

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R BT.1893-1
(10/2015)

**Métodos de evaluación de la degradación
causada en la recepción de la televisión
digital por turbinas eólicas**

Serie BT
Servicio de radiodifusión
(televisión)



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2017

© UIT 2017

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R BT.1893-1

Métodos de evaluación de la degradación causada en la recepción de la televisión digital por turbinas eólicas

(Cuestión UIT-R 69-1/6)

(2011-2015)

Cometido

Esta Recomendación define métodos para evaluar la degradación que podría ocasionar a la recepción de televisión digital una instalación de turbina eólica consistente en una o varias máquinas.

NOTA 1 – La Recomendación UIT-R BT.805 señala el «Efecto de la degradación causada a la recepción de televisión analógica por una turbina eólica».

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las reflexiones en objetos móviles, tales como las aspas de una turbina eólica, pueden causar graves degradaciones en la recepción de televisión;
- b) que esos efectos son particularmente importantes ya que la degradación causada puede ser casi permanente y reducirse únicamente durante los periodos en que la turbina eólica no funciona;
- c) que es importante disponer de un método sencillo para calcular la posible degradación que podría originar la instalación de una turbina eólica;
- d) que se están investigando técnicas de supresión de la reflexión con las que podría lograrse cierta mejora de la degradación causada por las turbinas eólicas;
- e) que las señales reflejadas pueden tener distintos efectos sobre las señales de la televisión digital;
- f) que las señales reflejadas pueden tener distintos efectos dependiendo de los sistemas de modulación digital;
- g) que las aspas de las turbinas eólicas están fabricadas generalmente con materiales compuestos que tienen distintos coeficientes de reflexión que los metales;
- h) que el diseño de las aspas de las turbinas eólicas puede incluir elementos adicionales que también podrían tener repercusiones sobre las señales de televisión;
- i) que también debe tenerse en cuenta la dispersión provocada por los mástiles de las turbinas eólicas;
- j) que el emplazamiento de las turbinas eólicas y sus patrones de dispersión tienen repercusiones sobre el nivel de degradación en los planos horizontal y vertical;
- k) que el número de turbinas eólicas en un emplazamiento tendrá efecto sobre los patrones de dispersión,

observando

- a) que el Informe UIT-R BT.2142 presenta un amplio análisis de los efectos de la dispersión provocada por las turbinas eólicas en las señales de televisión digital;
- b) que el método indicado en el Anexo 1 es una versión simplificada del análisis completo que figura en la Parte A del Informe UIT-R BT.2142;

c) que el Informe UIT-R BT.2142 proporciona una explicación detallada del método que figura en los Adjuntos 2, 3 y 4 que tratan los problemas identificados en los *recomienda además* 1, 2 y 3 de la Recomendación UIT-R BT.1893-0 sobre los efectos de la dispersión producida por el mástil, el efecto de las aspas en rotación, la composición de las aspas no metálicas y el diagrama de elevación de la dispersión,

recomienda

1 que se utilice el método expuesto en el Anexo 1 para evaluar la posible interferencia que podría causar una sola turbina eólica en la recepción de televisión digital;

2 que se puede utilizar el método que figura en el Anexo 2 para obtener un modelo de canal que caracterice la propagación por trayectos múltiples en presencia de múltiples turbinas eólicas¹ en la banda de radiodifusión de ondas decimétricas;

3 que se puede utilizar el método que figura en el Anexo 3 para realizar una evaluación de la posible interferencia proveniente de un parque eólico sobre la recepción de la televisión digital (DVB-T),

alienta

a las administraciones a que señalen la presente Recomendación a la atención de las autoridades competentes de sus países.

Anexo 1

Modelo simplificado de la degradación causada a la recepción de televisión por una turbina eólica

La Fig. 1 representa la situación general del problema de retrodispersión causada por una turbina eólica.

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 supone que el emplazamiento de recepción se encuentra a una distancia r (m) del aspa² de la turbina eólica. Se puede definir como sigue un «coeficiente de dispersión», ρ , que incluye las pérdidas de trayecto en espacio libre en el trayecto que va desde el emplazamiento de la turbina eólica hasta el emplazamiento de recepción:

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

donde:

$$g(\theta) = \text{senc}^2 \left(\frac{\bar{W}}{\lambda} (\cos \theta - \cos \theta_0) \right) \text{sen } \theta$$

1 Los emplazamientos con múltiples turbinas eólicas se denominan habitualmente «parques eólicos».

2 Este análisis supone que las aspas de la turbina eólica son metálicas y aproximadamente triangulares. No obstante, las aspas suelen ser de fibra de vidrio o de otro material compuesto, lo que provoca una dispersión de 6 a 10 dB menor que en el caso de un aspa metálica.

y:

\bar{W} : anchura media del aspa (m)

λ : longitud de onda (m)

A : área del aspa (m²)

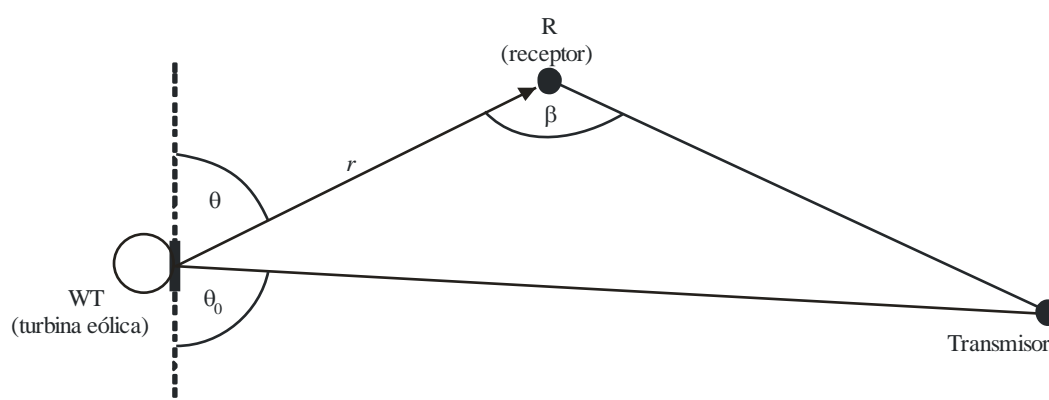
θ_0 : ángulo de la señal incidente en el aspa

θ : ángulo de la señal dispersada por el aspa.

El máximo valor de este coeficiente de dispersión debido a un aspa en posición vertical aparece cuando las direcciones incidente y de dispersión son perpendiculares al aspa, y viene dado por:

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{A}{\lambda r}$$

FIGURA 1



BT.1893-01

En el caso de un trayecto en espacio libre, de una longitud r (m) entre la turbina eólica y el emplazamiento de recepción, la intensidad de campo no deseada puede calcularse como sigue:

$$FSWT + 20 \log \rho$$

El coeficiente de dispersión ρ sólo tiene en cuenta la retrodispersión provocada por las aspas. Cabe señalar que el mástil de soporte metálico también contribuye de manera significativa a la retrodispersión estática. La dispersión hacia delante producida por las aspas puede ser importante, pero tiene una amplitud inferior que la retrodispersión y es más complicada de calcular. La dispersión hacia delante causada por el mástil es mínima. También hay que indicar que el diagrama de dispersión varía al menos en 10 dB cuando las aspas giran. Para un análisis completo consúltese el Informe UIT-R BT.2142.

La discriminación por directividad de la antena receptora en función de β (como ilustra la Fig. 1) aparece en la Recomendación UIT-R BT.419 y debe aplicarse para determinar la relación entre las señales deseada y no deseada en cualquier emplazamiento de recepción específico.

En el Adjunto 1 figura un ejemplo de utilización de este método.

Adjunto 1 al Anexo 1

Ejemplo de utilización del método de evaluación simplificado

Como muestra la Fig. 1 del Anexo 1, se identifica el punto de cualquier emplazamiento del receptor cerca del sitio donde se instalará la turbina eólica propuesta.

Como primer paso, se calcula o, preferentemente, se miden los valores de intensidad de campo, *FSR*, en los diversos emplazamientos del receptor.

No es probable que sea necesario ampliar la zona de investigación a más de unos 10 km desde el emplazamiento propuesto para la instalación de la turbina eólica (o desde los emplazamientos, si hubiese múltiples turbinas eólicas). Sin embargo, en circunstancias especiales, por ejemplo edificios apantallados con respecto al transmisor deseado pero con visibilidad directa de la turbina eólica, puede que sea preciso ampliar dicha zona.

Se calcula o, preferentemente, se mide la intensidad de campo, *FSWT*, en el emplazamiento de la turbina eólica cerca de la altura del centro de rotación de las aspas.

Para cada uno de los puntos de recepción, *R*:

- se calcula el coeficiente de dispersión, ρ , para el trayecto entre la turbina eólica y el receptor;
- se calcula la intensidad de campo no deseada mediante la ecuación $FSWT + 20 \log \rho$;
- se calcula la intensidad de campo deseada *FSR*;
- se calcula la relación entre señales deseada y no deseada, teniendo presente la discriminación por directividad de la antena de recepción;
- se utiliza la información del Anexo 2 para evaluar la posible degradación causada a la recepción de la televisión digital teniendo en cuenta la relación entre las señales deseada y no deseada en el punto de recepción.

Los resultados del estudio pueden presentarse a continuación en forma de un mapa que muestre las zonas/localizaciones donde pueden aparecer degradaciones en la recepción.

Cabe señalar que el proceso es más complicado si hay varias turbinas eólicas en un emplazamiento determinado, puesto que en ese caso existen varias fuentes posibles de degradación en cada emplazamiento de recepción. El Informe UIT-R BT.2142 proporciona ejemplos de predicciones en el caso de un gran parque eólico.

Anexo 2

Modelo de canal para caracterizar la propagación de la señal en presencia de un parque eólico en las bandas de ondas decimétricas de radiodifusión

Introducción

Cabe destacar que el modelo de canal es independiente de la norma de televisión y, por tanto, se puede utilizar para estimar los posibles efectos de un parque eólico sobre cualquier servicio de televisión prestado en la banda de ondas decimétricas.

El modelo de canal para la propagación en presencia de turbinas eólicas es un modelo línea de retardo con tomas con diversos trayectos, con:

- los retardos correspondientes;
- las amplitudes medias; y
- el espectro Doppler asociado a cada trayecto para tener en cuenta la variabilidad producida por la rotación de las aspas.

En el modelo de canal se pueden adaptar todos estos componentes a las características propias de cada caso sometido a estudio. En concreto, estos parámetros se especifican para cada ubicación de recepción en la zona de cobertura de un transmisor potencialmente afectado.

Para ello, se puede utilizar una base de datos digital del terreno para dividir la zona de cobertura en pequeñas cuadrículas de un determinado tamaño (pixel). Se obtendrían así, como se explica a continuación, los parámetros del modelo de canal para esas condiciones concretas en cada una de las ubicaciones centrales de esos píxeles. Este procedimiento se puede implementar fácilmente en las herramientas de planificación y proporciona una visión general rápida de la posible degradación debida al parque eólico.

La adaptación del modelo de canal a las características particulares del caso sometido a estudio requiere ciertos datos de entrada que se recogen en el Cuadro 1. En consecuencia, los parámetros necesarios que se obtienen de los datos que figuran ingresados en el Cuadro 1 se incluyen en el Cuadro 2.

CUADRO 1

Datos de entrada para adaptar el modelo de canal a las características concretas de un caso sometido a estudio

	Tipo	Descripción
Para cada turbina eólica	Posición	Coordenadas geográficas, altitud del terreno (m)
	Dimensiones del mástil	Dimensión vertical del mástil (m). Diámetros inferior y superior del mástil (m); diámetro de la parte más alta del mástil (justo por debajo de la góndola) y diámetro de la base del mástil (a nivel del suelo)
	Longitud de las aspas l	Dimensión longitudinal de las aspas (m)
	Velocidad máxima de rotación, $\omega_{m\acute{a}x}$	Velocidad máxima de rotación de las aspas (rpm)

CUADRO 1 (cont.)

	Tipo	Descripción
Transmisor	Posición	Coordenadas geográficas, incluida la altitud del terreno (m)
	Diagrama de radiación del transmisor	Diagrama de radiación de la antena del transmisor
	Altura de la antena	Altura sobre el nivel del suelo del centro geométrico de la antena en la torre de comunicaciones en la que se encuentra (m)
	Frecuencia, f	Frecuencia de trabajo en la banda de ondas decimétricas (Hz)
	Potencia, P_t	Potencia máxima del transmisor (W)
Receptor	Posición	Coordenadas geográficas, incluida la altitud del terreno (m)
	Diagrama de radiación del receptor	Diagrama de radiación de la antena del receptor
	Altura de la antena del receptor	Altura sobre el nivel del suelo (m)

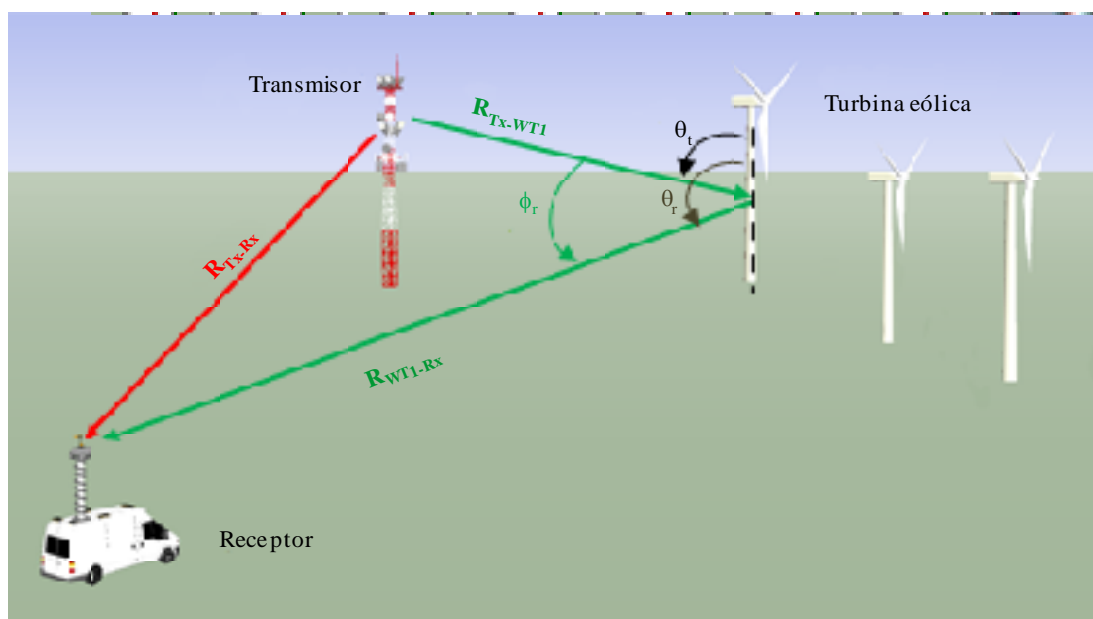
CUADRO 2

Datos calculados a partir de los datos de entrada del Cuadro 1

Símbolo	Descripción
R_{Tx-WTi}	Distancia entre el transmisor y la turbina eólica (m) para la turbina eólica WT
R_{WTi-Rx}	Turbina eólica WT, distancia entre la turbina eólica y el receptor (m)
R_{Tx-Rx}	Distancia entre el transmisor y el receptor (m)
G_{Tx-WTi}	Ganancia del diagrama de radiación del transmisor hacia la i -ésima turbina eólica (valor numérico relativo a la antena isotrópica)
G_{Rx-WTi}	Ganancia del diagrama de radiación del receptor hacia la i -ésima turbina eólica (valor numérico relativo a la antena isotrópica)
G_{Tx-Rx}	Ganancia de la antena del transmisor hacia el receptor (valor numérico relativo a la antena isotrópica)
G_{Rx-Tx}	Ganancia máxima de la antena receptora (valor numérico relativo a la antena isotrópica)
r	Radio medio del mástil (m), calculado como la media aritmética de los radios inferior y superior
L	Longitud de la superficie inclinada del mástil, que es un cono circular recto truncado (m); se puede aproximar a la altura vertical del mástil
ϕ_r	Ángulo biestático en el plano horizontal (antena transmisora – turbina eólica-antena receptora) medido en planta, para cada turbina eólica (radianes)
θ_t	Posición angular de la antena transmisora de televisión en el plano vertical medido desde el zenit, con respecto a cada turbina eólica, tomando como puntos de referencia la altura de la antena transmisora y el punto de altura mitad del mástil (radianes)
θ_r	Posición angular de la antena receptora de televisión en el plano vertical medido desde el zenit, con respecto a cada turbina eólica, tomando como puntos de referencia la altura de la antena receptora y el punto de altura mitad del mástil (radianes)

La Fig. 2 muestra una vista de la situación general de interferencia del parque eólico.

FIGURA 2
Vista de la situación general de interferencia del parque eólico



BT.189302

Número de trayectos

El número de trayectos es en primera aproximación el número total de turbinas eólicas del parque eólico, más un trayecto estático correspondiente a la señal proveniente del transmisor. Se puede reducir el número de trayectos dependiendo de los resultados obtenidos para sus retardos y amplitudes, como se explica en las subsecciones siguientes.

Retardos relativos de los trayectos

El retardo relativo τ_i (s) de la señal dispersada en cada turbina eólica se calcula en función de la diferencia de distancia entre el trayecto directo (antena transmisora de televisión – antena receptora de televisión) y el trayecto de la señal dispersada (antena transmisora de televisión – turbina eólica – antena receptora de televisión) mediante la ecuación (1).

$$\tau_i = \frac{(R_{Tx-WT_i} + R_{WT_i-Rx} - R_{Tx-Rx})}{c} \quad (1)$$

donde:

- R_{Tx-WT_i} : distancia entre la antena transmisora y la i-ésima turbina eólica (m)
- R_{WT_i-Rx} : distancia entre la i-ésima turbina eólica y la antena receptora (m)
- R_{Tx-Rx} : distancia entre la antena transmisora y la antena receptora (m)
- c : velocidad de la luz (m/s).

Amplitud media de los trayectos

Se toma como referencia el trayecto estático con retardo relativo cero (es decir, el trayecto entre la antena transmisora y la antena receptora), de forma que su amplitud media es de 0 dB. Así, la amplitud relativa media de cada trayecto variable con el tiempo viene dada por la relación de potencias entre la potencia de la señal dispersada en la correspondiente turbina eólica $P_{Tx-WTi-Rx}$ y la potencia de la señal directa proveniente del transmisor P_{Tx-Rx} .

La potencia directa de la antena transmisora en la ubicación del receptor P_{Tx-Rx} , se calcula como una función de la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora R_{Tx-Rx} , la ganancia de la antena transmisora en la dirección de la antena receptora G_{Tx-Rx} , la ganancia máxima de la antena receptora G_{Rx-Tx} y la longitud de onda λ , además de las pérdidas de propagación adicionales correspondientes L_{prop} (tales como las pérdidas de difracción debidas a las características del terreno), como se muestra en la ecuación (2).

$$P_{Tx-Rx} = \frac{P_t G_{Tx-Rx} G_{Rx-Tx} \lambda^2 L_{prop}}{(4\pi)^2 R_{Tx-Rx}^2} \quad (2)$$

donde:

- P_t : potencia máxima del transmisor (W)
- G_{Tx-Rx} : ganancia de la antena transmisora en la dirección de la antena receptora (adimensional)
- G_{Rx-Tx} : ganancia máxima de la antena receptora (adimensional)
- L_{prop} : pérdidas de propagación (adimensional)
- R_{Tx-Rx} : distancia entre el transmisor y el receptor (m)
- λ : longitud de onda (m).

La potencia de la señal dispersada en la ubicación del receptor $P_{Tx-WTi-Rx}$ para cada turbina se calcula mediante la ecuación del radar biestático, conforme a la ecuación (3).

$$P_{Tx-WTi-Rx} = \frac{P_t G_{Tx-WTi} G_{Rx-WTi} \lambda^2 \sigma_i}{(4\pi)^3 R_{Tx-WTi}^2 R_{WTi-Rx}^2} \quad (3)$$

donde:

- P_t : potencia máxima del transmisor (W)
- G_{Tx-WTi} : ganancia de la antena transmisora en la dirección de la turbina eólica i (adimensional)
- G_{Rx-WTi} : ganancia de la antena receptora en la dirección de la turbina eólica i (adimensional)
- σ_i : sección transversal del radar biestático (RCS) del mástil en la dirección de la antena receptora (m²)
- R_{Tx-WTi} : distancia entre la antena transmisora y la i -ésima turbina eólica (m)
- R_{WTi-Rx} : distancia entre la i -ésima turbina eólica y la antena receptora (m)
- λ : longitud de onda (m).

La RCS del mástil en la dirección de la antena receptora σ_i (m²) se obtiene mediante:

$$\sigma_i(\phi_r, \theta_t) = krL_{nf}^2 \sqrt{\frac{1 + \cos \phi_r}{2}} \sin \theta_t \quad (4)$$

donde:

- k : número de onda $k=2\pi/\lambda$ (m⁻¹)
- r : radio del mástil (m)³
- σ_i : sección transversal del radar biestático (RCS) del mástil en la dirección de la antena receptora (m²)
- ϕ_r : posición angular de la antena en el plano horizontal, medido en la turbina eólica considerada en una dirección contraria a las agujas del reloj a partir de la dirección de la antena transmisora (véase la Fig. 2)
- θ_t : posición angular de la antena transmisora en el plano vertical (véase la Fig. 2)
- λ : longitud de onda (m).

Para distancias en las que el efecto de las turbinas puede ser considerable, normalmente no se cumple la condición de campo lejano relativo a la dispersión de la señal, puesto que habitualmente

$$R_{Tx-WTi} < \frac{2L^2}{\lambda} \quad (5)$$

donde:

- R_{Tx-WTi} : distancia entre la antena transmisora y la i -ésima turbina eólica (m)
- L : longitud del mástil (m)⁴.

En esos casos se pueden incluir los efectos de campo cercano de la dispersión de la señal habida cuenta de una longitud del mástil en campo cercano L_{nf} (m) dada por:

$$L_{nf} = \sqrt{\frac{\lambda R_{Tx-WTi}}{2}} \quad (6)$$

donde:

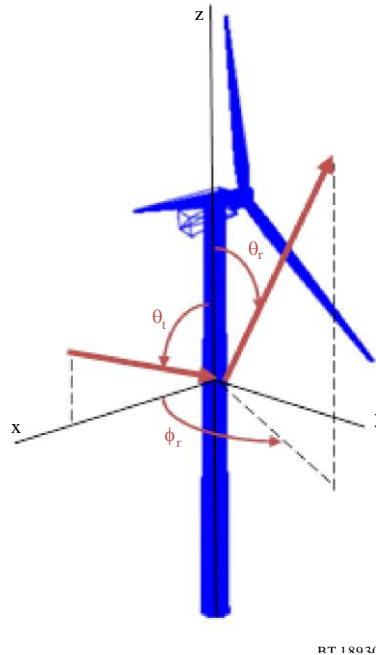
- R_{Tx-WTi} : distancia entre la antena transmisora y la i -ésima turbina eólica (m)
- λ : longitud de onda (m).

La posición relativa de la antena transmisora, la turbina eólica y la antena receptora se calcula (tomando como referencia el punto de altura mitad del mástil) como una función del ángulo de incidencia en el plano vertical (θ_t) así como de los ángulos de recepción en los planos horizontal y vertical (ϕ_r, θ_r). Cabe destacar que el sistema de coordenadas considerado no depende de la posición de las aspas o de su orientación, puesto que está referenciado a la posición horizontal de la antena transmisora ($\phi_t = 0^\circ$), como se muestra en la Fig. 3.

3 Si el mástil es un cono recto truncado de sección circular, el radio del mástil r se calcula como el valor medio del radio del cono y la longitud del mástil L es la longitud de la superficie inclinada del cono truncado.

FIGURA 3

Sistema de coordenadas para el modelo de dispersión



BT 1893-1

Cabe señalar que el modelo de propagación es válido para retrodispersión en la gama angular siguiente:

$-120^\circ < \phi_r < 120^\circ$, define la gama angular biestática en el plano horizontal que limita la zona de retrodispersión (es decir, la dispersión hacia delante se produce $\pm 60^\circ$ por detrás de la turbina eólica);

$70^\circ < \theta_t < 110^\circ$ y $160^\circ - \theta_t < \theta_r < 200^\circ - \theta_t$, impone un límite vertical a la teoría de la óptica física, en la que la precisión de las estimaciones de RCS es cada vez peor cuanto más se separe la dirección de observación de la dirección especular.

Hay que destacar que el modelo de dispersión es válido cuando al menos una parte importante del mástil está iluminada por la señal transmitida. Por lo tanto, debe analizarse el diagrama de radiación de la antena y, en el caso en que se cumpla esa condición, se recomienda tomar para el parámetro G_{Tx-WTi} la ganancia máxima de la sección del diagrama de la antena que incide en el mástil.

En lo que respecta a la ganancia de recepción, se debe tener en cuenta que la antena normalmente estará orientada hacia el transmisor y por tanto, en términos generales, G_{Rx-WTi} será inferior a la ganancia de la antena receptora a menos que las turbinas eólicas estén situadas en el trayecto entre las antenas de transmisión y de recepción de televisión. En la Recomendación UIT-R BT.419 figuran las características de directividad y polarización de las antenas para la recepción de radiodifusión de televisión.

La amplitud media de cada trayecto viene dada por la relación entre ambas potencias expresada en dB que figura en la ecuación (7):

$$P_i = 10 \log \left(\frac{P_{Tx-WTi-Rx}}{P_{Tx-Rx}} \right) \quad (7)$$

Se omitirán los trayectos con relaciones de potencia inferiores a -45 dB.

Espectros Doppler

Para la caracterización de los espectros Doppler se facilitan tres casos representativos de densidades espectrales de potencia (PSD) empíricas con el fin de caracterizar las posibles situaciones de variabilidad temporal alta, media y baja, que corresponden a diferentes velocidades de rotación y a diferentes orientaciones del rotor.

Estos espectros Doppler se adaptan a cada ubicación de recepción mediante la frecuencia Doppler biestática máxima $f_{B_máx}$ (Hz), que depende de la posición relativa de la antena transmisora, la turbina eólica y la antena receptora ϕ_r , la frecuencia máxima de rotación de la turbina eólica $\omega_{máx}$ (rad/s) y la longitud de las aspas l , de acuerdo con la ecuación (8).

$$f_{B_max} = \frac{2\omega_{max}l}{\lambda} \cos(\phi_r / 2) \tag{8}$$

En el caso de turbinas eólicas, $f_{B_máx}$ corresponde a $\phi_r = 0^\circ$ y las aspas giran en el plano *antena transmisora-WT-antena receptora*.

Para tomar en consideración las diferentes condiciones de viento que probablemente se produzcan en determinadas ubicaciones de recepción, se recomienda que para el sistema sometido a estudio se analicen todas las densidades espectrales de potencia (PSD) facilitadas en el Cuadro 3. De esta forma, el usuario del modelo de canal puede disponer de una visión general de las diferentes situaciones que se pueden producir sin necesidad de estimaciones precisas concretas de las direcciones y velocidades del viento. Si se desea una estimación del caso más desfavorable, se debe utilizar en los cálculos la «variabilidad alta».

CUADRO 3

PSD Doppler para el modelo de canal (expresado en dB/Hz), en función de la frecuencia Doppler (f), donde $\delta(f)$ es la función delta de Dirac

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	
$S_{medium}(f) = \begin{cases} 22.0 \exp(6.1 \cdot f / f_{B_max}) - 30.4 & -0.7 \cdot f_{B_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 25.1 \exp(-8.7 \cdot f / f_{B_max}) - 29.5 & 0 < f \leq 0.6 \cdot f_{B_max} \end{cases}$	
Variabilidad baja	
$S_{low}(f) = \begin{cases} 22.9 \exp(17.9 \cdot f / f_{B_max}) - 24.9 & -0.3 \cdot f_{B_max} \leq f < 0 \\ \delta(f) & f = 0 \\ 23.2 \exp(-17.6 \cdot f / f_{B_max}) - 25.0 & 0 < f \leq 0.3 \cdot f_{B_max} \end{cases}$	

No es probable que sea necesario ampliar la zona de estudio a más de unos 15 km desde el emplazamiento de la turbina eólica (o desde los emplazamientos, si hubiese múltiples turbinas eólicas). Sin embargo, en circunstancias especiales, por ejemplo con antenas receptoras apantalladas con respecto al transmisor deseado pero con visibilidad directa de la turbina eólica, puede que sea preciso ampliar dicha zona.

Una vez que se haya particularizado el modelo de canal a las condiciones especiales del caso sometido a estudio, la forma más completa de estimar el impacto sobre un determinado servicio consiste en realizar algunas simulaciones sobre el efecto del modelo de canal variable en el tiempo resultante en el correspondiente umbral de recepción. Esto implica ejecutar el modelo de canal, es decir, obtener las sucesivas respuestas impulsivas del canal que caracterizan la señal de propagación en presencia del parque de eólico. Se pueden obtener los complejos trayectos variables en el tiempo que se corresponden con la dispersión de la señal en cada turbina eólica, generando un conjunto de procesos de ruido blanco Gaussiano, cuyas densidades espectrales se conformen mediante un filtro de conformación cuya función de transferencia de amplitud sea $H(f) = \sqrt{S(f)}$, donde $S(f)$ es el espectro de potencia Doppler.

El filtro resultante tiene que tener una potencia normalizada a 1, de forma que hay que escalar adecuadamente las ganancias de los trayectos individuales para calcular la amplitud media.

Anexo 3

Estimación de la repercusión sobre la recepción de DVB-T

La posible repercusión de un parque eólico sobre la calidad de la recepción de DVB-T se puede expresar mediante las relaciones portadora ruido (C/N) umbral necesarias para una situación casi sin errores en función de las características de propagación del canal.

En la mayoría de las situaciones en las que se analizó la repercusión de un parque eólico sobre la calidad de recepción del sistema DVB-T las relaciones C/N umbral obtenidas fueron similares a las esperadas en entornos donde no existen estos parques eólicos.

Más concretamente, en la región de dispersión hacia adelante de las turbinas eólicas, en la que están alineadas la antena transmisora, una o más turbinas y la antena receptora ($\pm 60^\circ$ por detrás de la turbina eólica), la calidad de recepción de la DVB-T puede no estar afectada aunque se precisan nuevos estudios o análisis para confirmar este extremo, en particular en las proximidades de 0° .

En el caso de la región de retrodispersión, las condiciones de propagación se pueden caracterizar mediante un modelo de canal de trayectos múltiples como se describe el Anexo 2. En estos casos es más probable un aumento en la relación C/N umbral cuando las turbinas eólicas están situadas cerca de la antena receptora o en las proximidades de la antena transmisora de televisión (menos de 2 km). En las situaciones en que las señales dispersadas por las turbinas eólicas son importantes en amplitud y variabilidad, la relación C/N umbral necesaria para la condición QEF es mayor. La relación C/N umbral tiende a aumentar con la amplitud y con la variabilidad temporal de los múltiples trayectos debidos a las turbinas eólicas.

Se definen dos parámetros para caracterizar el canal de trayectos múltiples en la región de retrodispersión y relacionar posteriormente estas características con la degradación potencial del servicio de televisión: la *energía propagada por trayectos múltiples* y la *desviación típica media*. Se pueden calcular estos parámetros a partir de datos estimados de acuerdo con el modelo de canal descrito en el Anexo 2 y, más concretamente, obteniendo las ganancias complejas de cada trayecto como se ha descrito anteriormente; o mediante el uso de señales de dispersión empíricas (véase el Informe UIT-R BT.2142 para una información más completa).

La energía de los trayectos múltiples del canal, P_{mult} (adimensional) está definida por la suma de la potencia media normalizada recibida desde cada turbina eólica. El valor medio de cada trayecto se calcula como un valor central representativo (valor medio) del trayecto, puesto que las señales de dispersión varían al girar las aspas. Por lo tanto, la energía de los trayectos múltiples de la respuesta impulsiva viene dada por la ecuación (9).

$$P_{mult} = \sum_{i=1}^N \text{mean}(P(\tau_i, t)) \quad (9)$$

donde:

- $i = 1$ e $i = N$: índices del primer trayecto y del último trayecto por encima de un nivel umbral relativo de -45 dB con respecto al trayecto principal
- $P(\tau_i, t)$: potencia variable con el tiempo recibida desde el trayecto i normalizada con respecto al trayecto principal.

La desviación típica media, std_{mean} , (adimensional) se calcula como el valor medio de las desviaciones típicas de las señales variables con el tiempo dispersadas por cada turbina eólica en una determinada medición o simulación. Por tanto, proporciona una medición de la variabilidad temporal del canal. La desviación típica media se determina mediante la ecuación (10).

$$std_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^N std_i}{N} \quad (10)$$

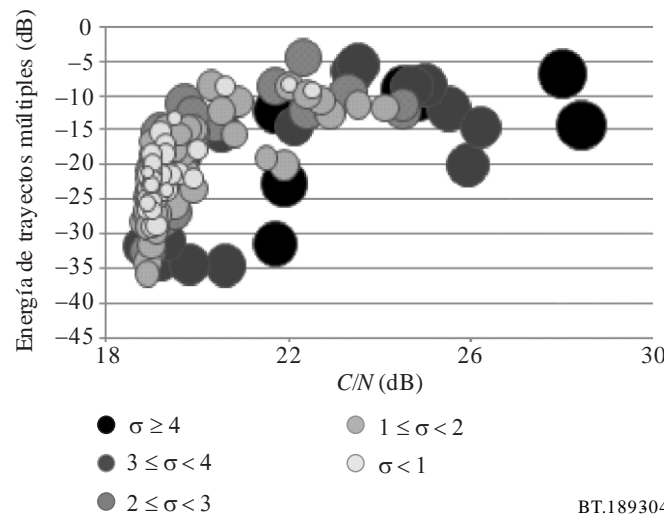
donde:

- $i = 1$ e $i = N$: índices del primer trayecto y del último por encima de un nivel umbral relativo de -45 dB con respecto al trayecto principal
- std_i : desviación típica de la potencia variable con el tiempo normalizada recibida por el trayecto I (dB).

La Fig. 4 presenta algunas relaciones C/N umbral con respecto a la energía de los trayectos múltiples (expresadas en dB), obtenidas a partir de mediciones en la zona de influencia de un parque eólico. Estas observaciones se realizaron con la configuración siguiente de DVB-T: 8k, modulación MAQ-64 y velocidad de código 2/3 FEC.

El tamaño de las zonas se determina mediante los valores de la desviación típica media. Para facilitar su representación las zonas también se dibujan con tonos entre gris claro y negro en función de la desviación típica media.

FIGURA 4
Región de retrodispersión. Relaciones C/N requeridas en función de las características del canal de trayectos múltiples



Un resultado significativo es que todas las mediciones con niveles de energía propagada por trayectos múltiples superiores a -15 dB contemplan C/N umbrales mayores que $19,3$ dB (el umbral teórico para un canal de Rice), incluso cuando las aspas están inmóviles y que, por tanto, la desviación típica media es baja. En términos generales, las mediciones con niveles de energía por trayectos múltiples inferiores a -15 dB presentan relaciones C/N umbral para valores de desviación típica media más elevados. El Cuadro 4 resume los incrementos máximos en las relaciones C/N umbral con respecto a la C/N umbral de Rice en función de la energía por trayectos múltiples.

CUADRO 4

Incremento máximo de las C/N umbral sobre la C/N umbral de Rice

Energía por trayectos múltiples $P_{múlt}$ (dB)	Incremento máximo en (dB) de la C/N requerida para un canal de Rice
$P_{múlt} \geq -15$	9,1
$-15 > P_{múlt} \geq -25$	6,6
$-25 > P_{múlt} \geq -35$	2,4
$P_{múlt} < -35$	0

En conclusión, los trayectos múltiples variables con el tiempo que generan las turbinas eólicas pueden provocar problemas de recepción en sistemas DVB-T en las situaciones antes mencionadas, especialmente en el caso de recepción sin visibilidad directa del transmisor pero con visibilidad directa del parque eólico. Estos resultados se pueden utilizar como directrices con el fin de estimar la potencial degradación producida por un parque eólico en un servicio DVB-T.

Cabe destacar que la energía propagada por trayectos múltiples y la desviación típica media describen el canal de trayectos múltiples en presencia de un parque eólico independientemente de la norma de televisión. Por tanto, estos parámetros se pueden utilizar para relacionar las características del canal de propagación con el efecto sobre cualquier servicio de televisión digital en la banda de ondas decimétricas si se realizara un estudio similar al llevado a cabo para el servicio DVB-T.

El Informe UIT-R BT.2142-2 (Adjunto 4) incluye amplias explicaciones sobre este asunto.