

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1336-2*

Diagramas de radiación de referencia de antenas omnidireccionales, sectoriales y otros tipos de antenas de sistemas de punto a multipunto para su utilización en estudios de compartición en la gama de frecuencias de 1 GHz a aproximadamente 70 GHz

(Cuestión UIT-R 202/9)

(1997-2000-2007)

Cometido

Esta Recomendación describe modelos de referencia de diagramas de radiación expresados en valores medios y de cresta de antenas omnidireccionales, sectoriales y otros tipos de antenas de sistemas de punto a multipunto (P-MP) para su utilización en estudios de compartición en la gama de frecuencias de 1 GHz a aproximadamente 70 GHz.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que, para los estudios de coordinación y para la evaluación de la interferencia mutua entre sistemas inalámbricos fijos (FWS) punto a multipunto (P-MP) y entre estaciones de tales sistemas y estaciones de los servicios de radiocomunicación espacial que comparten la misma banda de frecuencias, puede ser necesario utilizar diagramas de radiación de referencia para antenas de FWS;
- b) que en función del caso de compartición, en los estudios de compartición puede resultar conveniente considerar los diagramas de lóbulo lateral expresado en valores de cresta o medios;
- c) que en los siguientes casos puede resultar conveniente utilizar diagramas de radiación de la antena que representen valores medios del lóbulo lateral:
 - para predecir la interferencia combinada causada por varias estaciones inalámbricas del servicio fijo a un satélite geoestacionario o no geoestacionario;
 - para predecir la interferencia combinada causada por varios satélites geoestacionarios a una estación inalámbrica fija;
 - para predecir la interferencia causada por uno o varios satélites no geoestacionarios desde ángulos que varían continuamente a una estación inalámbrica fija;
 - en otros casos cuando resulte adecuado utilizar el diagrama de radiación que represente los niveles medios del lóbulo lateral;
- d) que pueden ser necesarios los diagramas de radiación de referencia cuando no se dispone de información sobre el diagrama de radiación real de la antena;

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 4 de Radiocomunicaciones (Grupo de Trabajo 4 (GT 4A), 6 (GT 6S), 7 (GT 7B) y 8 (GT 8D)), y del GT 4-9S.

e) que, para ángulos grandes, debe considerarse la posibilidad de reflexiones locales en la superficie;

f) que las antenas con los mejores diagramas de radiación disponibles permitirán utilizar con máxima eficacia el espectro de radiofrecuencias,

observando

a) que las Recomendaciones UIT-R F.699 y UIT-R F.1245 describen los diagramas de radiación de antena de referencia en valores de cresta y medios, respectivamente, que han de utilizarse en los estudios de coordinación y la evaluación de la interferencia para los casos no contemplados en los *recomienda* 1 a 4 que figuran a continuación:

recomienda

1 que, en ausencia de información particular sobre el diagrama de radiación de la antena del FWS P-MP correspondiente (véase la Nota 1), se utilice el diagrama de radiación de referencia indicado a continuación para:

1.1 evaluar la interferencia entre distintos FWS P-MP con visibilidad directa;

1.2 realizar estudios de coordinación y evaluación de la interferencia entre estaciones de FWS P-MP con visibilidad directa y estaciones de los servicios que comparten la misma banda de frecuencias;

2 que en la gama de frecuencias entre 1 GHz y unos 70 GHz, se adopte el siguiente diagrama de radiación de referencia para estaciones que utilicen antenas omnidireccionales (en acimut):

2.1 en el caso de diagramas del lóbulo lateral expresado en valores de cresta a los que se refiere el *considerando* b), se deben utilizar las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre 0° y 90° (véase el Anexo 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) & \text{para } \theta_4 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] & \text{para } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

siendo:

$$\theta_3 = 107,6 \times 10^{-0,1 G_0} \quad (1b)$$

$$\theta_4 = \theta_3 \sqrt{1 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)} \quad (1c)$$

donde:

$G(\theta)$: ganancia relativa con respecto a una antena isótropa (dBi)

G_0 : máxima ganancia en el plano horizontal o próximo a él (dBi)

θ : valor absoluto del ángulo de elevación en relación con el ángulo de ganancia máxima (grados)

θ_3 : anchura de haz de 3 dB en el plano vertical (grados)

k : parámetro que representa el aumento de los niveles de los lóbulos laterales por encima de lo que podría esperarse de una antena ideal con una mejor calidad de lóbulos laterales (véanse los *recomienda* 2.3 y 2.4).

2.2 en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresado en valores medios a los que se refiere el *considerando* c), se deben utilizar las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre 0° y 90° (véanse los Anexos 1 y 5):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 15 + 10 \log(k+1) & \text{para } \theta_3 \leq \theta < \theta_5 \\ G_0 - 15 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1.5} + k \right] & \text{para } \theta_5 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1d)$$

siendo:

$$\theta_5 = \theta_3 \sqrt{1,25 - \frac{1}{1,2} \log(k+1)}$$

donde θ , θ_3 , G_0 y k son los definidos en el *recomienda* 2.1;

2.3 en los casos en que se trate de antenas típicas que funcionan en la gama 1-3 GHz, el parámetro k sería 0,7;

2.4 en los casos en que se trate de antenas con una mejor calidad de lóbulos laterales en la gama 1-3 GHz y de todas las antenas que funcionan en la gama 3-70 GHz, el parámetro k debería ser 0;

3 que, en la gama de frecuencias comprendida entre 1 GHz y 70 GHz, aproximadamente, se adopten los siguientes diagramas de radiación de referencia para estaciones que utilicen antenas sectoriales con una anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal inferior a unos 120° (véanse el Anexo 4 y la Nota 4);

3.1 en el caso de diagramas del lóbulo lateral expresado en valores de cresta a los que se refiere el *considerando* b), se utilicen las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre 0° y 90° y para ángulos acimutales entre -180° y 180° (véase la Nota 2):

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (2a1)$$

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\text{tg } \theta}{\text{sen } \varphi} \right) \quad (2a2)$$

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\varphi_3} \right)^2 + \left(\frac{\text{sen } \alpha}{\theta_3} \right)^2}} \quad (2a3)$$

$$= \varphi_3 \cdot \theta_3 \sqrt{\frac{(\text{sen } \theta)^2 + (\text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\varphi_3 \cdot \text{sen } \theta)^2 + (\theta_3 \cdot \text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad \text{grados}$$

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad \text{grados} \quad (2a4)$$

$$x = \psi / \psi_{\alpha} \quad (2a5)$$

siendo:

- φ : ángulo acimutal con respecto al ángulo de máxima ganancia (grados);
 φ_3 : anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal (grados) (por lo general, igual a la anchura de haz sectorial).

Los demás parámetros y variables son los definidos en el *recomienda* 2.1;

3.1.1 en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 6 GHz (véase el Anexo 6)

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para } 0 \leq x < x_k \quad (2b)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) \quad \text{para } x_k \leq x < 4$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) \quad \text{para } x \geq 4$$

siendo $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ y $x_k = \sqrt{1 - 0,36k}$;

3.1.1.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k debe ser 0,7 (por lo que, $\lambda_{k=0,7} = 3,8$ y $x_{k=0,7} = 0,86$);

3.1.1.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k debe ser 0 (y por lo tanto, $\lambda_{k=0} = 12$ y $x_{k=0} = 1$);

3.1.2 en la gama de frecuencias de 6 GHz a 70 GHz, aproximadamente:

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para } 0 \leq x < 1 \quad (2c)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12 - 15 \log(x) \quad \text{para } 1 \leq x$$

3.2 en el caso de diagramas de lóbulo lateral expresado en valores medios a los que se refiere el *considerando* c), para utilizarlos en la evaluación estadística de la interferencia, deben emplearse las siguientes ecuaciones para ángulos de elevación entre 0° y 90° y ángulos acimutales entre -180° y 180° (véanse el Anexo 5 y la Nota 2):

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x)$$

3.2.1 en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 6 GHz (véase el Anexo 6),

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para } 0 \leq x < x_k \quad (2d)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 15 + 10 \log(x^{-1,5} + k) \quad \text{para } x_k \leq x < 4$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - \lambda_k - 3 - 15 \log(x) \quad \text{para } x \geq 4$$

siendo $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ y $x_k = \sqrt{1,25 - 0,36k}$;

3.2.1.1 en el caso de antenas típicas, el parámetro k debe ser 0,2 (por lo que, $\lambda_{k=0,2} = 7,85$ y $x_{k=0,2} = 1,08$);

3.2.1.2 en el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada, el parámetro k debe ser 0 (por tanto, $\lambda_{k=0} = 12$ y $x_{k=0} = 1,118$);

3.2.2 en la gama de frecuencias entre 6 GHz y 70 GHz, aproximadamente:

$$G_{ref}(x) = G_0 - 12x^2 \quad \text{para } 0 \leq x < 1,152 \quad (2e)$$

$$G_{ref}(x) = G_0 - 15 - 15 \log(x) \quad \text{para } 1,152 \leq x$$

3.3 que, cuando se trate de antenas sectoriales con una anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal inferior a unos 120°, la relación entre la ganancia máxima y la anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal y el plano de elevación sea, provisionalmente (véanse el Anexo 3 y la Nota 4):

$$\theta_3 = \frac{31000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_3} \quad (3)$$

donde todos los parámetros se definen en el *recomienda* 3.1;

4 que, en la gama de frecuencias de 1 GHz a unos 3 GHz, se adopten los siguientes diagramas de radiación de referencia para los casos de estaciones que utilicen antenas de baja ganancia con simetría circular alrededor de la anchura de haz a 3 dB y con una ganancia del lóbulo principal de la antena inferior a 20 dBi, aproximadamente:

4.1 que, en el caso de los diagramas de lóbulo lateral expresado en valores de cresta, a los que se refiere el *considerando* b), se utilicen las siguientes ecuaciones (véanse el Anexo 2 y la Nota 3):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3 \\ G_0 - 14 & \text{para } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{para } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 \\ -8 & \text{para } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (4)$$

donde:

$G(\theta)$: ganancia relativa con respecto a una antena isótropa (dBi)

G_0 : ganancia del lóbulo principal de la antena (dBi)

θ : ángulo fuera del eje (grados)

φ_3 : anchura de haz a 3 dB de baja ganancia (grados)

$$= \sqrt{27000 \times 10^{-0,1 G_0}} \text{ (grados)}$$

$$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3 \text{ (grados)}$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0 - 6)/32} \text{ (grados);}$$

4.2 en el caso de diagramas de lóbulo lateral expresado en valores medios a los que se refiere el *considerando* c), debe utilizarse el diagrama de antena que figura en la Recomendación UIT-R F.1245;

5 que las siguientes Notas se consideren parte de esta Recomendación:

NOTA 1 – Es esencial hacer todo lo posible por utilizar el diagrama real de antena en los estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia.

NOTA 2 – Al calcular la ganancia para todos los ángulos de elevación, θ' de 0 a 180°, en el plano vertical, debe determinarse el valor x para ángulos de elevación superiores a 90° utilizando para ello

el valor complementario del ángulo de elevación ($180^\circ - \theta'$) en el valor complementario del acimut, esto es, $180 \pm \varphi$.

NOTA 3 – Los diferentes valores del parámetro k en los *recomienda* 3.1.1.1 y 3.2.1.1 se calculan teniendo presente los niveles del lóbulo lateral expresados en valor de cresta y medio para varios diagramas de antena característicos en la gama de frecuencias de 1 a 6 GHz.

NOTA 4 – En el caso de una antena cuya anchura del haz principal sea diferente de la calculada mediante la ecuación (3), se recomienda utilizar como parámetro θ_3 .

NOTA 5 – Como se analiza en el Anexo 3, el factor exponencial se ha reemplazado por la unidad. Por esta razón, el error teórico que entraña a esta aproximación será inferior al 6% para anchuras de haz a 3 dB en el plano de elevación inferiores a 45° .

NOTA 6 – El diagrama de radiación de referencia que figura en el *recomienda* 4.1 se aplica primordialmente a las situaciones en que la ganancia del lóbulo principal de la antena es inferior o igual a 20 dBi, y los resultados que se obtienen aplicando la Recomendación UIT-R F.699 son inadecuados. Se requieren estudios ulteriores para establecer plenamente la gama de frecuencias y ganancias para la cual las ecuaciones son válidas.

NOTA 7 – Los resultados obtenidos al tomar medidas de una antena sectorial diseñada especialmente para su utilización a 20 GHz, aproximadamente, demuestran la posibilidad de ajustarse a un diagrama de radiación de lóbulo lateral de referencia más restrictivo. Habrá que realizar nuevos estudios para crear dicho diagrama optimizado.

Anexo 1

Diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales que se utilizan en los sistemas de radioenlace P-MP

1 Introducción

Las antenas omnidireccionales se utilizan con frecuencia para transmitir y recibir señales en las estaciones centrales de los sistemas de radioenlace P-MP. En los estudios en que se prevé la compartición de este tipo de sistemas de radioenlaces y los sistemas de servicios espaciales en las bandas de 2 GHz se ha aplicado el diagrama de radiación de referencia que se describe a continuación.

2 Análisis

El diagrama de radiación de referencia se basa en las siguientes hipótesis sobre las antenas omnidireccionales:

- que la antena es un conjunto lineal de n elementos con radiación en modo transversal;
- que los elementos del conjunto son dipolos;
- que los elementos del conjunto tienen un espaciamiento de $3\lambda/4$.

La anchura de haz de 3 dB y θ_3 del conjunto en el plano de elevación se relaciona con la directividad D , en virtud de (para la definición de D véase el Anexo 3):

$$D = 10 \log \left[191,0 \sqrt{0,818 + 1/\theta_3} - 172,4 \right] \quad \text{dBi} \quad (5a)$$

La ecuación (5a) puede resolverse para θ_3 cuando se conoce la directividad:

$$\theta_3 = \frac{1}{\alpha^2 - 0,818} \quad (5b)$$

$$\alpha = \frac{10^{0,1D} + 172,4}{191,0} \quad (5c)$$

La relación entre la anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación y la directividad se extrajo a partir de la hipótesis de que se obtenía una aproximación suficiente del diagrama de radiación en el plano de elevación mediante:

$$f(\theta) = \cos^m(\theta)$$

siendo m un parámetro arbitrario utilizado para poner en relación la anchura de haz de 3 dB y el diagrama de radiación en el plano de elevación. Utilizando esta aproximación, se obtuvo la directividad integrando el diagrama sobre los planos de elevación y de acimut.

La intensidad del campo lejano de un conjunto lineal de antenas está dada por:

$$E_T(\theta) = E_e(\theta) \cdot AF(\theta) \quad (6)$$

donde:

$E_T(\theta)$: campo E en un ángulo de normal θ al eje del conjunto de antenas

$E_e(\theta)$: campo E en un ángulo de normal θ al eje de la antena causado por un elemento único del conjunto

$AF(\theta)$: factor del conjunto de antenas en un ángulo de normal θ al eje de dicho conjunto.

El campo E normalizado de un elemento de dipolo es:

$$E_e(\theta) = \cos(\theta) \quad (7)$$

El factor del conjunto de antenas es:

$$AF_N = \frac{1}{N} \left[\frac{\text{sen} \left(N \frac{\Psi}{2} \right)}{\text{sen} \left(\frac{\Psi}{2} \right)} \right] \quad (8)$$

donde:

N : número de elementos en la red de antenas

$$\frac{\Psi}{2} = \frac{1}{2} \left[2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \right]$$

d : espaciamiento de los radiadores

λ : longitud de onda.

Se ha utilizado el siguiente procedimiento para estimar el número de elementos, N , en el conjunto de antenas. Se parte de la hipótesis de que la ganancia máxima de dicho conjunto es idéntica a la directividad de la red de antenas:

- dada la ganancia máxima de la antena omnidireccional en el plano de elevación, se calcula la anchura de haz de 3 dB θ_3 , utilizando las ecuaciones (5b) y (5c);
- se hace caso omiso de la pequeña reducción de la ganancia fuera de eje causada por el elemento de dipolo, y se toma nota de que el factor del conjunto de antenas AF_N se evalúa en 0,707 (−3 dB) cuando $N \frac{\Psi}{2} = 1,3916$;
- luego se determina N como valor íntegro:

$$N = \left\lfloor \frac{2 \times 1,3916}{2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \left(\frac{\theta_3}{2} \right)} \right\rfloor \quad (9)$$

donde $|x|$ es el valor íntegro máximo que no excede x .

La discriminación fuera de eje normalizada, ΔD , está dada por:

$$\Delta D = 20 \log \left[|AF_N \times \cos(\theta)| \right] \quad \text{dB} \quad (10)$$

Se ha evaluado la ecuación (10) como una función del ángulo fuera del eje (es decir, el ángulo de elevación) para varios valores de ganancia máxima. En el caso de los valores de la gama de 8 dBi a 13 dBi, se ha determinado que puede obtenerse una aproximación adecuada de la envolvente del diagrama de radiación en el plano de elevación mediante las siguientes ecuaciones:

$$G(\theta) = \max [G_1(\theta), G_2(\theta)] \quad (11a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (11b)$$

$$G_2(\theta) = G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\max \left\{ \frac{|\theta|}{\theta_3}, 1 \right\} \right)^{-1,5} + k \right] \quad \text{dBi} \quad (11c)$$

donde k es un parámetro que representa el aumento de los niveles de los lóbulos laterales por encima de lo que podría esperarse en una antena con calidad mejorada de lóbulos laterales.

En las Figs. 1 a 4 se comparan las envolventes de radiación de referencia con los diagramas teóricos de antena generados a partir de la ecuación (11), para ganancias de 8 dBi a 13 dBi, utilizando un factor de $k = 0$. En las Figs. 5 a 8 se comparan las envolventes de radiación de referencia con los diagramas reales de antena, medidos utilizando un factor de $k = 0$. De las Figs. 7 y 8 se desprende que los lóbulos laterales son de aproximadamente 15 dB o más por debajo del nivel del lóbulo principal, permitiendo un pequeño porcentaje de valores de cresta de los lóbulos laterales que podrían superar este valor. Sin embargo, algunos factores prácticos como la utilización de ángulos de inclinación eléctrica, la degradación de diagramas en los extremos de banda y las variaciones de producción aumentarían aún más los lóbulos laterales a aproximadamente 10 dB por debajo del lóbulo principal en las instalaciones reales de campo. El factor k , antes mencionado en la ecuación (11), tiene por objeto caracterizar esta variación en los niveles de los lóbulos laterales. En las Figs. 9 y 10 se ofrece una comparación de una antena de ganancia de 10 dBi y de 13 dBi, a 2,4 GHz, en que la envolvente del diagrama de radiación de referencia utiliza $k = 0,5$. El factor $k = 0,5$ representa los niveles de lóbulos laterales aproximadamente de 15 dB por debajo del valor de cresta del lóbulo principal. No obstante, para reflejar los nuevos aumentos en los niveles de lóbulos laterales encontrados en las instalaciones de campo, se deberá utilizar para las antenas típicas un factor de $k = 0,7$, que representa a los niveles de lóbulos laterales aproximadamente de 13,5 dB por debajo del nivel del lóbulo principal. Por último, en las Figs. 11 y 12 se ilustra el efecto que se produce en los diagramas de elevación por la utilización de diversos valores de k .

FIGURA 1
 Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo,
 en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación
 $G_0 = 10 \text{ dBi}, k = 0$

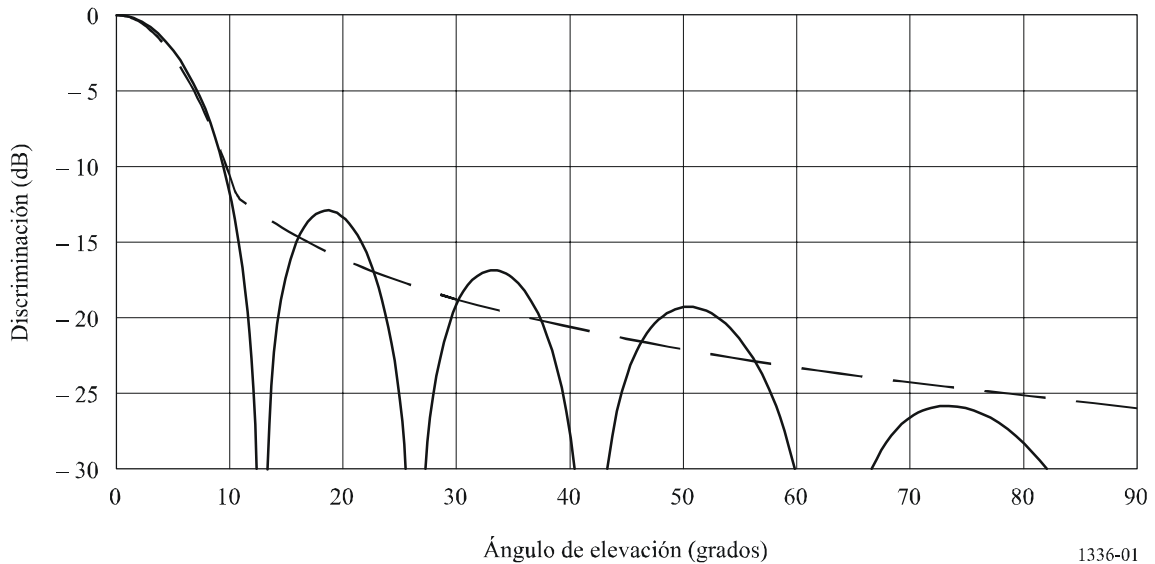
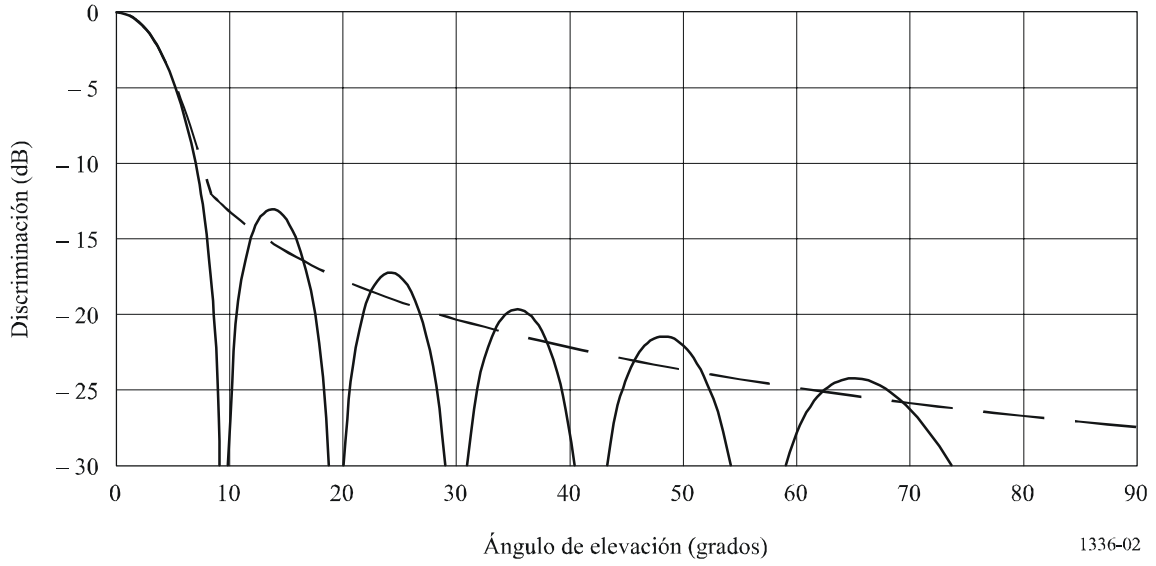


FIGURA 2

Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación

$$G_0 = 11 \text{ dBi}, k = 0$$

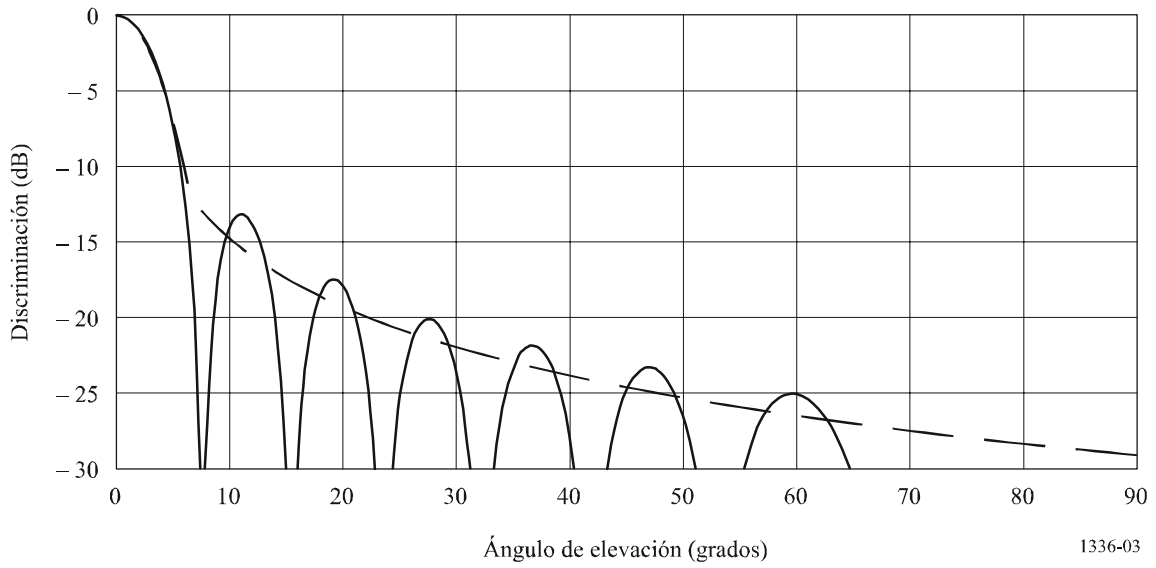


1336-02

FIGURA 3

Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación

$$G_0 = 12 \text{ dBi}, k = 0$$

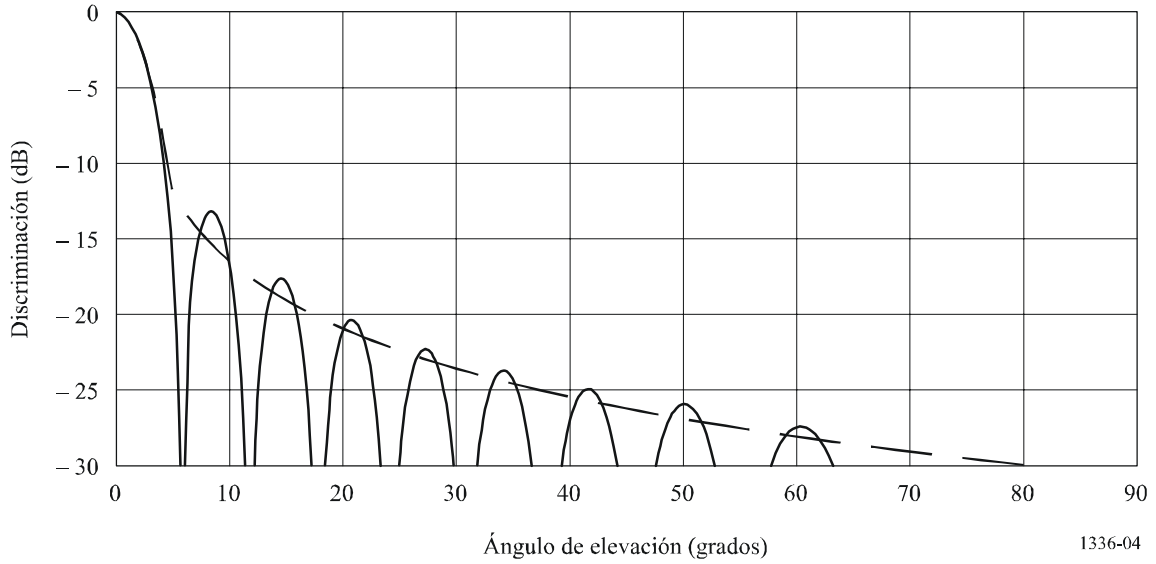


1336-03

FIGURA 4

Diagrama de radiación normalizado de un conjunto de antenas lineal de elementos de dipolo, en relación con la envolvente aproximada del diagrama de radiación

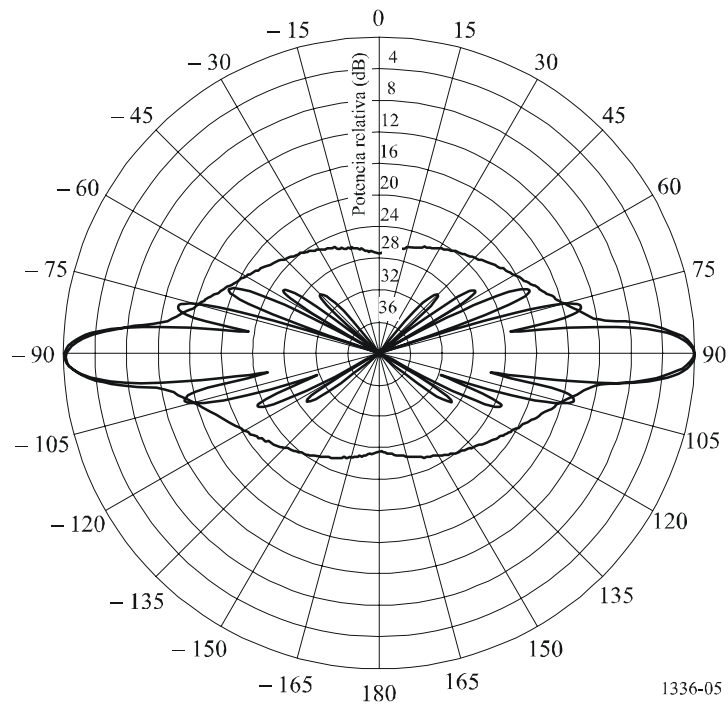
$$G_0 = 13 \text{ dBi}, k = 0$$



1336-04

FIGURA 5

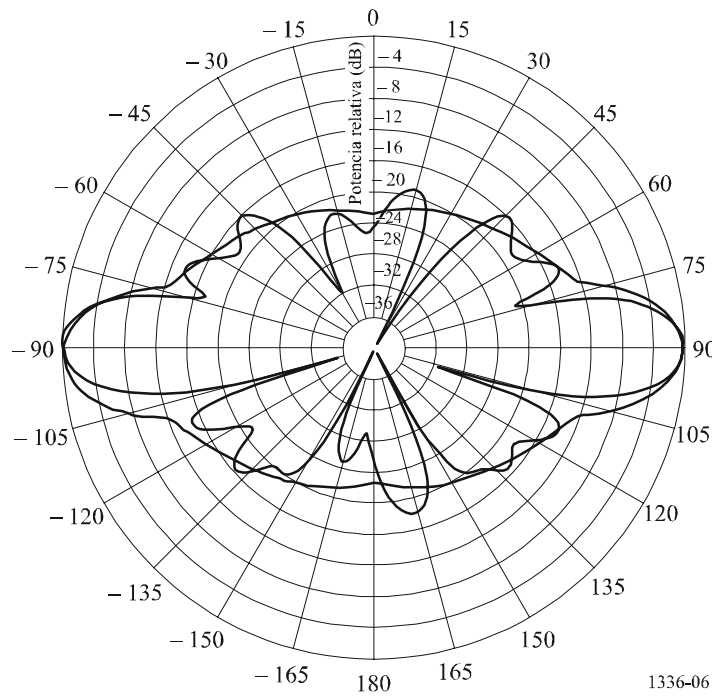
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia para una antena omnidireccional con una ganancia de 11 dBi y que funciona en la banda 928-944 MHz, $k = 0$



1336-05

FIGURA 6

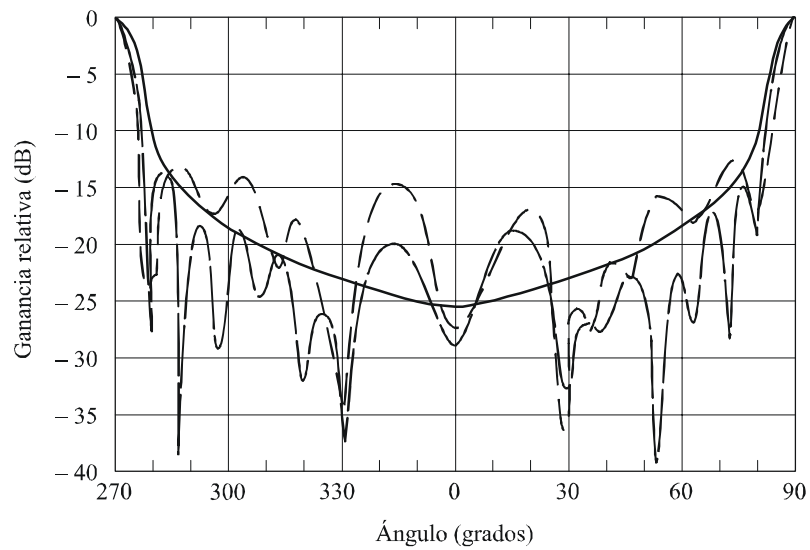
Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia para una antena omnidireccional con una ganancia de 8 dBi y que funciona en la banda 1 850-1 990 MHz, $k = 0$



1336-06

FIGURA 7

Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k = 0$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi y que funciona en la banda 1,4 GHz



- $k = 0$
- Antena A
- . - . - Antena B

1336-07

FIGURA 8

Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k = 0$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi y que funciona en la banda 1,4 GHz

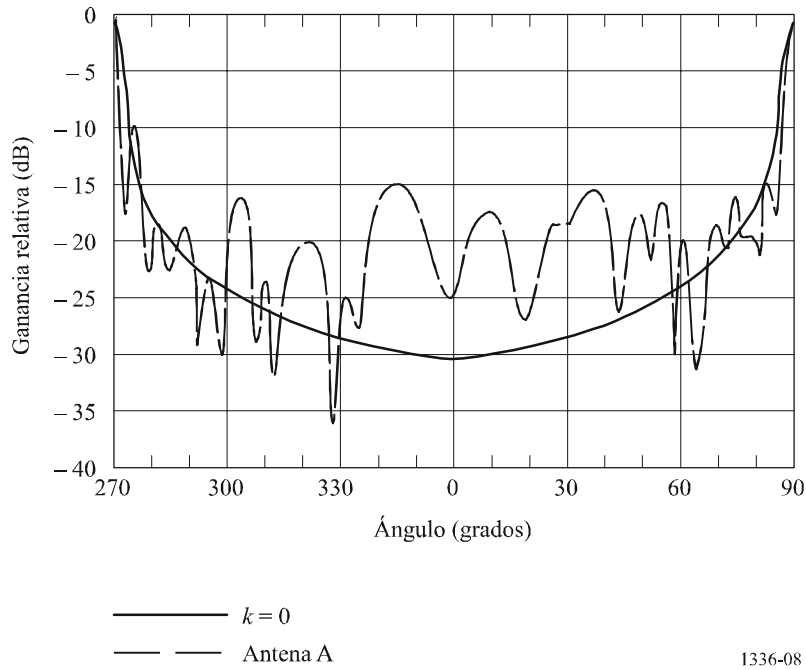


FIGURA 9

Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k = 0,5$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi y que funciona en la banda 2,4 GHz

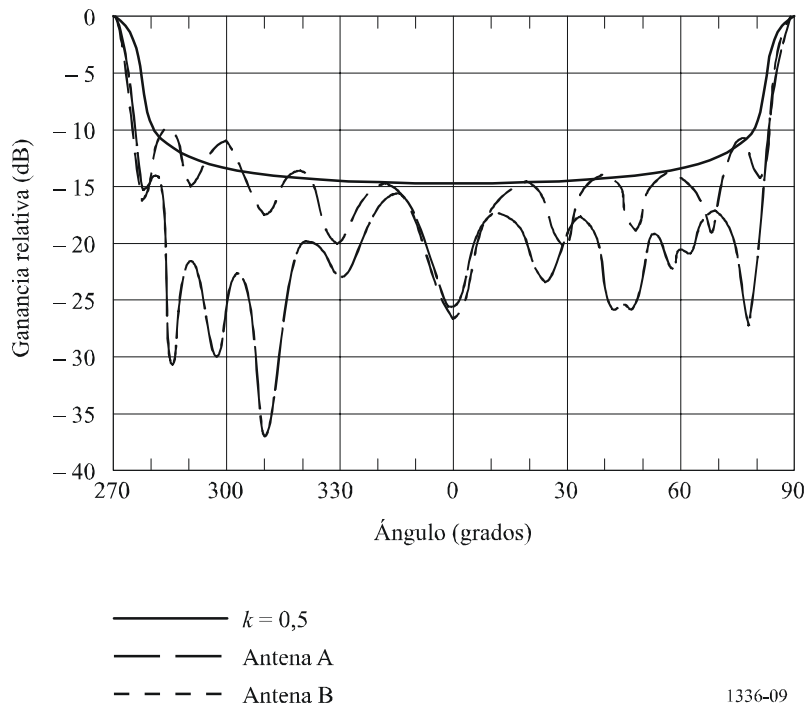


FIGURA 10

Comparación de la envolvente de los diagramas de radiación medido y de referencia con $k = 0,5$, para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi y que funciona en la banda 2,4 GHz

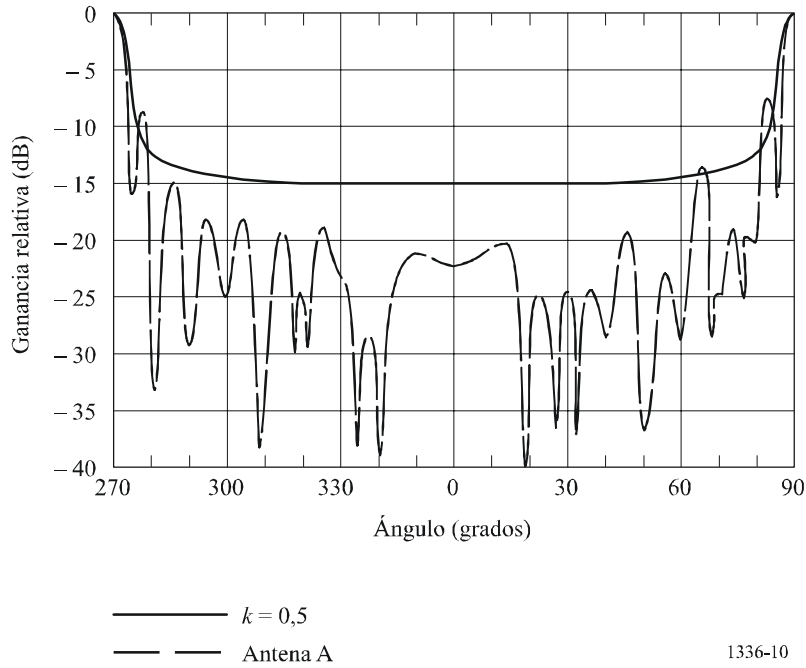


FIGURA 11

Envolventes de los diagramas de radiación de referencia para diversos valores de k para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi

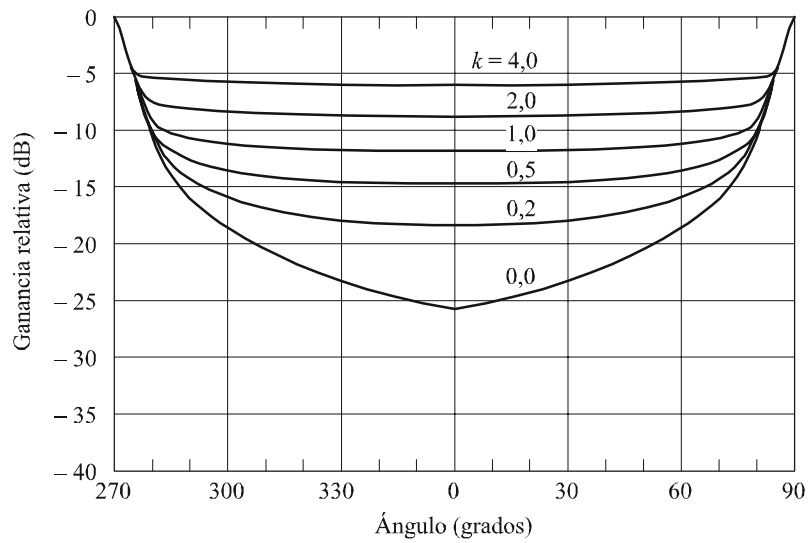
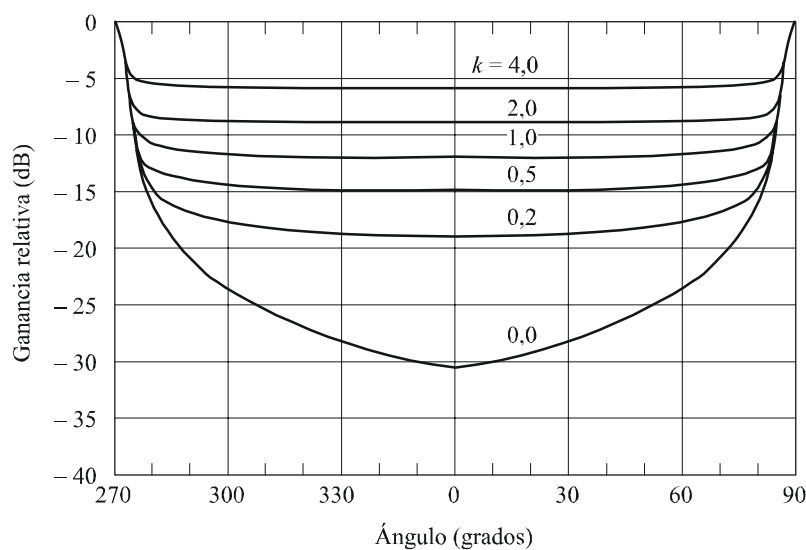


FIGURA 12

Envoltorios de los diagramas de radiación de referencia para diversos valores de k para una antena omnidireccional con una ganancia de 13 dBi



1336-12

3 Resumen, conclusiones y nuevos análisis

Se ha presentado un diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales que muestran una ganancia de entre 8 dBi y 13 dBi. El diagrama de radiación de referencia se ha extraído sobre la base de consideraciones teóricas del diagrama de radiación de un conjunto de antenas colineal de dipolos. Se ha mostrado que el diagrama propuesto representa adecuadamente los diagramas teóricos y los diagramas medidos sobre la gama de 8 dBi a 13 dBi. Se necesita seguir la labor para determinar la gama de ganancia para la cual el diagrama de radiación de referencia es adecuado, especialmente en lo que respecta a las antenas que funcionan en bandas de frecuencia superiores a 3 GHz.

Anexo 2

Diagrama de radiación de referencia para las antenas de abonado con simétrica circular de baja ganancia que se utilizan en los sistemas de red de radioenlaces P-MP en la gama 1-3 GHz

1 Introducción

Las antenas con una ganancia relativamente baja se utilizan con frecuencia para transmitir y recibir señales en las estaciones externas o en sectores de estaciones externas de sistemas de radioenlaces P-MP. Estas antenas pueden mostrar una ganancia del orden de 20 dBi o menos. Se ha determinado que si se utiliza el diagrama de radiación de referencia que figura en la Recomendación UIT-R F.699 para estas antenas con una ganancia relativamente baja, se obtendrá una estimación excesiva de la ganancia para los ángulos fuera de eje relativamente grandes. Por consiguiente, es probable que si se utiliza el diagrama de dicha Recomendación, se sobrestime sustancialmente el volumen de interferencia causado a los demás sistemas y el volumen de interferencia recibido de otros sistemas en ángulos fuera de eje relativamente grandes.

2 Análisis

El diagrama de radiación de referencia para una antena de abonado se basa en las siguientes hipótesis:

- que la directividad de la antena es inferior a aproximadamente 20 dBi;
- que el diagrama de antena presenta una simetría circular alrededor del lóbulo principal;
- que la ganancia del lóbulo principal es igual a la directividad.

El diagrama de radiación de referencia propuesto está dado por:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3 & (12) \\ G_0 - 14 & \text{para } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 & (13) \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{para } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 & (14) \\ -8 & \text{para } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ & (15) \end{cases}$$

donde:

$G(\theta)$: ganancia relativa con respecto a una antena isotrópica (dBi)

G_0 : ganancia máxima fuera del eje (dBi)

θ : ángulo fuera del eje (grados)

φ_3 : anchura de haz de 3 dB (grados)

$$= \sqrt{27000 \times 10^{-0,1 G_0}} \text{ grados}$$

$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3$ grados

$\varphi_2 = \varphi_1 \times 10^{(G_0 - 6)/32}$ grados.

3 Resumen y conclusiones

Se ha presentado un diagrama de radiación de referencia para las antenas de abonado de baja ganancia que muestran una ganancia inferior o igual a 20 dBi. El diagrama de radiación de referencia se ha extraído sobre la base de datos escasos acerca de los diagramas de radiación de las antenas de placas planas cuya utilización se estudia en los sistemas P-MP de acceso local que funcionan en las bandas 2 GHz. Se ha demostrado que el diagrama propuesto representa con mayor precisión el diagrama real que el que figura en la Recomendación UIT-R F.699. Se necesita seguir la labor para determinar la gama de ganancia para la cual el diagrama de radiación de referencia es adecuado, y comparar el diagrama de radiación de referencia con los diagramas medidos.

Anexo 3

Relación entre la ganancia y la anchura de haz para antenas omnidireccionales y sectoriales

1 Introducción

El objetivo del presente Anexo es obtener la relación existente entre la ganancia de las antenas omnidireccionales y sectoriales y su anchura de haz en los planos acimutal y de elevación. El § 2 constituye un análisis de la directividad de las antenas omnidireccionales y sectoriales, partiendo de dos funciones diferentes de intensidad de radiación en el plano acimutal. En ambos casos se supone que la intensidad de radiación en el plano de elevación es una función exponencial. En el § 3 se comparan los resultados obtenidos para la relación entre la ganancia y la anchura de haz al aplicar los métodos del § 2 y los resultados consignados en la versión anterior de esta Recomendación en el caso de antenas omnidireccionales. En el § 4 se resumen los resultados, se propone una ecuación provisional con respecto a la relación entre la ganancia y la anchura de haz para las antenas omnidireccionales y sectoriales y se proponen esferas de trabajo con miras a su ulterior estudio.

2 Análisis

Se parte del supuesto de que el diagrama de campo lejano de la antena sectorial en el plano de elevación se ajusta a una función exponencial y que el diagrama de campo lejano del plano acimutal corresponde a una función rectangular o a una función exponencial. Basándose en dichas hipótesis, puede obtenerse la directividad, D , de la antena sectorial utilizando las siguientes fórmulas (en coordenadas esféricas):

$$D = \frac{U_M}{U_0} \quad (16)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (17)$$

donde:

- U_M : intensidad de radiación máxima
- U_0 : intensidad de radiación de una fuente isotrópica
- φ : ángulo en el plano acimutal
- θ : ángulo en el plano de elevación
- $F(\varphi)$: intensidad de radiación en el plano acimutal
- $F(\theta)$: intensidad de radiación en el plano de elevación.

En los siguientes puntos la directividad de las antenas omnidireccionales y sectoriales se calcula, suponiendo que la intensidad de radiación en el plano acimutal es una función rectangular o una función exponencial.

2.1 Intensidad de radiación sectorial rectangular

Se supone que la función $F(\varphi)$ rectangular de la intensidad de radiación sectorial es la siguiente:

$$F(\varphi) = U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) \quad (18)$$

donde:

φ_s : anchura de haz del sector

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{para } x \geq 0 \\ U(x) &= 0 && \text{para } x < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Tratándose de las funciones rectangular o exponencial de la intensidad de radiación sectorial, se supone que la intensidad de radiación en el plano de elevación viene dada por:

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2} \quad (20)$$

donde:

$$a^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\theta_3} \right)^2 = \frac{2,773}{\theta_3^2} \quad (21)$$

θ_3 : anchura de haz de 3 dB de la antena en el plano de elevación (grados).

Al introducir las ecuaciones (18) y (20) en la ecuación (17) se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \quad (22)$$

Esta integral doble puede resolverse como el producto de dos integrales independientes. La integral con respecto a φ se calcula directamente. No obstante el cálculo de la integral con respecto a θ constituye una operación algo más compleja. La integral con respecto a θ puede calcularse numéricamente y los resultados tabularse o desarrollarse como un polinomio ajustado a los datos. No obstante, hay que señalar que si los límites de integración se modifican de tal modo que pasen a ser $\pm\infty$, la integral con respecto a θ viene dada de forma cerrada por:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2} \quad (23)$$

Ésta es una fórmula bastante simple y flexible que, dependiendo de su exactitud, podría ser muy útil para evaluar la directividad de las antenas sectoriales, así como la de las antenas omnidireccionales.

Se ha evaluado la exactitud con la cual la integral infinita constituye una aproximación a la integral finita. La integral finita, esto es, la integral que figura en la parte izquierda de la ecuación (23), se ha calculado para diferentes valores de la anchura de haz a 3 dB, utilizando el método de cuadratura gaussiana de 24 puntos, y se ha comparado con el valor obtenido utilizando la fórmula correspondiente a la integral infinita de la parte derecha de la ecuación (23). (De hecho, debido a su simetría, la integral finita se ha calculado numéricamente en el intervalo 0 a $\pi/2$ y el correspondiente resultado se ha multiplicado por dos.) En el Cuadro 1 se indican los resultados para una gama de valores ilustrativos de la anchura de haz a 3 dB en el plano de elevación. En el Cuadro puede verse que para una anchura de haz de 3 dB de 45° , la diferencia entre los valores que arroja la integral finita y los que corresponden a la aproximación que representa la integral infinita es inferior al 0,03%. A 25° o menos, el error es básicamente nulo. A continuación, puede calcularse fácilmente la ecuación (22).

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2,773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (24)$$

CUADRO 1

Exactitud relativa de la integral infinita de la ecuación (23) para evaluar la intensidad de radiación media

Anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación (grados)	Integral finita	Integral infinita	Error relativo (%)
45	1,116449558	1,116116449	0,0298
25	0,67747088	0,67747088	0,0000
20	0,549744213	0,549744213	0,0000
15	0,416896869	0,416896869	0,0000
10	0,280137168	0,280137168	0,0000
5	0,140734555	0,140734558	0,0000

A partir de las ecuaciones (18) y (20) se deduce que $U_M = 1$. Introduciendo estos valores y la ecuación (24) en la ecuación (16) se obtiene la directividad de una antena sectorial, con una anchura de haz dada en los planos de elevación y acimutal:

$$D = \frac{11,805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (25)$$

donde los ángulos se expresan en rad. Cuando los ángulos vienen dados en grados, la ecuación (25) se convierte en la siguiente:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (26)$$

Hay que señalar que para una antena omnidireccional, la ecuación (26) se reduce a:

$$D = \frac{107,64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (27a)$$

Se parte del supuesto de que si la eficiencia de radiación es del 100% y las pérdidas de antena son desdeñables, la ganancia y la directividad de la antena omnidireccional son idénticas. Por otra parte, tratándose de antenas omnidireccionales con una anchura de haz de 3 dB inferior a unos 45°, la relación entre la ganancia y la anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación puede simplificarse, dando la unidad como valor al factor exponencial. El error resultante es inferior al 6%.

$$G_0 \approx \frac{107,64}{\theta_3} \quad (27b)$$

2.2 Intensidad de radiación sectorial exponencial

El segundo caso que se ha considerado para la intensidad de radiación sectorial es el representado por una función exponencial. Concretamente:

$$F(\varphi) = e^{-b^2\varphi^2} \quad (28)$$

donde:

$$b^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s}\right)^2 \quad (29)$$

y φ_s es la anchura de banda de 3 dB del sector.

Introduciendo las ecuaciones (20) y (28) en la ecuación (17), modificando los límites de la integración para convertir las integrales finitas en integrales infinitas, integrando e introduciendo a continuación el correspondiente resultado en la ecuación (16) se obtiene la siguiente aproximación:

$$D = \frac{11,09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (30)$$

donde los ángulos son los definidos anteriormente y se expresan en rad. Si ahora se pasa a grados, la ecuación (30) se transforma en:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (31)$$

Si se comparan las ecuaciones (26) y (31), puede verse que la diferencia entre la directividad computada utilizando cualquiera de las ecuaciones es inferior a 0,3 dB.

Los resultados que arroja la ecuación (31) deberían compararse con un número de diagramas medidos para determinar el efecto inherente de la eficiencia de radiación de la antena y otras pérdidas en el coeficiente. Por el momento, se dispone únicamente de dos conjuntos de mediciones para las antenas sectoriales diseñadas con el fin de funcionar en la banda 25,25-29,5 GHz. Los diagramas medidos en los planos acimutal y de elevación se consignan, respectivamente, en las Figs. 13 y 14 para un conjunto de antenas y en las Figs. 15 y 16, respectivamente, para el segundo conjunto. En las Figs. 13 y 14 puede verse que la anchura de haz de 3 dB en el plano acimutal es de 90° y que dicha anchura de 3 dB es de 2,5° en el plano de elevación. Utilizando la ecuación (31), se determina que la directividad es de 22,1 dB. Esto debe compararse con una ganancia medida de 20,5-21,4 dBi para la antena en la gama 25,5-29,5 GHz. Suponiendo que la ganancia G_0 de la antena en la banda en torno a los 28 GHz es inferior en 0,7 dB a su directividad y reemplazando el factor exponencial por la unidad, lo que introduce un error que va en aumento al acrecentarse la anchura del haz, el error llega al 6% a 45°. Una anchura de haz superior hace que el error sea más importante. Basándose en estas consideraciones, la relación semiempírica entre la ganancia y la anchura de haz de una antena sectorial viene dada por:

$$G_0 \approx \frac{31000}{\varphi_s \theta_3} \quad (32a)$$

Asimismo, basándose en las Figs. 15 y 16, la relación semiempírica entre la ganancia y la anchura de haz de dicha antena sectorial es la siguiente:

$$G_0 \approx \frac{34\,000}{\varphi_s \theta_3} \tag{32b}$$

FIGURA 13

Diagrama medido en el plano acimutal de una antena sectorial de 90°. Diagrama medido a lo largo de la banda 27,5-29,5 GHz. Las cruces dibujadas a mano en la parte izquierda de la Figura corresponden a los valores obtenidos de la ecuación (25) (expresados en dB) para una anchura de haz de 3 dB de 90° en el plano acimutal

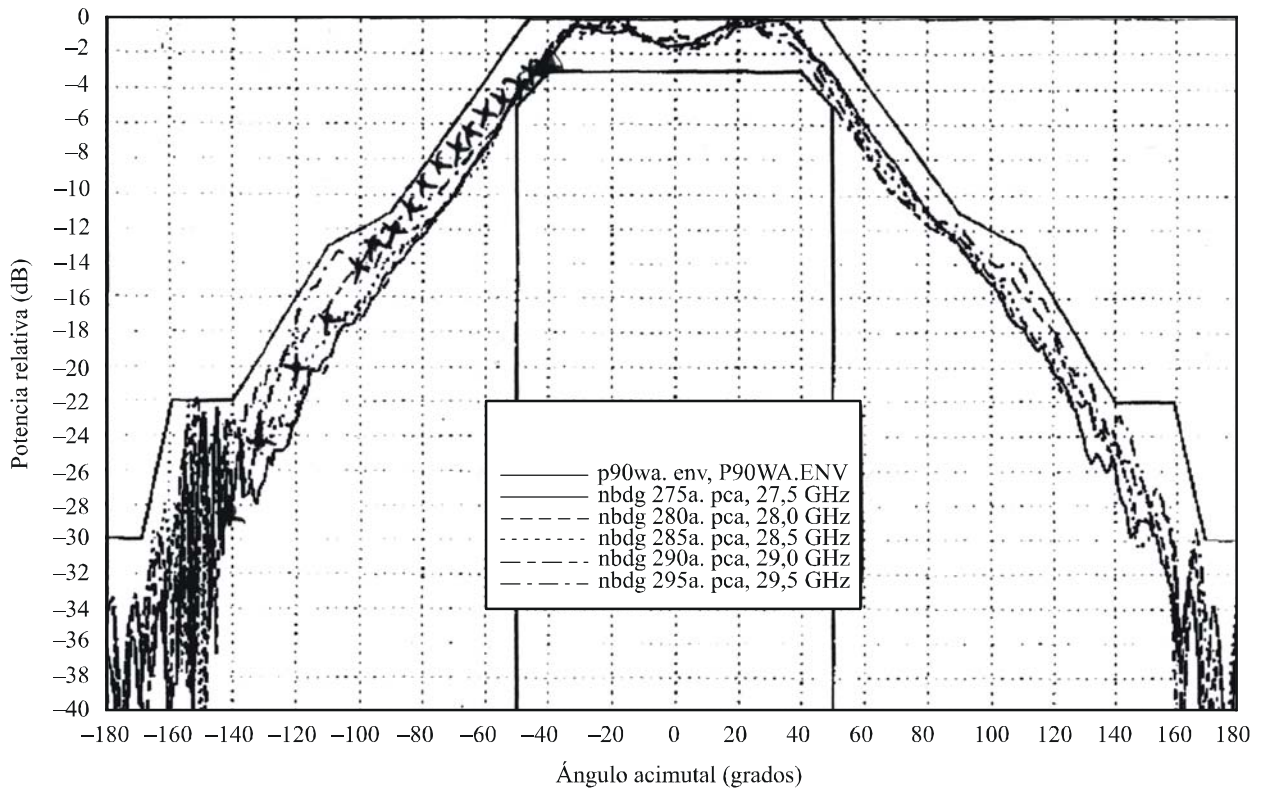
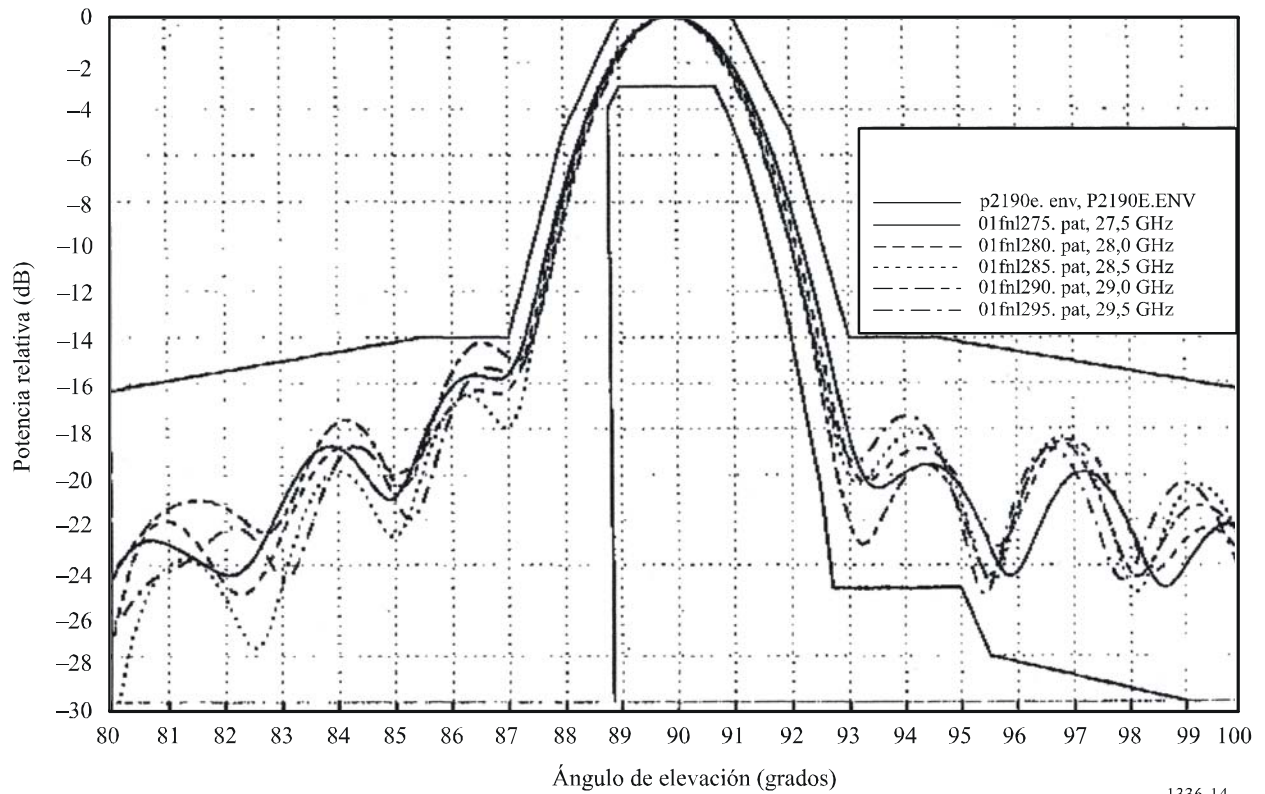


FIGURA 14

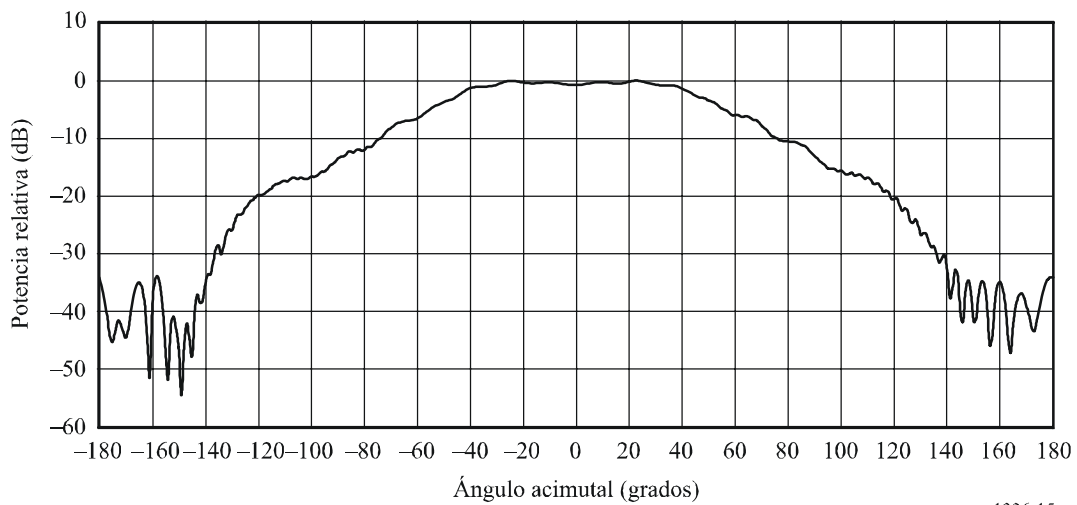
Diagrama medido en el plano de elevación de una antena sectorial de 90°.
 Diagrama medido a lo largo de la banda 27,5-29,5 GHz



1336-14

FIGURA 15

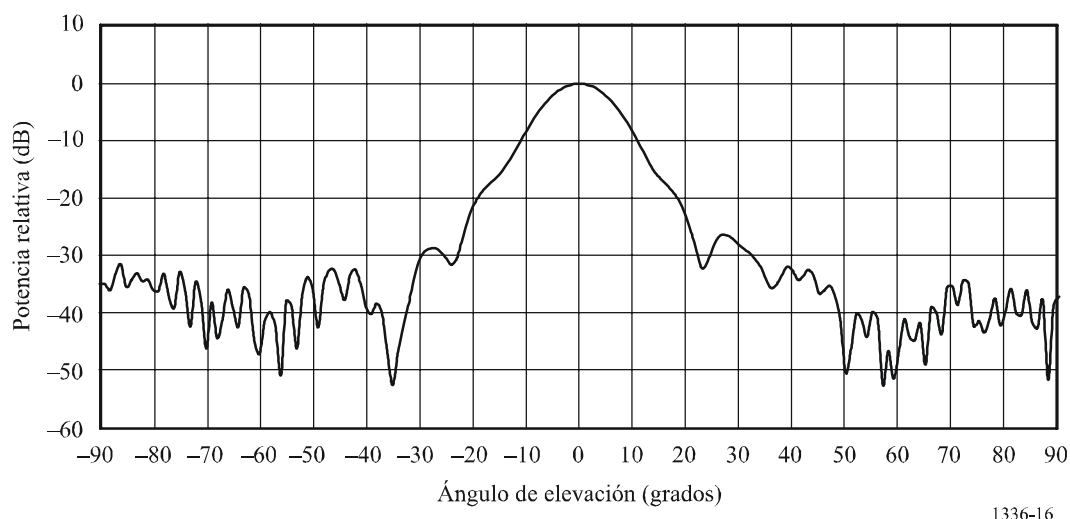
Diagrama acimutal de una antena sectorial típica de 90° (polarización vertical),
 semiángulo de 15 dBi: 90° (antena de tipo bocina de 26 GHz)



1336-15

FIGURA 16

Diagrama de elevación de una antena sectorial típica de 90° (polarización vertical),
semiángulo de 15 dBi: 12° (antena de tipo bocina de 26 GHz)



1336-16

3 Comparación con los resultados anteriores en el caso de antenas omnidireccionales

El objetivo de este punto es comparar los resultados para una antena omnidireccional que arroja la ecuación (27) con los resultados anteriores que se resumen en el Anexo 1 a la presente Recomendación.

La intensidad de radiación en el plano de elevación utilizada para una antena omnidireccional venía dada por la siguiente ecuación:

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta \tag{33}$$

Introduciendo la ecuación (33) en la ecuación (17), y suponiendo que $F(\varphi) = 1$, se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \tag{34}$$

Esta integral doble se calcula:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!} \tag{35}$$

donde $(2N)!!$ es el factorial doble $(2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (2N))$, y $(2N+1)!!$ es también un factorial doble, $(1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2N+1))$.

Así, pues, la directividad es la siguiente:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!} \tag{36}$$

A 3 dB la anchura de haz en el plano de elevación viene dada por:

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1} \left(0,5^{1/2N} \right) \tag{37}$$

En el Cuadro 2 se compara la directividad computada recurriendo a los supuestos y métodos incorporados en la ecuación (27) y la obtenida con los utilizados para resolver las ecuaciones (36) y (37). Puede verse que los resultados obtenidos utilizando la ecuación (34) se comparan favorablemente con los que arrojan las ecuaciones (36) y (37). En todos los casos, la ecuación (27) subestima ligeramente la directividad calculada mediante las ecuaciones (36) y (37). El máximo error relativo en términos porcentuales de las estimaciones, se registra cuando se trata de una anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación de 65° ($-2,27\%$). Expresado en dB, el error para este caso es de $-0,062$ dB. Para ángulos inferiores a 65° de la anchura de haz de 3 dB, el error relativo (%) y el error (dB) son funciones monótonamente decrecientes, a medida que se reduce la anchura de haz de 3 dB. Para una anchura de haz de 3 dB de 16° , el error relativo (%) es de aproximadamente $-0,01\%$ y el error (dB) es inferior a $-0,0085$ dB aproximadamente. El Cuadro 2 indica una evaluación similar para valores de $2N$ hasta 10 000 (lo que corresponde a una anchura de haz a 3 dB de $1,35^\circ$ y una directividad de 19,02 dB), lo cual confirma la convergencia de los resultados de los dos enfoques.

CUADRO 2

Comparación de la directividad de antenas omnidireccionales computada utilizando la ecuación (27a) con la calculada recurriendo a las ecuaciones (36) y (37)

$2N$	θ_3 (grados) (ecuación (37))	Directividad (dB) (ecuación (36))	Directividad (dB) (ecuación (27))	Error relativo (%)	Error (dB)
2	90,0000	1,7609	1,7437	-0,98	-0,0172
4	65,5302	2,7300	2,6677	-2,28	-0,0623
6	54,0272	3,3995	3,3419	-1,69	-0,0576
8	47,0161	3,9110	3,8610	-1,28	-0,0500
10	42,1747	4,3249	4,2814	-1,01	-0,0435
12	38,5746	4,6726	4,6343	-0,82	-0,0383
14	35,7624	4,9722	4,9381	-0,69	-0,0341
16	33,4873	5,2355	5,2047	-0,59	-0,0307
18	31,5975	5,4703	5,4423	-0,51	-0,0280
20	29,9953	5,6822	5,6565	-0,45	-0,0256
22	28,6145	5,8752	5,8516	-0,40	-0,0237
24	27,4083	6,0525	6,0305	-0,36	-0,0220
26	26,3428	6,2164	6,1959	-0,33	-0,0205
28	25,3927	6,3688	6,3496	-0,30	-0,0192
30	24,5384	6,5112	6,4931	-0,28	-0,0181
32	23,7649	6,6449	6,6278	-0,26	-0,0171
34	23,0603	6,7708	6,7545	-0,24	-0,0162
36	22,4148	6,8897	6,8743	-0,22	-0,0154
38	21,8206	7,0026	6,9879	-0,21	-0,0147
40	21,2714	7,1098	7,0958	-0,20	-0,0140
42	20,7616	7,2120	7,1986	-0,19	-0,0134
44	20,2868	7,3096	7,2967	-0,18	-0,0129
46	19,8431	7,4030	7,3906	-0,17	-0,0124
48	19,4274	7,4925	7,4806	-0,16	-0,0119
50	19,0367	7,5785	7,5671	-0,15	-0,0115
52	18,6687	7,6613	7,6502	-0,14	-0,0111
54	18,3212	7,7410	7,7302	-0,14	-0,0107
56	17,9924	7,8178	7,8075	-0,13	-0,0104
58	17,6808	7,8921	7,8820	-0,13	-0,0100

CUADRO 2 (Fin)

2N	θ_3 (grados) (ecuación (37))	Directividad (dB) (ecuación (36))	Directividad (dB) (ecuación (27))	Error relativo (%)	Error (dB)
60	17,3847	7,9638	7,9541	-0,12	-0,0097
62	17,1031	8,0333	8,0239	-0,12	-0,0094
64	16,8347	8,1007	8,0915	-0,11	-0,0092
66	16,5786	8,1660	8,1571	-0,11	-0,0089
68	16,3338	8,2294	8,2207	-0,11	-0,0087
70	16,0996	8,2910	8,2825	-0,10	-0,0085
72	15,8751	8,3509	8,3426	-0,10	-0,0083
74	15,6598	8,4092	8,4011	-0,10	-0,0081

4 Resumen y conclusiones

Se han ideado ecuaciones que permiten calcular fácilmente la directividad y la relación entre la anchura de haz y la ganancia de las antenas omnidireccionales y sectoriales utilizadas en los sistemas de radiocomunicaciones P-MP. Se propone utilizar las siguientes ecuaciones para determinar la directividad de las antenas sectoriales:

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (38)$$

donde:

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{para } \varphi_s > 120^\circ \\ k &= 36400 && \text{para } \varphi_s \leq 120^\circ \end{aligned} \quad (39)$$

y φ_s corresponde a una anchura de haz de 3 dB de la antena sectorial en el plano acimutal (grados) para una intensidad de radiación exponencial supuesta en el acimut, y θ_3 es la anchura de haz de 3 dB de la antena sectorial en el plano de elevación (grados).

En el caso de las antenas omnidireccionales, se propone utilizar la siguiente ecuación simplificada para calcular la anchura de haz de 3 dB en el plano de elevación, dada la ganancia (dBi) (véase la ecuación (27b)):

$$\theta_3 \approx 107,6 \times 10^{-0,1 G_0}$$

Se propone utilizar provisionalmente la siguiente ecuación semiempírica en la que se relaciona la ganancia de una antena sectorial (dBi) con las anchuras de haz de 3 dB en el plano de elevación y el plano acimutal, cuando el sector es del orden de 120° o menos y la anchura de banda de 3 dB en el plano de elevación es inferior a unos 45° (véase la ecuación (32a)):

$$\theta_3 \approx \frac{31\,000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_s}$$

Es necesario estudiar más a fondo esta cuestión para determinar la forma de tratar la región de transición implícita en la ecuación (39) y determinar la exactitud de estas aproximaciones, cuando se aplican a los diagramas medidos de las antenas sectoriales y omnidireccionales diseñadas para su utilización en los sistemas de radiocomunicación P-MP para las bandas comprendidas entre 1 GHz y aproximadamente 70 GHz.

Anexo 4

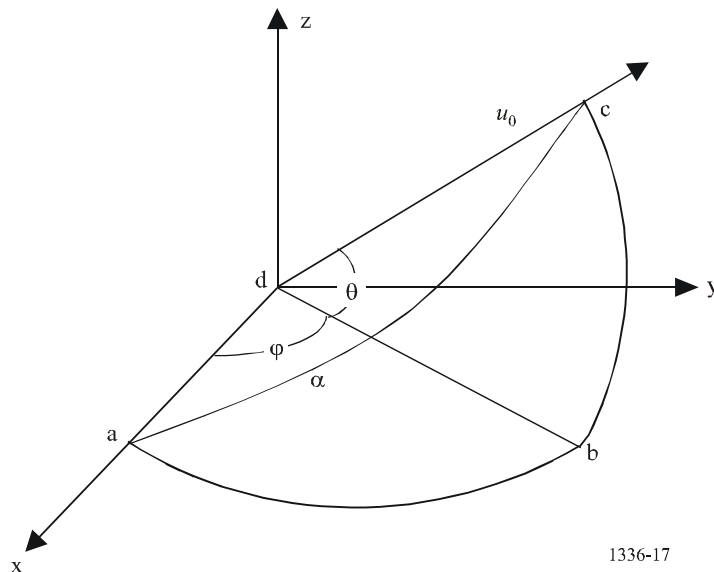
Procedimiento para determinar la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje especificado mediante un ángulo acimutal y un ángulo de elevación con respecto al eje de puntería de la antena

1 Análisis

En la Fig. 17 se muestra la disposición geométrica básica con objeto de determinar la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje. Se supone que la antena está ubicada en el centro del sistema de coordenadas esféricas; el eje x corresponde a la dirección de máxima radiación; el plano x-y es el plano horizontal local; el plano de elevación contiene el eje z; y u_0 es un vector unitario que indica la dirección en la que se desea determinar la ganancia de la antena sectorial.

FIGURA 17

Determinación del ángulo con respecto al eje de puntería para un determinado ángulo acimut y un ángulo elevación dado



1336-17

El procedimiento se basa en dos hipótesis fundamentales:

- la representación en dos dimensiones del contorno de ganancia de -3 dB del diagrama de campo lejano en función de los ángulos de acimut y de elevación, es una elipse como se muestra en la Fig. 2; y
- la ganancia de la antena sectorial desde cualquier ángulo con respecto al eje es una función de la anchura del haz a 3 dB y de la anchura de haz de la antena cuando se mide en el plano que contiene el eje x y el vector unitario u_0 (véase la Fig. 17).

Dada la anchura de haz a 3 dB (grados) de la antena sectorial en los planos de acimut y de elevación, φ_3 y θ_3 , el valor numérico de la ganancia en el eje de puntería viene dado, a título provisional, por la siguiente expresión (véanse el *recomienda* 3.3 y la ecuación (32a) en el § 4).

$$G_0 = \frac{31000}{\varphi_3 \theta_3} \tag{40}$$

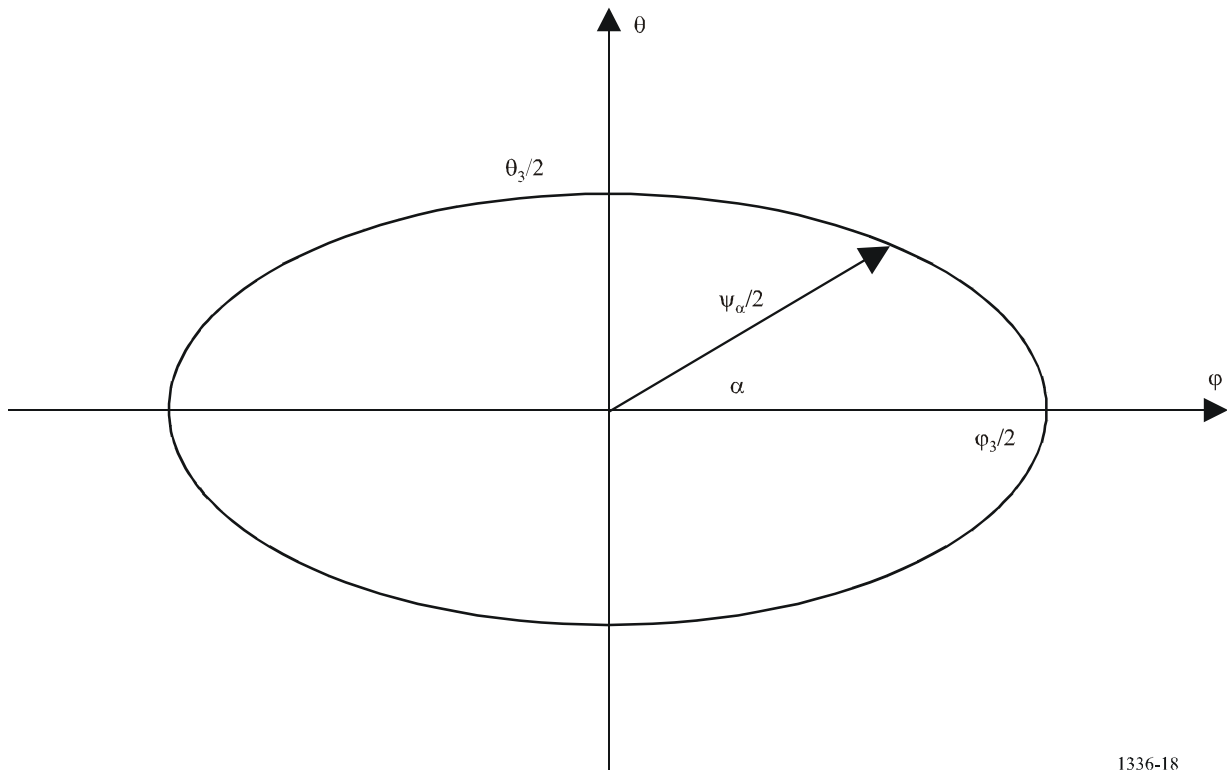
A fin de calcular la ganancia de la antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje, φ y θ , en primer lugar hay que determinar el valor de α . Como puede verse en la Fig. 17, los puntos abc forman un triángulo esférico rectángulo, por lo que α es igual a:

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{tg } \theta}{\text{sen } \varphi} \right) \tag{41a}$$

y el ángulo con respecto al eje en el plano adc es:

$$\psi_\alpha = \cos^{-1}(\cos \varphi \cos \theta) \tag{41b}$$

FIGURA 18
Determinación de la anchura de haz a 3 dB de un haz elíptico para cualquier ángulo de inclinación α



Como el haz es elíptico, la anchura de haz a 3 dB de la antena sectorial en el plano adc viene dada por:

$$\frac{1}{\Psi_{\alpha}^2} = \left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\Theta_3} \right)^2 \quad (42a)$$

o

$$\Psi_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\Phi_3} \right)^2 + \left(\frac{\sin \alpha}{\Theta_3} \right)^2}} \quad (42b)$$

La ganancia de la antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje puede determinarse provisionalmente utilizando el diagrama de radiación de referencia indicado en los *recomienda* 3.1 y 3.2 de esta Recomendación.

2 Conclusión

Se ha descrito un procedimiento mediante el cual se calcula la ganancia de una antena sectorial para cualquier ángulo con respecto al eje. Es necesario proseguir los estudios para demostrar la gama de validez de este procedimiento en el caso de antenas sectoriales. Se ruega a las administraciones que presenten diagramas experimentales de antenas sectoriales a fin de poder determinar la validez del procedimiento.

Anexo 5

Modelo matemático de diagramas de radiación genéricos de antenas sectoriales y omnidireccionales para FWS P-MP que se utiliza en la evaluación estadística de la interferencia

1 Introducción

En el texto principal de la esta Recomendación (*recomienda* 2.2 y 3.2) figuran los diagramas de radiación de referencia, que representan los niveles de lóbulo lateral expresados en valor medio para antenas omnidireccionales (en acimut) y sectoriales, los cuales pueden emplearse en el caso de fuentes de interferencia múltiples o que varían con el tiempo.

Por otra parte, en el análisis espacial estadístico de la interferencia, por ejemplo, la causada por unos pocos sistemas de satélites OSG a numerosas estaciones de un FWS, resulta necesario un modelo matemático de diagramas de radiación genéricos como los que se describen a continuación en este Anexo.

Cabe observar que estos modelos matemáticos se basan en funciones sinusoidales, por lo que al aplicarlo a cálculos de múltiples fuentes de interferencia, pueden obtenerse resultados sesgados, a no ser que las fuentes de interferencia estén distribuidas a lo largo de una gama de ángulos de acimut/de elevación. Por consiguiente, se recomienda utilizar estos diagramas únicamente en el caso indicado anteriormente.

2 Modelo matemático de antenas omnidireccionales

Al realizar análisis espacial de la interferencia causada por unos pocos sistemas de satélites OSG a numerosas estaciones del servicio fijo, deben utilizarse los siguientes diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios para ángulos de elevación de 0° a 90° (véase el Anexo 1):

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < \theta_4 \\ G_0 - 12 + 10 \log(k+1) + F(\theta) & \text{para } \theta_4 \leq \theta < \theta_3 \\ G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\frac{|\theta|}{\theta_3} \right)^{-1,5} + k \right] + F(\theta) & \text{para } \theta_3 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (43a)$$

siendo:

$$F(\theta) = 10 \log \left(0,9 \operatorname{sen}^2 \left(\frac{3\pi\theta}{4\theta_3} \right) + 0,1 \right) \quad (43b)$$

donde θ , θ_3 , θ_4 , G_0 y k son los definidos en el *recomienda 2.1* del texto principal;

NOTA 1 – En el caso de antenas típicas que funcionan en la gama 1-3 GHz, el valor del parámetro k debe ser 0,7.

NOTA 2 – En el caso de antenas con característica del lóbulo lateral mejorada que funcionan en la gama 1-3 GHz, y para todas las antenas que funcionen en la gama 3-70 GHz, el valor del parámetro k debe ser 0.

3 Modelo matemático de antenas sectoriales

En el caso de análisis espacial de la interferencia causada por uno o unos pocos sistemas de satélites OSG a numerosas estaciones del servicio fijo, deben utilizarse los siguientes diagramas de lóbulo lateral expresados en valores medios para ángulos de elevación comprendidos entre 0° y 90° y ángulos acimutales de -180° a 180° :

$$G(\varphi, \theta) = G_{ref}(x) \quad (44)$$

siendo:

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 & \text{para } 0 \leq x < 1,396 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 - 15 \log(x) + F_{ref}(x) & \text{para } 1,396 \leq x \\ F_{ref}(x) &= 10 \log(0,9 \operatorname{sen}^2(0,75\pi x) + 0,1) \end{aligned}$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{arctg} \theta}{\operatorname{sen} \varphi} \right)$$

$$\Psi_\alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha}{\theta_3} \right)^2 + \left(\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\theta_3} \right)^2}}$$

$$= \varphi_3 \cdot \theta_3 \sqrt{\frac{(\text{sen } \theta)^2 + (\text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2}{(\varphi_3 \cdot \text{sen } \theta)^2 + (\theta_3 \cdot \text{sen } \varphi \cdot \cos \theta)^2}} \quad \text{grados}$$

$$\psi = \arccos(\cos \varphi \cdot \cos \theta) \quad \text{grados}$$

$$x = \psi / \psi_\alpha$$

donde todas las variables y los parámetros son los definidos en el *recomienda* 3.1 del texto principal.

NOTA 1 – En el caso de antenas sectoriales con una anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal inferior a 120°, aproximadamente, la relación entre la ganancia máxima y la anchura de haz a 3 dB en el plano acimutal y el plano de elevación, a título provisional, es (véase el Anexo 3):

$$\theta_3 = \frac{31\,000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_3}$$

donde todos los parámetros son los definidos en el *recomienda* 3.1 del texto principal.

Anexo 6

Desarrollo de las ecuaciones para antenas sectoriales, en valores medios y de cresta, que funcionan entre 1 GHz y unos 6 GHz

1 Desarrollo de las ecuaciones para antenas sectoriales que funcionan entre 1 GHz y 6 GHz

1.1 Fundamentos de los cálculos

Para obtener un modelo adecuado a partir de los datos experimentales de diagramas de antena a frecuencias de alrededor de 2 GHz, se utiliza el parámetro k que representa las características del lóbulo lateral en las ecuaciones empleadas para antenas sectoriales, análogamente a las ecuaciones utilizadas para antenas omnidireccionales.

Se observó que el diagrama de una antena sectorial con un parámetro k mayor que cero corresponde con los diagramas de antena experimentales, cuyo niveles del primer lóbulo lateral no resultaban adecuados cuando se utilizaban las ecuaciones de antenas omnidireccionales.

Para el caso de diagramas de antena sectorial expresados en valores de cresta se utiliza la siguiente ecuación (45):

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{para } 0 \leq x < 1 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{para } 1 \leq x \end{aligned} \quad (45)$$

La definición de todos los parámetros es la que figura en el texto principal de esta Recomendación (*recomienda* 3.1).

Obsérvese que existe una pequeña discontinuidad en la ecuación (45) para $x = 1$.

Para $k = 0,7$, por ejemplo, la segunda ecuación resulta igual a $G_{ref}(x) = G_0 - 9,7$ mientras que la primera no varía, es decir, $G_{ref}(x) = G_0 - 12$ (una diferencia de 2 dB aproximadamente). La discontinuidad disminuye cuando k también disminuye.

A fin de definir con mayor exactitud la discontinuidad entre estas dos ecuaciones, se aplican unas pequeñas aproximaciones ($k \ll 1$ y x_k cerca de la discontinuidad 1):

$$G_{ref}(x_k) = G_0 - 12 + 10 \log(x_k^{-1,5} + k) = G_0 - 12x_k^2$$

$$\Rightarrow -12x_k^2 = -12 + \frac{10}{\ln(10)} \ln(x_k^{-1,5} + k) \approx -12 + \frac{10}{\ln(10)} k$$

$$\Rightarrow x_k \approx \sqrt{1 - \frac{5k}{6 \ln 10}}$$

De este modo, la discontinuidad «1» puede sustituirse por el punto de discontinuidad flotante x_k .

Así pues, la ecuación (45) resulta:

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{para } 0 \leq x < x_k \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{para } x_k \leq x \end{aligned} \tag{46}$$

siendo:

$$x_k = \sqrt{1 - 0,36k}$$

1.2 Dominio de validez de las ecuaciones

Al evaluar los diagramas de antena experimentales, se llegó a la conclusión de que son necesarias otras ecuaciones para antenas que funcionen entre 1 GHz y 6 GHz, aproximadamente.

1.3 Estudio relativo al valor del parámetro k

En el Cuadro 1 se resumen los resultados del análisis relativo al parámetro k y los diagramas de antena experimentales. En el Cuadro 3 también puede observarse la mejora de la característica del lóbulo lateral en los últimos 10 años.

CUADRO 3

Valor del parámetro k en esta Recomendación

Recomendación UIT-R F.1336			1997	2000	2006 (utilizado en esta Recomendación)
Antena omnidireccional	Lóbulo lateral normal	1-3 GHz	$k = 1,5$	$k = 0,7$	$k = 0,7$
		3-70 GHz	$k = 1,5$	$k = 0$	$k = 0$
	Lóbulo lateral mejorado	1-70 GHz	$k = 0$	$k = 0$	$k = 0$
Antena sectorial	Lóbulo lateral normal	1-3 GHz	–	$k = 0,7$	Valor de cresta: $k = 0,7$ Valor medio: $k = 0,2$ (Nota 1)
		3-6 GHz	–	$k = 0$	
		6-70 GHz	–	$k = 0$	$k = 0$
	Lóbulo lateral mejorado	1-70 GHz	–	$k = 0$	$k = 0$

NOTA 1 – En el caso de antenas sectoriales se utilizan las ecuaciones (46).

1.4 Efecto del parámetro k sobre el diagrama de radiación de la antena sectorial

Por regla general, en la mayoría de los casos (lóbulo lateral normal) resulta adecuado un diagrama de radiación de la antena expresado en valores de cresta con $k = 0,7$ (véase § 2 del presente Anexo).

Obsérvese que para $k = 0$ los diagramas de radiación de antena corresponden a los de una antena sectorial con lóbulo lateral mejorado.

En el caso de diagramas de antena sectorial expresados en valores de cresta debe utilizarse la ecuación (47):

$$\begin{aligned} G_{ref}(x) &= G_0 - 12x^2 && \text{para } 0 \leq x < x_k \\ G_{ref}(x) &= G_0 - 12 + 10 \log(x^{-1,5} + k) && \text{para } x_k \leq x < 4 \\ G_{ref}(x) &= G_0 - \lambda_k - 15 \log(x) && \text{para } x \geq 4 \end{aligned} \quad (47)$$

siendo $\lambda_k = 12 - 10 \log(1 + 8k)$ y $x_k = \sqrt{1 - 0,36k}$

y

x_k : punto de corte que garantiza la continuidad entre el lóbulo principal y los primeros lóbulos laterales

λ_k : factor de atenuación de la ganancia de la antena necesario para garantizar la continuidad entre los lóbulos laterales y el lóbulo posterior para $x = 4$.

La ecuación (47) se utiliza en los *recomienda* 3.1.1 y 3.2.1.

2 Consideraciones relativas al parámetro k en el caso de antenas sectoriales que funcionan en la gama 1-6 GHz

Para determinar el valor adecuado de k , se calcula la diferencia total entre el diagrama de referencia y los diagramas de antena medidos experimentalmente que han facilitado varios países tanto para aplicaciones fijas como móviles. Estos diagramas medidos indican la ganancia para numerosos valores del ángulo de elevación.

En el caso de diagramas expresados en valores de cresta, los datos experimentales se contrastaron directamente con la ecuación (47) con un factor k igual a 0,7.

En el caso de diagramas expresados en valores medios, el cálculo se realizó únicamente para el lóbulo lateral (y no para el lóbulo principal); las diferencias entre los diagramas teóricos y los reales se muestrearon cada grado a fin de determinar el «error total».

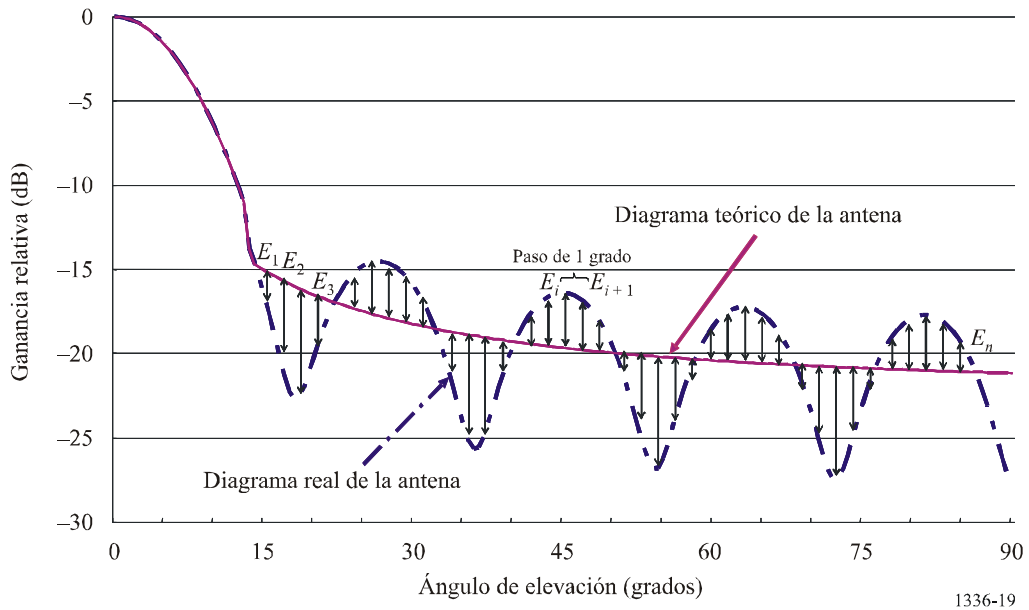
El error total se define del modo siguiente, donde E_i se expresa en valores reales en vez de en dB.

$$\text{Error total} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^2}$$

Se calculó el error total para cada diagrama utilizando diversos valores del parámetro k entre 0 y 0,3. Los resultados se muestran en la Fig.19. Podría considerarse como valor óptimo el valor del parámetro k con el que se obtiene el error total mínimo. Según este análisis, para los diagramas de antena expresados en valores medios debe utilizarse el valor de $k = 0,2$.

FIGURA 19

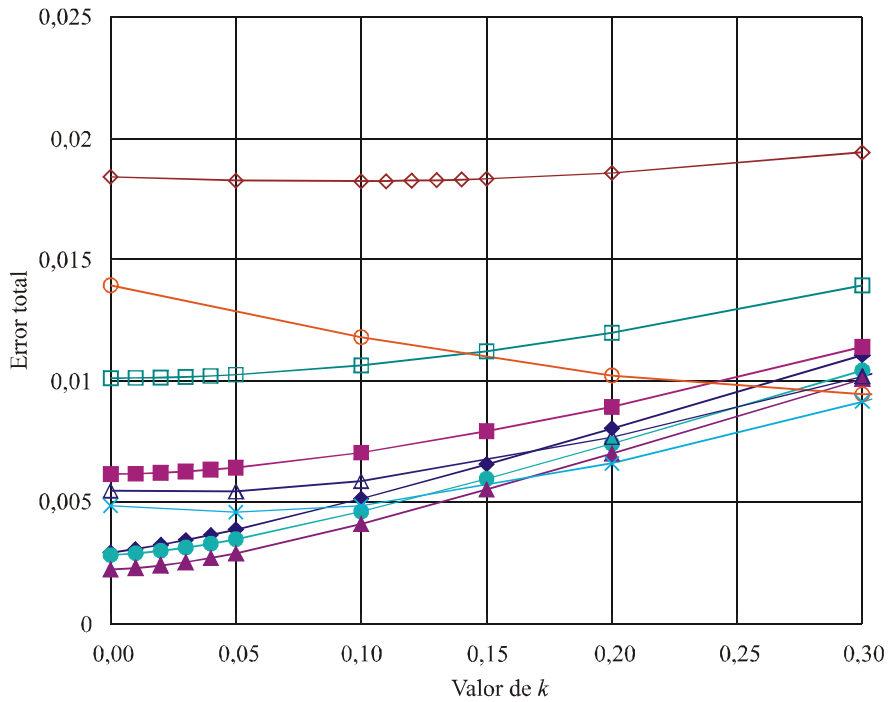
Cálculo del error total para determinar el parámetro k de diagramas en valores medios



1336-19

FIGURA 20

Ejemplo de cálculo del valor óptimo de k en el caso de un diagrama en valores medios



Nuevos datos medidos

- ◆ Antena 1 (2 GHz, para el servicio móvil)
- Antena 2 (2 GHz, para el servicio móvil)
- Antena 3 (2 GHz, para el servicio fijo, sector de 60°)
- ▲ Antena 4 (2 GHz, para el servicio fijo, sector de 90°)
- ◇ RV901704_P
- 2,0 GHz 6°/4°
- Antena 5
- △ Antena 6
- × Antena 7

1336-20

Otro factor importante que hay que tomar en consideración es el «valor sigma», que se define como la potencia total integrada a lo largo de toda la gama de ángulos.

El concepto es fundamentalmente el siguiente:

- para diagramas expresados en valores de cresta, el valor sigma debe estar comprendido entre 2 y 4 dB;
- para diagramas del lóbulo lateral expresados en valores medios, el valor de sigma debe estar comprendido entre 0 y 1 dB.

En el Cuadro 4 figuran los resultados del cálculo de los valores sigma para las ecuaciones recomendadas correspondientes a ejemplos representativos de antenas características.

CUADRO 4

Resultados de los cálculos de los valores sigma

	Diagrama	Ecuaciones	Parámetro k	Valor sigma	
				16 dBi, sector de 60°	16 dBi, sector de 120°
Antenas características en la gama 1-6 GHz	Envolvente en valores cresta	<i>recomienda</i> 3.1.1	$k = 0,7$	3,8 dB	2,55 dB
	Lóbulo lateral en valores medios	<i>recomienda</i> 3.2.1	$k = 0,2$	0,8 dB	0,12 dB
			$k = 0,4$	1,43 dB	0,57 dB
			$k = 0,6$	1,93 dB	0,97 dB

En el caso de diagramas de envolvente expresados en valores medios, el valor de sigma para $k = 0,7$ se encuentra dentro de la gama de valores admisible. Por otra parte, $k = 0,2$ es un valor posible para los diagramas de lóbulo lateral expresados en valores medios.