

RECOMENDACIÓN UIT-R F.1336-1*

**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)

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 de radioenlaces 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 sistemas de radioenlaces;
- b) que, para dichos estudios pueden ser apropiados los diagramas de radiación basados en el nivel rebasado por un pequeño porcentaje de los valores de cresta de los lóbulos laterales;
- c) que los diagramas de lóbulos laterales de antenas de diferentes tamaños dependen en gran medida de la directividad de la antena y de la relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda de funcionamiento;
- d) que se necesitan los diagramas de radiación de referencia cuando no se dispone de información sobre el diagrama de radiación real de la antena;
- 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,

recomienda

1 que, en ausencia de información particular sobre el diagrama de radiación de la antena del sistema de radioenlaces 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 sistemas de radioenlaces P-MP con visibilidad directa;
- 1.2** realizar estudios de coordinación y evaluación de la interferencia entre estaciones de sistemas de radioenlaces P-MP con visibilidad directa y estaciones de los servicios que comparten la misma banda de frecuencias;
- 2** que se adopte el siguiente diagrama de radiación de referencia para las frecuencias comprendidas en la gama de 1-3 GHz y, provisionalmente, para las frecuencias superiores a 3 GHz a aproximadamente 70 GHz (véase la Nota 2):
- 2.1** en los casos en que se trate de una estación que utiliza una antena con diagrama omnidireccional o próximo al plano horizontal, se deberán utilizar las siguientes ecuaciones para los ángulos de elevación en la gama de 0° a 90° (véanse el Anexo 1 y la Nota 3):

$$G(\theta) = \text{máx}[G_1(\theta), G_2(\theta)] \quad (1a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad (1b)$$

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

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

donde:

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

G_0 : ganancia máxima 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,

la relación entre la ganancia (dBi) y la anchura de banda de 3 dB en el plano de elevación (grados) es (véase la Nota 4):

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

2.1.1 en los casos en que se trate de antenas típicas que funcionan en la gama 1-3 GHz, el parámetro k sería 0,7 (véase la Nota 5);

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

2.2 que el diagrama consignado en el *recomienda 2.1* se utilice provisionalmente para el diagrama de radiación de referencia en el plano de elevación de las antenas sectoriales, utilizando el valor de θ_3 que figura en el *recomienda 2.2.2*;

2.2.1 que el parámetro k , que ha de utilizarse en relación con el diagrama de radiación de referencia de las antenas sectoriales en el plano de elevación que funcionan en la gama 1-70 GHz, sea conforme provisionalmente con los valores consignados en los *recomienda 2.1.1* y *2.1.2*;

2.2.2 que, cuando se trate de antenas sectoriales con una anchura de banda de 3 dB en el plano acimutal inferior a unos 120° , la relación entre la ganancia máxima en el plano acimutal y la anchura de banda de 3 dB en el plano acimutal y el plano de elevación sea, provisionalmente (véanse la Nota 6 y el Anexo 3):

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

donde φ_s es la anchura de banda de 3 dB del sector en el plano acimutal (grados) y los demás parámetros se definen en el *recomienda 2.1*;

2.3 que en los casos en que se trate de antenas de bajo coste y poca ganancia, con simetría circular alrededor de la anchura de haz de 3 dB y con una ganancia menor a aproximadamente 20 dBi, se utilicen las siguientes ecuaciones (véanse el Anexo 2 y la Nota 7):

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

donde:

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

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

θ : ángulo fuera del eje (grados)

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

$$= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0,1 G_0}} \quad \text{grados}$$

$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3$ grados

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

3 que se necesitan estudios ulteriores para mejorar las definiciones de las envolventes del diagrama de radiación de antena. De esta manera se facilitará la compartición de frecuencias con otros servicios y se mejorará la utilización del espectro;

4 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 – Es preciso estudiar más para determinar si las modificaciones del diagrama de radiación de referencia y el factor $-1,5$ resultan necesarios cuando se aplican a antenas que funcionan en las bandas de frecuencias de 3 GHz a aproximadamente 70 GHz. Asimismo, habrá que realizar más estudios para idear diagramas de radiación de referencia aplicables a las antenas sectoriales en el plano acimutal. Tal vez sea preciso elaborar asimismo diagramas de radiación de referencia para otros tipos de antenas que puedan utilizarse en las estaciones centrales y las estaciones de abonado de los sistemas P-MP en la gama de frecuencias de 1 GHz a aproximadamente 70 GHz.

NOTA 3 – El diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales que figura en el *recomienda* 2.1 se aplica primordialmente a las situaciones en que la ganancia máxima en el plano horizontal es entre 8 dBi y 13 dBi. Se necesitan estudios ulteriores para establecer plenamente la gama para la cual las ecuaciones son válidas.

NOTA 4 – 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 banda de 3 dB en el plano de elevación inferiores a 45° .

NOTA 5 – El diagrama de radiación de referencia para las antenas omnidireccionales y sectoriales que figura en el § A.2.1.2.2.3 de la Resolución 46 (Rev.CMR-97) del RR es el siguiente:

$$\begin{aligned} G(\theta) &= G_0 - 12(\theta/\varphi_3)^2 && \text{para } 0 \leq \theta < \varphi_3 \\ G(\theta) &= G_0 - 12 - 10 \log(\theta/\varphi_3) && \text{para } \varphi_3 \leq \theta < 90^\circ \end{aligned}$$

Los parámetros son los definidos en el *recomienda* 2.1.

En la Resolución 46 (Rev.CMR-97) y en el Anexo 1 al apéndice S5 del RR se indica que este diagrama de antena es provisional y que se prosigue el estudio en el UIT-R.

NOTA 6 – En el Anexo 3 se obtiene la relación entre la ganancia y la anchura de banda para las antenas omnidireccionales y sectoriales. La relación indicada en el *recomienda* 2.2.2 se basa en las mediciones limitadas que se han efectuado en relación con antenas sectoriales diseñadas para su utilización en la banda 25,25-29,5 GHz. La justificación de la constante 31 000 se explica en el Anexo 3.

NOTA 7 – El diagrama de radiación de referencia que figura en el *recomienda* 2.3 se aplica primordialmente a las situaciones en que la ganancia de 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.

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):

$$D = 10 \log \left[191,0 \sqrt{0,818 + 1/\theta_3} - 172,4 \right] \quad \text{dBi} \quad (2a)$$

La ecuación (2a) puede resolverse para θ_3 cuando se conoce la directividad:

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

$$\alpha = \frac{10^{0,1D} + 172,4}{191,0} \quad (2c)$$

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:

$$E_T(\theta) = E_e(\theta) \cdot AF(\theta) \quad (3)$$

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:

$$E_e(\theta) = \cos(\theta) \quad (4)$$

El factor del conjunto de antenas es:

$$AF_N = \frac{1}{N} \left[\frac{\text{sen} \left(N \frac{\Psi}{2} \right)}{\text{sen} \left(\frac{\Psi}{2} \right)} \right] \quad (5)$$

donde:

N : número de elementos en la red de antenas

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

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 (2b) y (2c);
- 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:

$$N = \left\lceil \frac{2 \times 1,3916}{2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right)} \right\rceil \quad (6)$$

donde $\lceil x \rceil$ es el valor íntegro máximo que no excede x .

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

$$\Delta D = 20 \log \left[\left| AF_N \times \cos(\theta) \right| \right] \quad \text{dB} \quad (7)$$

Se ha evaluado la ecuación (7) 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:

$$G(\theta) = \text{máx} [G_1(\theta), G_2(\theta)] \quad (8a)$$

$$G_1(\theta) = G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\theta_3} \right)^2 \quad \text{dBi} \quad (8b)$$

$$G_2(\theta) = G_0 - 12 + 10 \log \left[\left(\text{máx} \left\{ \frac{|\theta|}{\theta_3}, 1 \right\} \right)^{-1,5} + k \right] \quad \text{dBi} \quad (8c)$$

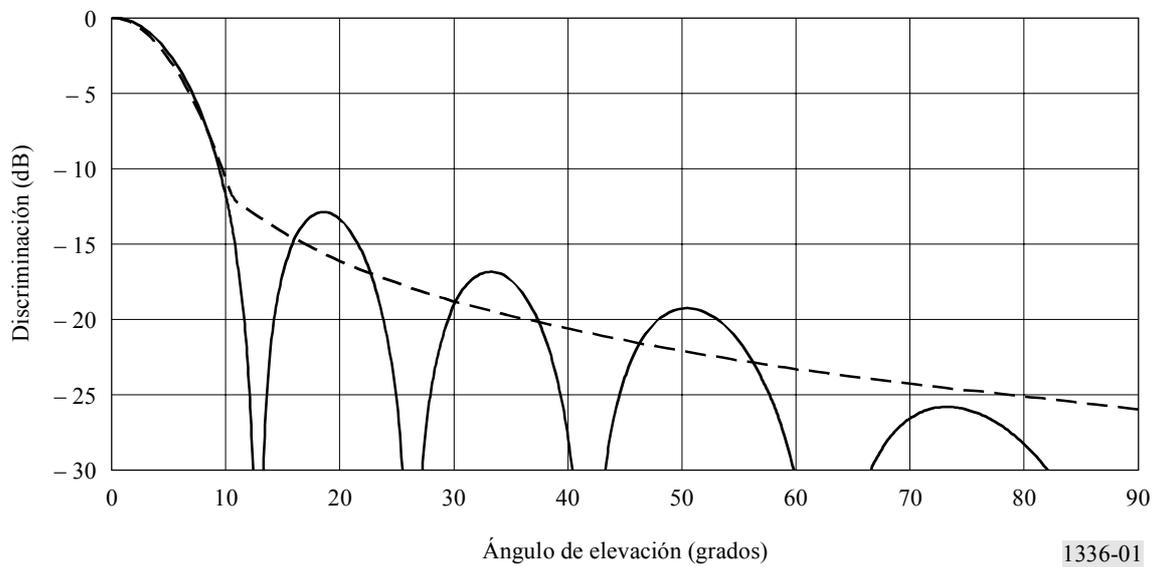
donde k es un parámetro que representa el aumento de los niveles de los lóbulos laterales por encima de lo que podría esperarse en una antena con calidad mejorada de lóbulos laterales.

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 (8), 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 (8), 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

$$G_0 = 10 \text{ dBi}, k = 0$$

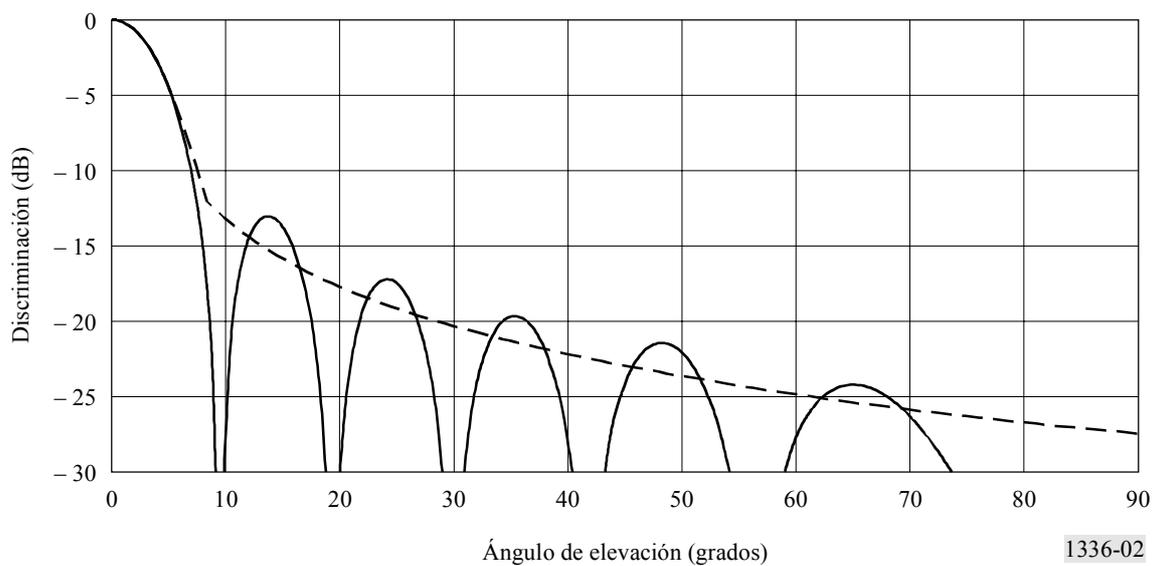


1336-01

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

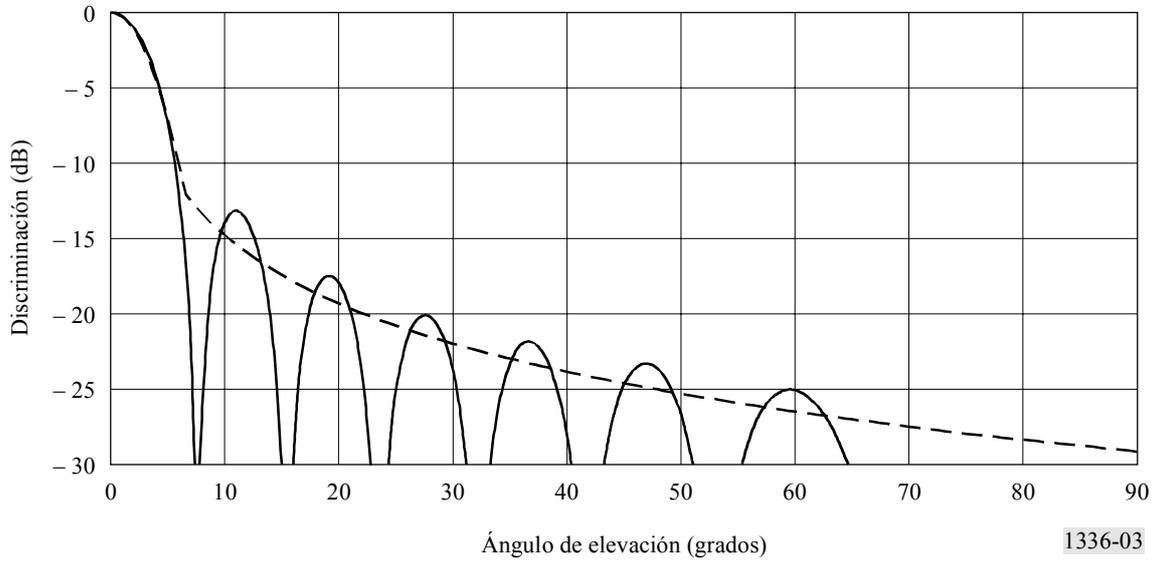
$$G_0 = 11 \text{ dBi}, k = 0$$



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

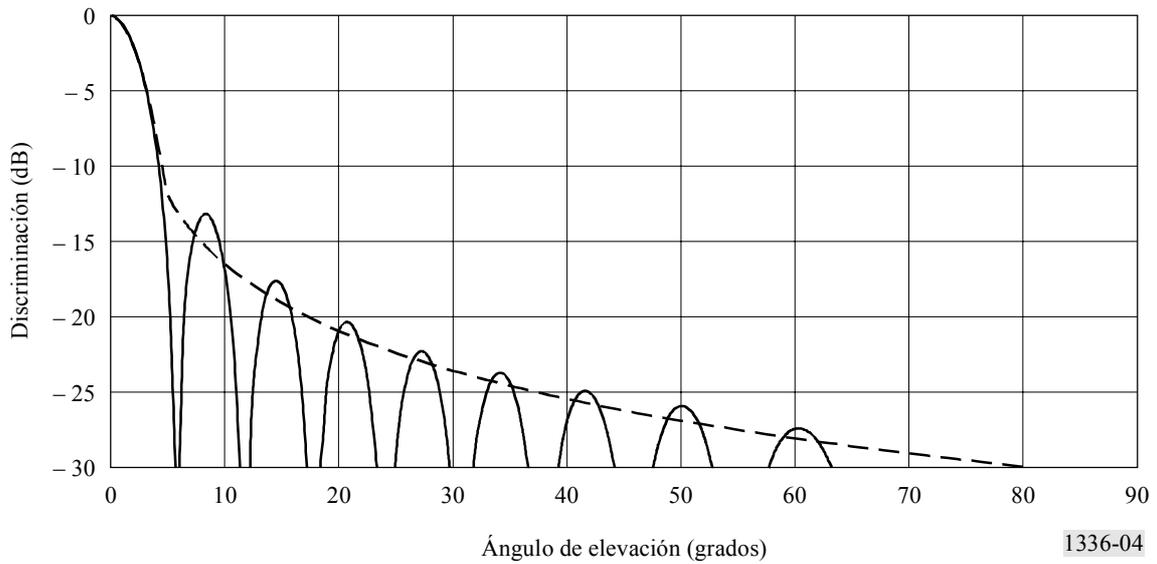
$G_0 = 12 \text{ dBi}$, $k = 0$



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, $k = 0$

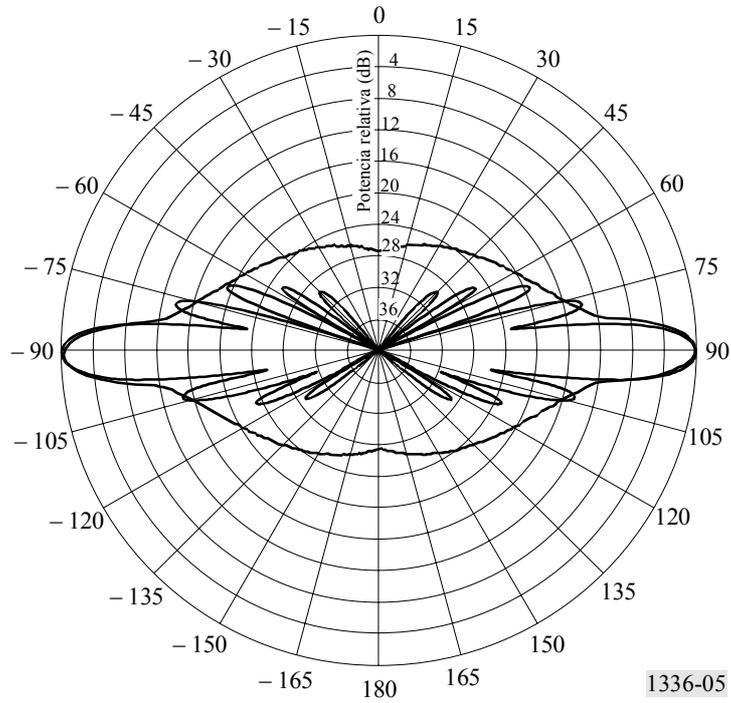


FIGURA 6

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, $k = 0$

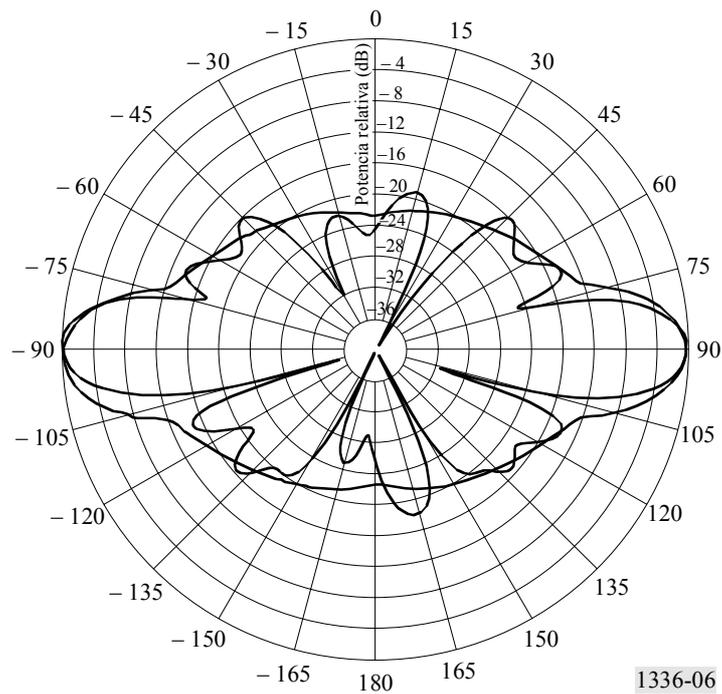


FIGURA 7

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

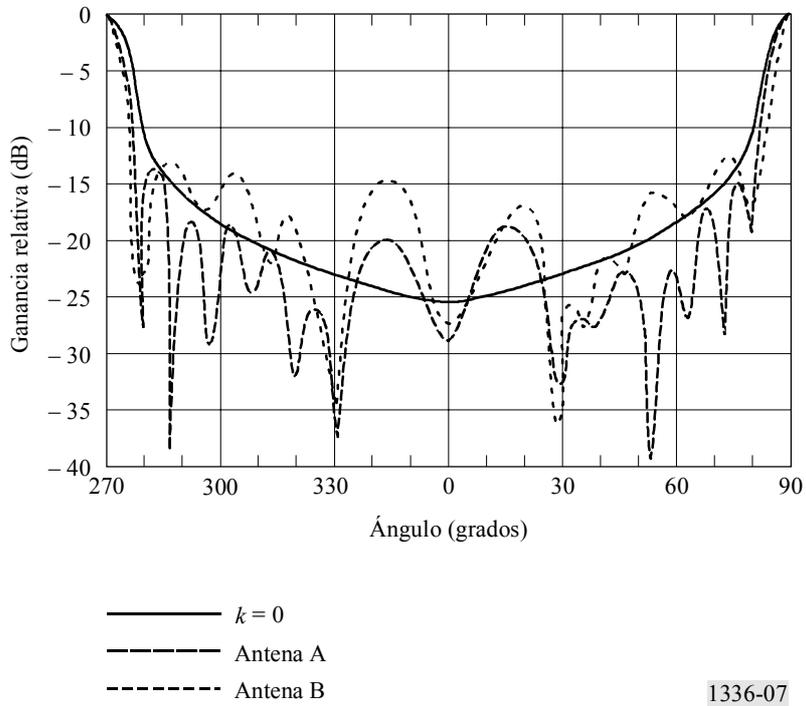


FIGURA 8

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

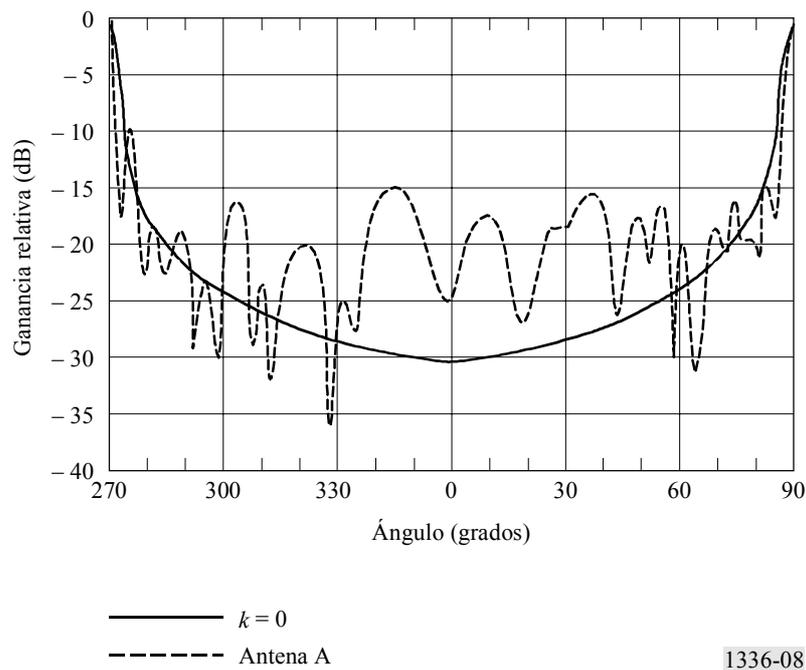


FIGURA 9

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

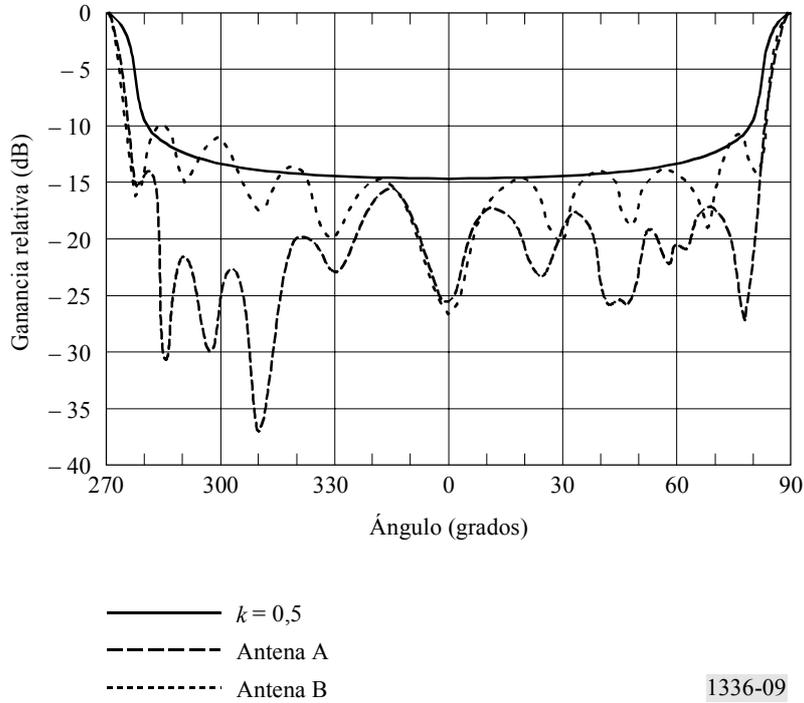


FIGURA 10

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

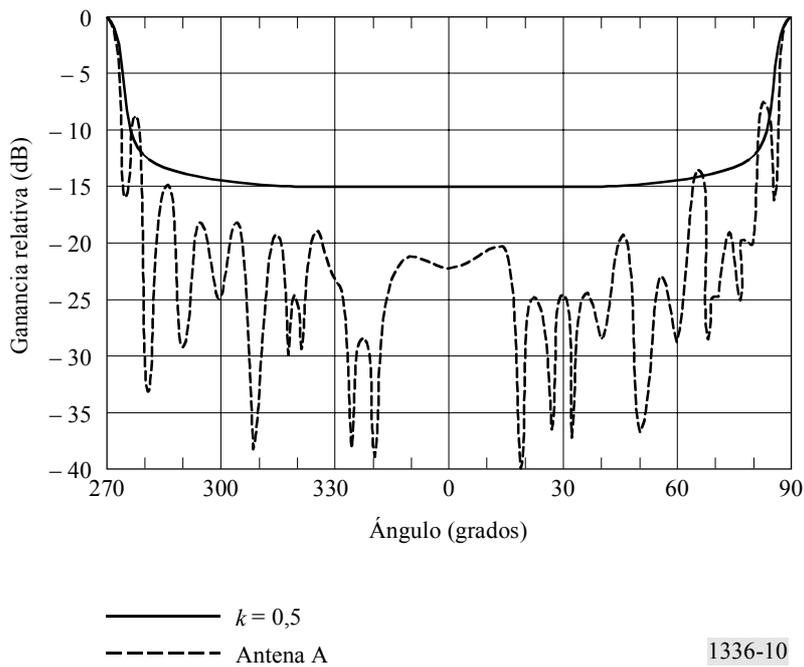
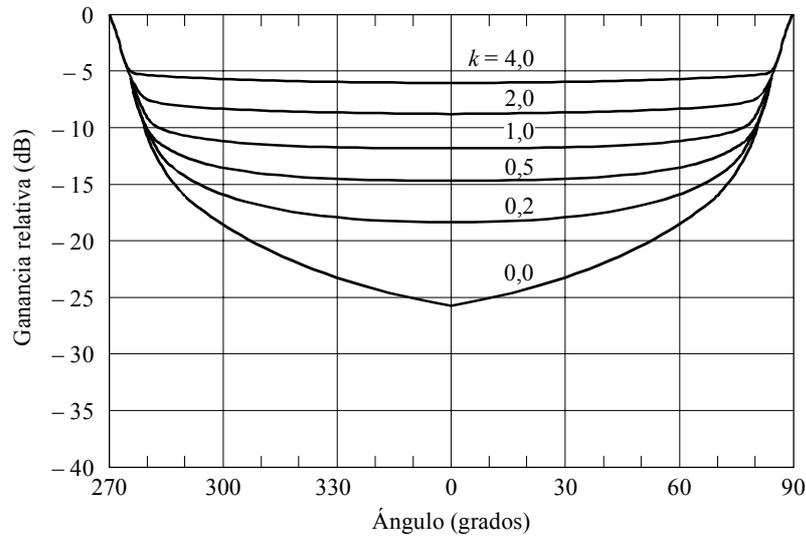


FIGURA 11

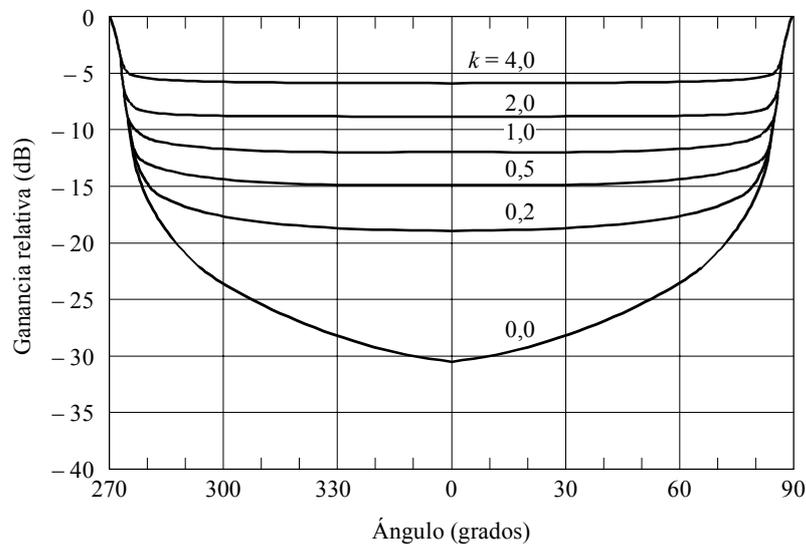
Envolventes de los diagramas de radiación de referencia para diversos valores de k para una antena omnidireccional con una ganancia de 10 dBi



1336-11

FIGURA 12

Envolventes 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.

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:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 - 12 \left(\frac{\theta}{\varphi_3} \right)^2 & \text{para } 0 \leq \theta < 1,08 \varphi_3 & (9) \\ G_0 - 14 & \text{para } 1,08 \varphi_3 \leq \theta < \varphi_1 & (10) \\ G_0 - 14 - 32 \log \left(\frac{\theta}{\varphi_1} \right) & \text{para } \varphi_1 \leq \theta < \varphi_2 & (11) \\ -8 & \text{para } \varphi_2 \leq \theta \leq 180^\circ & (12) \end{cases}$$

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)

$$= \sqrt{27\,000 \times 10^{-0,1 G_0}} \quad \text{grados}$$

$\varphi_1 = 1,9 \varphi_3$ 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):

$$D = \frac{U_M}{U_0} \quad (13)$$

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\varphi) F(\theta) \cos(\theta) d\theta d\varphi \quad (14)$$

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:

$$F(\varphi) = U \left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi| \right) \quad (15)$$

donde:

φ_s : anchura de haz del sector

$$\begin{aligned} U(x) &= 1 && \text{para } x \geq 0 \\ U(x) &= 0 && \text{para } x < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

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:

$$F(\theta) = e^{-a^2\theta^2} \quad (17)$$

donde:

$$a^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\theta_3}\right)^2 = \frac{2,773}{\theta_3^2} \quad (18)$$

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

Al introducir las ecuaciones (15) y (17) en la ecuación (14) se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U\left(\frac{\varphi_s}{2} - |\varphi|\right) d\varphi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \quad (19)$$

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:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta \approx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a^2\theta^2} \cos(\theta) d\theta = \frac{1}{a} \sqrt{\pi} e^{-1/4a^2} \quad (20)$$

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 (20), 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 (20). (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 (19).

$$U_0 = \frac{\varphi_s \theta_3}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi}{2,773}} \times e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (21)$$

CUADRO 1

Exactitud relativa de la integral infinita de la ecuación (20) 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 (15) y (17) se deduce que $U_M = 1$. Introduciendo estos valores y la ecuación (21) en la ecuación (13) se obtiene la directividad de una antena sectorial, con una anchura de haz dada en los planos de elevación y acimutal:

$$D = \frac{11,805}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (22)$$

donde los ángulos se expresan en rad. Cuando los ángulos vienen dados en grados, la ecuación (22) se convierte en la siguiente:

$$D = \frac{38750}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (23)$$

Hay que señalar que para una antena omnidireccional, la ecuación (23) se reduce a:

$$D = \frac{107,64}{\theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (24a)$$

Se parte del supuesto de que si la eficiencia de radiación es del 100% y las pérdidas de antena son desdéniables, 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%.

$$G_0 \approx \frac{107,64}{\theta_3} \quad (24b)$$

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:

$$F(\varphi) = e^{-b^2 \varphi^2} \quad (25)$$

donde:

$$b^2 = -\ln(0,5) \times \left(\frac{2}{\varphi_s} \right)^2 \quad (26)$$

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

Introduciendo las ecuaciones (17) y (25) en la ecuación (14), 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 (13) se obtiene la siguiente aproximación:

$$D = \frac{11,09}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{11,09}} \quad (27)$$

donde los ángulos son los definidos anteriormente y se expresan en rad. Si ahora se pasa a grados, la ecuación (27) se transforma en:

$$D = \frac{36400}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (28)$$

Si se comparan las ecuaciones (23) y (28), 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 (28) 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 (28), 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:

$$G_0 \approx \frac{31\,000}{\varphi_s \theta_3} \tag{29a}$$

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:

$$G_0 \approx \frac{34\,000}{\varphi_s \theta_3} \tag{29b}$$

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

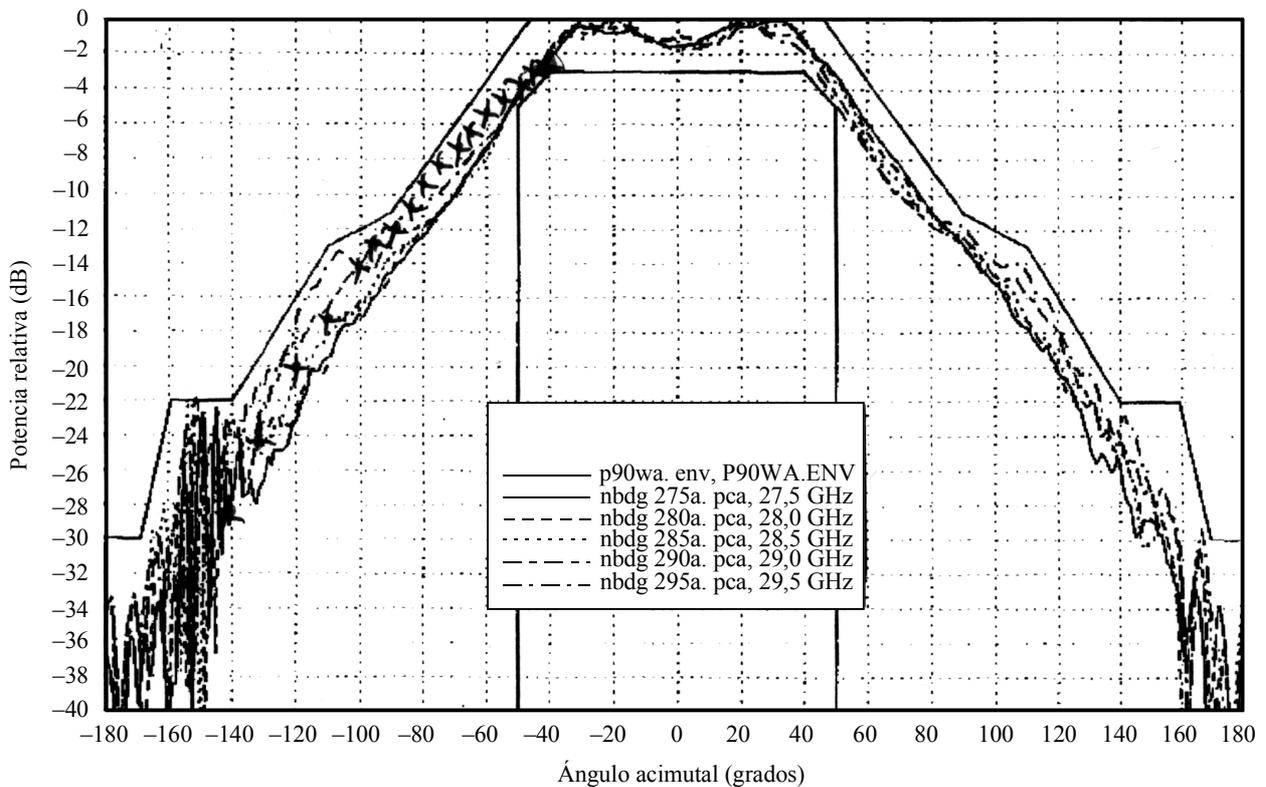
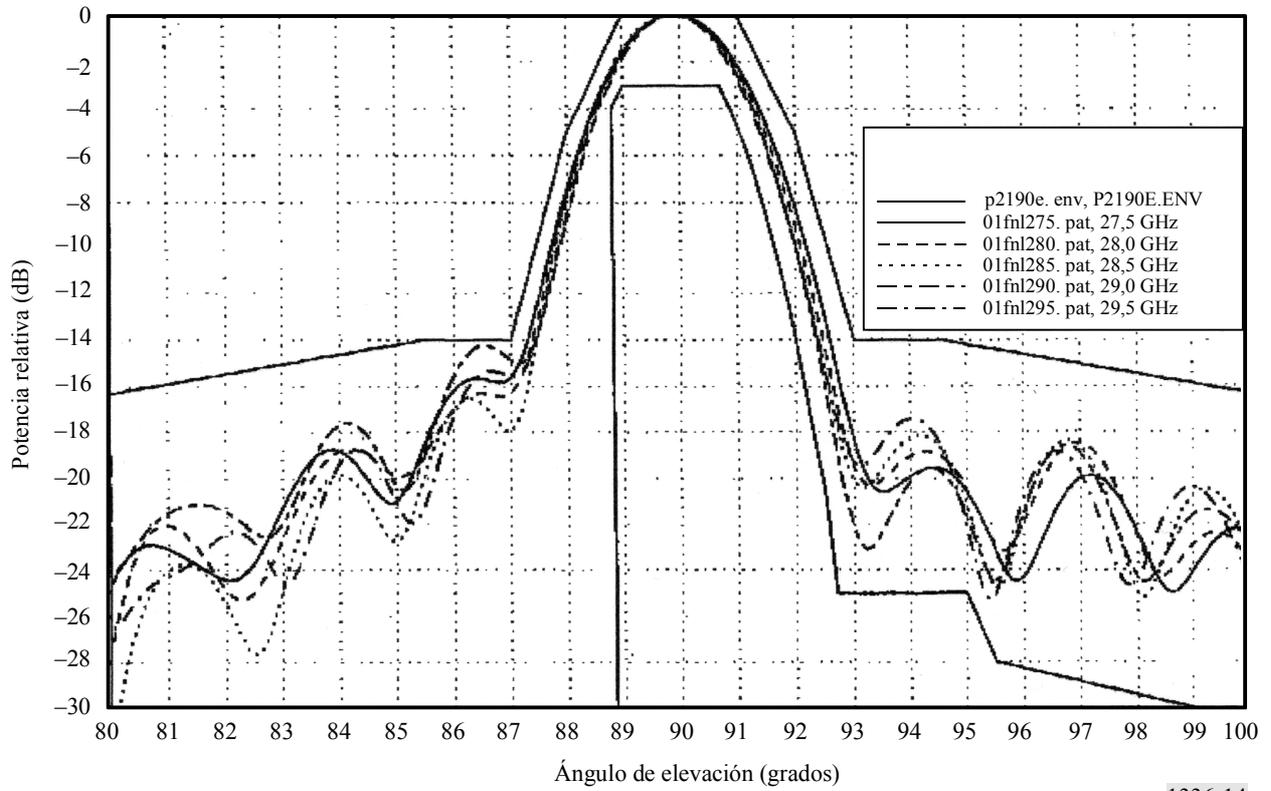


FIGURA 14

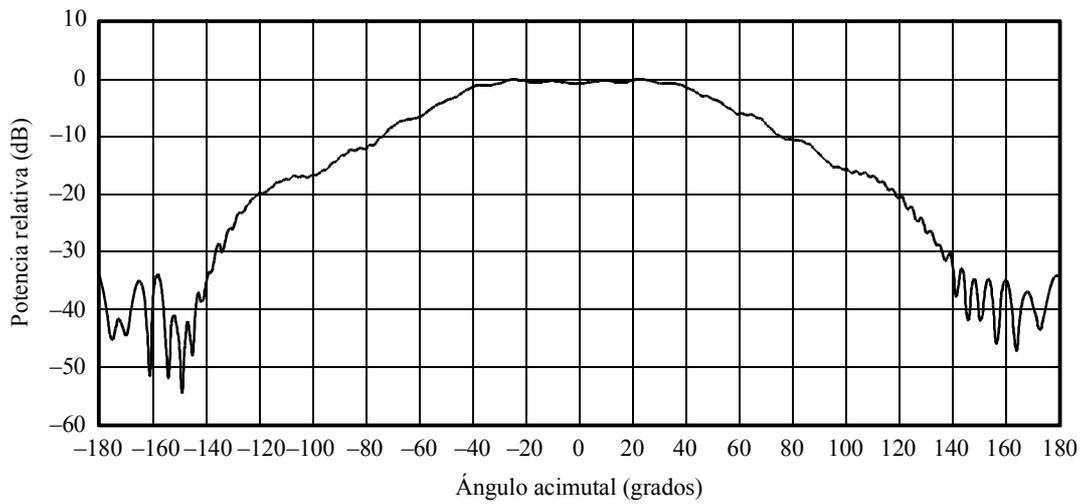
Diagrama medido en el plano de elevación de una antena sectorial de 90°. Diagrama medido a lo largo de la banda 27,5-29,5 GHz



1336-14

FIGURA 15

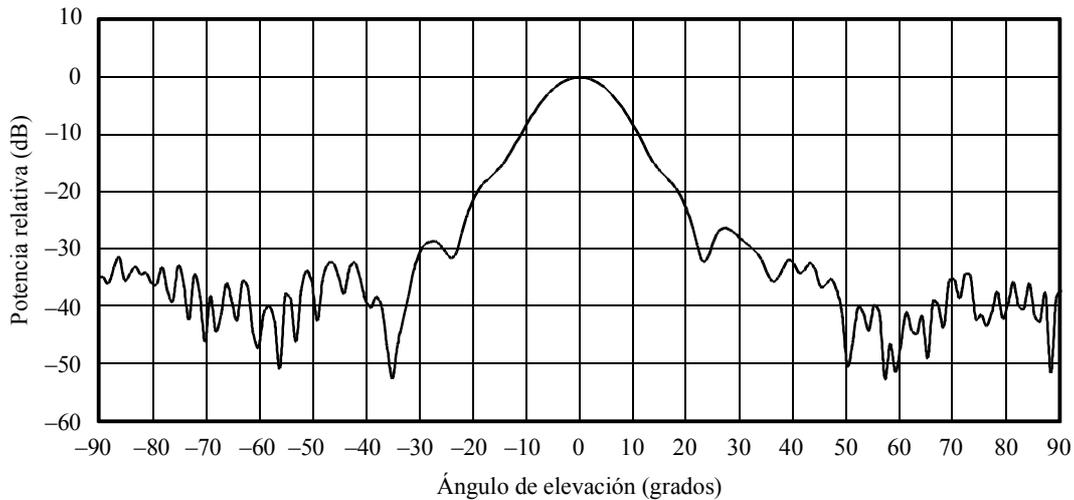
Diagrama acimutal de una antena sectorial típica de 90° (polarización vertical), semiángulo de 15 dBi: 90° (antena de tipo bocina de 26 GHz)



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 (24) 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:

$$F(\theta) = \cos^{2N} \theta \quad (30)$$

Introduciendo la ecuación (30) en la ecuación (14), y suponiendo que $F(\phi) = 1$, se obtiene:

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2N}(\theta) \cos(\theta) d\theta d\phi \quad (31)$$

Esta integral doble se calcula de la forma siguiente:

$$U_0 = \frac{(2N)!!}{(2N+1)!!} \quad (32)$$

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:

$$D = \frac{(2N+1)!!}{(2N)!!} \quad (33)$$

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

$$\theta_3 = 2 \cos^{-1} \left(0,5^{1/2N} \right) \quad (34)$$

En el Cuadro 2 se compara la directividad computada recurriendo a los supuestos y métodos incorporados en la ecuación (24) y la obtenida con los utilizados para resolver las ecuaciones (33) y (34). Puede verse que los resultados obtenidos utilizando la ecuación (24) se comparan favorablemente con los que arrojan las ecuaciones (33) y (34).

En todos los casos, la ecuación (24) subestima ligeramente la directividad calculada mediante las ecuaciones (33) y (34). 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° 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 (24a) con la calculada recurriendo a las ecuaciones (33) y (34)

2N	θ_3 (grados) (ecuación (34))	Directividad (dB) (ecuación (33))	Directividad (dB) (ecuación (24a))	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
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:

$$D = \frac{k}{\varphi_s \theta_3} e^{\frac{\theta_3^2}{36400}} \quad (35)$$

donde:

$$\begin{aligned} k &= 38750 && \text{para } \varphi_s > 120^\circ \\ k &= 36400 && \text{para } \varphi_s \leq 120^\circ \end{aligned} \quad (36)$$

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 (24b)):

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

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 (29a)):

$$\theta_3 \approx \frac{31000 \times 10^{-0,1 G_0}}{\varphi_s}$$

Es necesario estudiar más a fondo esta cuestión para determinar la forma de tratar la región de transición implícita en la ecuación (36) 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.
