	10,02	0,89	1,57
Sel 02	821,82	0,00	49,16	7,46	0,70	6,39*
Sel 03	468,29	0,09	29,96	5,18	0,93	0,22
Sel 04	351,83	0,14	30,59	4,48	0,70	0,11
Sel 05	324,41	0,18	30,66	2,73	0,45	1,29
Sel 06	304,31	0,06	29,34	2,24	0,73	1,04
Sel 07	259,46	0,02	26,78	1,44	0,55	2,37
Sel 08	247,98	0,16	43,59	0,29	0,85	0,05
Sel 09	245,26	0,12	48,58	0,42	0,67	0,34
Sel 10	241,12	0,31	40,32	0,53	0,86	0,13
Sel 11	205,05	0,04	48,12	0,40	0,85	0,23
Sel 12	171,26	0,81	38,15	0,32	0,65	0,05
Sel 13	101,94	0,68	37,83	0,30	0,78	0,03
Sel 14	53,81	0,04	29,90	0,24	0,60	0,08
Sel 15	25,79	0,27	29,64	0,15	0,96	0,01
Sel 16	19,60	0,01	21,17	0,17	0,91	0,02
Sel 17	360,38	0,56	31,83	1,82	0,74	0,74
Sel 18	261,35	0,23	46,74	0,18	0,78	0,05
Sel 19	256,45	0,10	40,66	0,55	0,82	0,16
Sel 20	253,91	0,08	53,86	0,32	0,80	0,11
Sel 21	473,87	0,03	44,60	1,13	0,90	0,06
Sel 22	247,96	0,06	40,47	0,61	0,88	0,02
Sel 23	199,24	0,00	24,99	1,16	0,96	0,12
Sel 24	135,56	0,05	25,68	0,51	0,96	0,07

\*La diferencia se ve afectada por el umbral de ruido de la curva SNR vs BER

