

## RECOMENDACIÓN UIT-R F.699-7\*

**Diagramas de radiación de referencia de antenas de sistemas inalámbricos fijos para utilizarlos en los estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia en la gama de frecuencias de 100 MHz a unos 70 GHz**

(Cuestión UIT-R 110/9)

(1990-1992-1994-1995-1997-2000-2004-2006)

**Cometido**

En la presente Recomendación se proporcionan diagramas de radiación de referencia de antenas de sistemas inalámbricos fijos en la gama de frecuencias de 100 MHz a unos 70 GHz e información sobre las mismas. Dicha información puede utilizarse en los estudios de coordinación y en la evaluación de la interferencia cuando no se disponga de información particular relativa a la antena de sistemas inalámbricos fijos (FWS).

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) y entre estaciones de tales sistemas y estaciones terrenas 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, 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 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 diámetro 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 teniendo en cuenta el Informe UIT-R F.2059 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 FWS 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;

---

\* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 4, 6, 7 y 8 de Radiocomunicaciones.

**1.2** realizar estudios de coordinación y evaluación de la interferencia entre estaciones de FWS y estaciones de los servicios de radiocomunicación espacial 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 100 MHz a unos 70 GHz;

**2.1** en el caso de las frecuencias comprendidas en la gama de 1 GHz a unos 70 GHz, cuando la relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda sea superior a 100, se emplearán las ecuaciones siguientes (véanse las Notas 6 y 7):

$$G(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{para } 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{para } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r$$

$$G(\varphi) = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{para } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ$$

$$G(\varphi) = -10 \quad \text{para } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$G(\varphi)$ : ganancia (dB) relativa de una antena isotrónica

$\varphi$ : ángulo con relación al eje (grados)

$D$ : diámetro de antena } expresados en las mismas unidades  
 $\lambda$ : longitud de onda }

$$G_1: \text{ganancia del primer lóbulo lateral} = 2 + 15 \log \frac{D}{\lambda}$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{m\acute{a}x} - G_1} \quad \text{grados}$$

$$\varphi_r = 15,85 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,6} \quad \text{grados}$$

**2.2** en el caso de las frecuencias comprendidas en la gama de 1 GHz a unos 70 GHz, cuando la relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda sea inferior o equivalente a 100, se emplearán las ecuaciones siguientes (véanse las Notas 6 y 7):

$$G(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{para } 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{para } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{para } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{para } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

**2.3** en el caso de las frecuencias comprendidas en la gama de 100 MHz a menos de 1 GHz, cuando la relación entre el diámetro de la antena y la longitud de onda sea superior a 0,63 ( $G_{m\acute{a}x}$  es mayor que 3,7 dBi), se emplearán las ecuaciones siguientes:

$$G(\varphi) = G_{m\acute{a}x} - 2,5 \times 10^{-3} \left( \frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 \quad \text{para} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{para} \quad \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D}$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi \quad \text{para} \quad 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < \varphi_s$$

$$G(\varphi) = -2 - 5 \log \frac{D}{\lambda} \quad \text{para} \quad \varphi_s \leq \varphi \leq 180^\circ$$

siendo:

$$\varphi_s = 144,5 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^{-0,2}$$

**3** que en los casos en que se conoce la ganancia máxima de la antena, la relación  $D/\lambda$  puede evaluarse a partir de la expresión siguiente:

$$20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{m\acute{a}x} - 7,7$$

donde  $G_{m\acute{a}x}$  es la ganancia de la antena en la dirección del lóbulo principal (dBi);

**4** que en los casos en que sólo se conozcan las anchuras de haz de la antena:

**4.1**  $D/\lambda$  (expresado en la misma unidad) se estime aproximadamente a partir de la siguiente expresión:

$$D/\lambda \approx 70 / \theta$$

siendo  $\theta$  la anchura de haz (-3 dB) (grados);

**4.2** dado el valor  $\theta$ ,  $G_{m\acute{a}x}$  puede estimarse aproximadamente mediante la expresión:

$$G_{m\acute{a}x} \text{ (dBi)} \approx 44,5 - 20 \log \theta$$

**5** que las administraciones presenten diagramas de radiación medidos o especificaciones que permitan elaborar y proponer diagramas de radiación de referencia nuevos y mejorados que puedan utilizarse en estudios de coordinación y evaluación de interferencias (véase el Apéndice 1 al Anexo 1);

**6** que se haga referencia al Anexo 1 para la información adicional sobre los diagramas de radiación de referencia de las antenas de los FWS;

**7** que para el cálculo detallado de los niveles de interferencia por los trayectos de interferencia es necesario considerar la respuesta de polarización cruzada de las antenas del sistema afectado y las antenas del sistema interferente;

7.1 que para el cálculo del *recomienda* 7, incluido el componente de la señal radiada en la polaridad prevista por la antena de transmisión y la respuesta copolar de la antena de recepción afectada para el componente de la señal radiada en la polaridad no prevista por la antena de transmisión, puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{dBi}$$

donde los parámetros que se indican a continuación se refieren a la ganancia de antena (dBi):

- $G_t(\varphi_t)$ : ganancia efectiva de la antena de transmisión en el sentido de la antena afectada
- $G_r(\varphi_r)$ : ganancia efectiva de la antena de recepción en el sentido de la antena interferente
- $G_{tH}(\varphi_t)$ : componente de ganancia con polarización horizontal de la antena de transmisión
- $G_{rV}(\varphi_r)$ : componente de ganancia con polarización vertical de la antena de recepción
- $G_{tV}(\varphi_t)$ : componente de ganancia con polarización vertical de la antena de transmisión
- $G_{rH}(\varphi_r)$ : componente de ganancia con polarización horizontal de la antena de recepción.

$\varphi_t$  y  $\varphi_r$  son los ángulos situados entre la dirección del haz principal y la dirección hacia la antena afectada y la antena de transmisión, respectivamente.

En el Anexo 2, pueden hallarse más información y ejemplos numéricos utilizando la ecuación indicada.

**8** que las siguientes Notas se consideren parte de la presente Recomendación:

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

NOTA 2 – Hay que señalar que el diagrama de radiación de una antena real puede ser peor que el diagrama de radiación de referencia para cierta gama de ángulos (véase la Nota 3). Por consiguiente, no debe interpretarse que el diagrama de radiación de referencia de esta Recomendación establece el límite máximo para los diagramas de radiación de las antenas de FWS existentes o planificados. Cabe señalar que, con fines de certificación, las administraciones pueden adoptar normas, habitualmente basadas en mediciones estadísticas de antenas reales, que representen distintos valores para los niveles del lóbulo lateral del diagrama de radiación.

NOTA 3 – Debe utilizarse con prudencia el diagrama de radiación de referencia en cierta gama de ángulos para los que un sistema de alimentación de que se trate puede provocar niveles relativamente elevados de desbordamiento.

NOTA 4 – Los diagramas de referencia del § 2 sólo son aplicables a una sola polarización (horizontal o vertical). Se están estudiando diagramas de referencia para dos polarizaciones (horizontal y vertical).

NOTA 5 – El diagrama de radiación de referencia de esta Recomendación sólo es válido para antenas rotacionalmente simétricas. El diagrama de radiación de referencia de antenas con aperturas asimétricas y para antenas de FWS sin aperturas en la gama de frecuencias de 100 MHz a 1 GHz requiere nuevo estudio. Para estas antenas los anteriores diagramas de referencia deben considerarse válidos provisionalmente. En este caso, el valor de  $D/\lambda$  calculado a partir de  $G_{m\acute{a}x}$  es un  $D/\lambda$  equivalente y no el  $D/\lambda$  real.

NOTA 6 – En la Recomendación UIT-R F.1245 figuran modelos matemáticos de diagramas de radiación media para su utilización en ciertos estudios de coordinación y para el cálculo de la interferencia.

NOTA 7 – En la Recomendación UIT-R F.1336 figuran modelos de radiación de referencia de antenas omnidireccionales y sectoriales en sistemas punto a multipunto.

NOTA 8 – Se necesitan estudios ulteriores para asegurar que se siguen desarrollando los diagramas de radiación de referencia, a efectos de tener en cuenta los progresos logrados en el diseño de antenas.

NOTA 9 – Aunque en general es aplicable, el diagrama de referencia del *recomienda 2* no modela adecuadamente algunas antenas prácticas del servicio fijo, y debe tratarse con cuidado en una gama de ángulos de 5° a 70° (véanse también las Notas 2 y 3).

## Anexo 1

### Diagramas de radiación de referencia para antenas de FWS

#### 1 Introducción

Para estudiar las posibilidades de compartición de frecuencias entre un FWS y el SFS, o la posibilidad de reutilizar frecuencias en una red del FWS, es a menudo necesario utilizar un diagrama de referencia, porque el diagrama de radiación real no siempre se conoce con exactitud, o da demasiados detalles. El diagrama de referencia debe, pues, representar la envolvente de los lóbulos laterales de un modo simplificado.

Sin embargo, el diagrama de radiación de referencia elegido puede variar según la finalidad a que se destine.

En general se utilizarán los diagramas de radiación de referencia contenidos en el texto principal de esta Recomendación.

#### 2 Utilización de los diagramas de radiación de referencia

Las dos principales utilizaciones de los diagramas de referencia son las siguientes:

##### 2.1 Estudios preliminares de eliminación dentro de la zona de coordinación

Al determinar la zona de coordinación en torno a una estación terrena, se supone que las antenas de las estaciones de los FWS están directamente orientadas hacia la antena de la estación terrena. Sin embargo, suele haber cierta discriminación angular. El empleo de un diagrama de radiación de referencia simple ofrece la posibilidad de excluir de toda consideración ulterior a las estaciones del FWS, situadas en la zona de coordinación, pero que no son susceptibles de producir interferencia.

El diagrama de referencia debe necesariamente ofrecer un margen de seguridad suficiente para evitar la posible omisión de fuentes de interferencia importantes. Evidentemente, para calcular con precisión el nivel de interferencia, es necesario conocer con más precisión el diagrama de las antenas.

## 2.2 Reutilización de las frecuencias en una red inalámbrica fija

En una red inalámbrica fija, hay que utilizar muchas veces la misma frecuencia, sea en tramos suficientemente alejados entre sí, sea en tramos que parten de la misma estación en direcciones distintas, sea en el mismo tramo mediante la utilización de polarización cruzada.

En los dos últimos casos, las características de funcionamiento de la antena son de gran importancia, y para proyectar el sistema debe emplearse un diagrama de radiación de referencia bastante preciso; dicho diagrama puede ser menos sencillo que el considerado en el § 2.1 y las administraciones, reconociendo que hay que tener en cuenta la eficacia económica, quizás estimen conveniente alentar la utilización de tipos de antena de alto rendimiento en zonas con una intensa utilización del espectro.

## 3 Resultados de mediciones efectuadas en las antenas de enlaces inalámbricos fijos

Las mediciones efectuadas en numerosas antenas confirman satisfactoriamente los diagramas de radiación de referencia indicados en el texto principal de esta Recomendación, por lo menos hasta un valor de  $D/\lambda$  de 130 aproximadamente. Sin embargo, hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

**3.1** Algunas antenas, de construcción relativamente antigua, tienen características de funcionamiento inferiores a las de las antenas más recientes. Para la compartición de frecuencias, debe tomarse en consideración la existencia de estas antenas de rendimiento medio.

**3.2** En el cálculo que precede se ha supuesto que las antenas funcionan en las condiciones del espacio libre. Ahora bien, las características de las antenas ya instaladas pueden ser algo inferiores, como consecuencia de reflexiones en obstáculos próximos o en otras antenas instaladas en la misma torre.

## 4 Diagramas de radiación de antenas de alto rendimiento

Las antenas de alto rendimiento contribuyen sobremanera al aumento de la capacidad nodal en los FWS. En el caso de las antenas de reflector-bocina, ideadas para satisfacer las necesidades de los FWS terrenales en redes densas, el anterior diagrama de referencia sólo puede considerarse válido en el plano horizontal. En planos alejados del horizontal, aparecen importantes variaciones de la sensibilidad.

En la Fig. 1 se muestra un ejemplo del diagrama de radiación de una antena de reflector-bocina piramidal, específica, pero de uso generalizado. Los contornos de la envolvente de radiación se indican con una línea de trazos discontinuos (en dB por debajo del haz principal), en un sistema de coordenadas que utiliza los ángulos  $\varphi$  y  $\theta$  (el centro del sistema de coordenadas esféricas es el centro de la abertura de la antena). La gran desviación con respecto a la simetría rotacional supuesta en los diagramas de radiación de referencia del *recomienda 2* de la presente Recomendación se debe:

- al lóbulo de desbordamiento en torno a  $\varphi = +90^\circ$  y  $60^\circ < \theta < 80^\circ$ ,
- al lóbulo de protección contra las precipitaciones atmosféricas en torno a  $\varphi = -90^\circ$  y  $50^\circ < \theta < 90^\circ$ .

El lóbulo de desbordamiento es consecuencia de la difracción de la onda en el borde superior de la apertura causado por los rayos directos procedentes de la sección de la bocina piramidal. Este efecto se produce únicamente con polarización vertical. El lóbulo de protección contra las precipitaciones atmosféricas se debe a la reflexión de la energía, en la cubierta de plástico inclinada que protege contra los factores climáticos, ocasionando un retorno a la superficie parabólica que seguidamente

vuelve a dirigir la mayor parte de la energía hacia abajo sobre el borde inferior de la apertura. Este fenómeno es insensible a la polarización y a la frecuencia.

Una antena con reflector descentrado tiene gran directividad, especialmente en el plano horizontal. En la Fig. 2 se dan ejemplos de los diagramas de radiación de una antena con reflector descentrado, además de un ejemplo de la antena de reflector-bocina piramidal que se muestra en la Fig. 1.

FIGURA 1  
**Diagrama de radiación tridimensional de una antena reflector-bocina  
 piramidal a 3,9 GHz y polarización vertical  
 (cambio de escala en  $\theta = 10^\circ$ )**

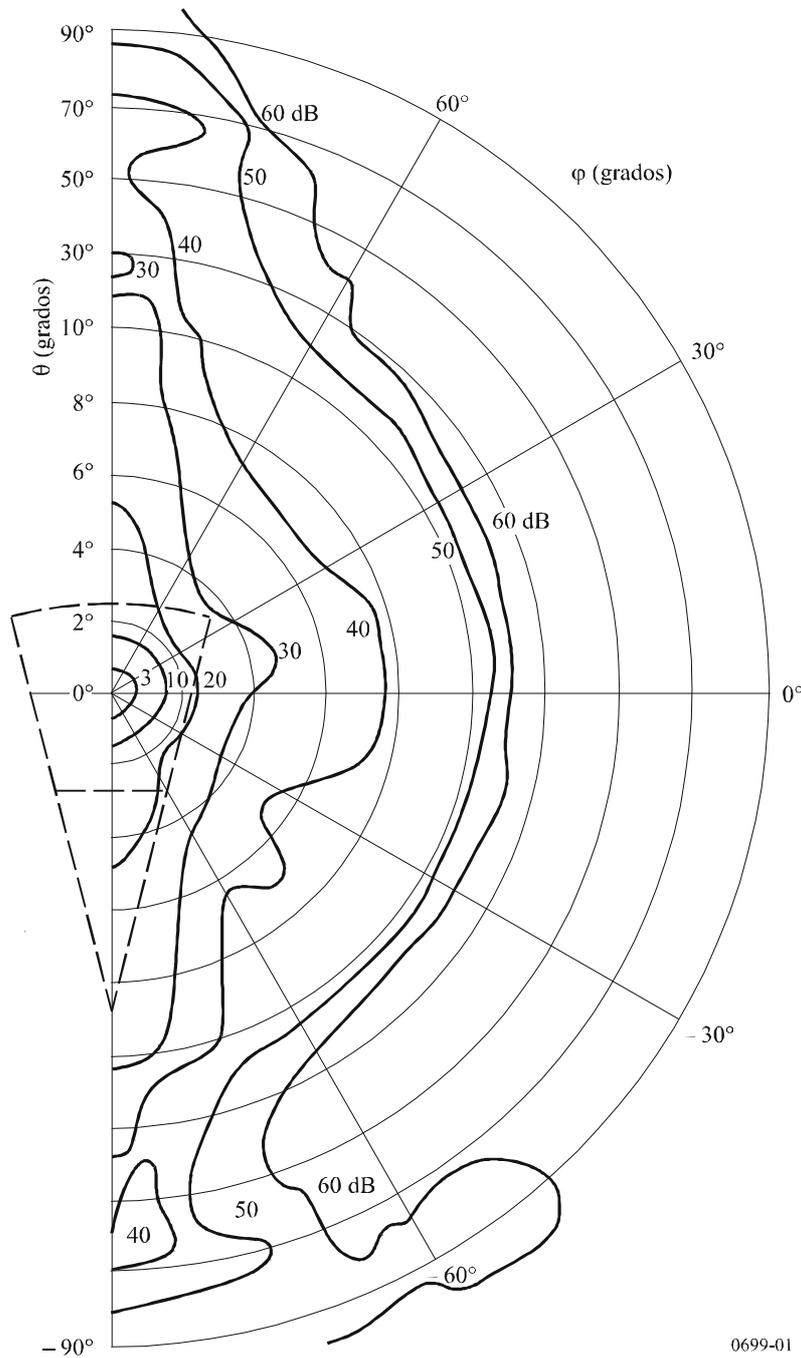
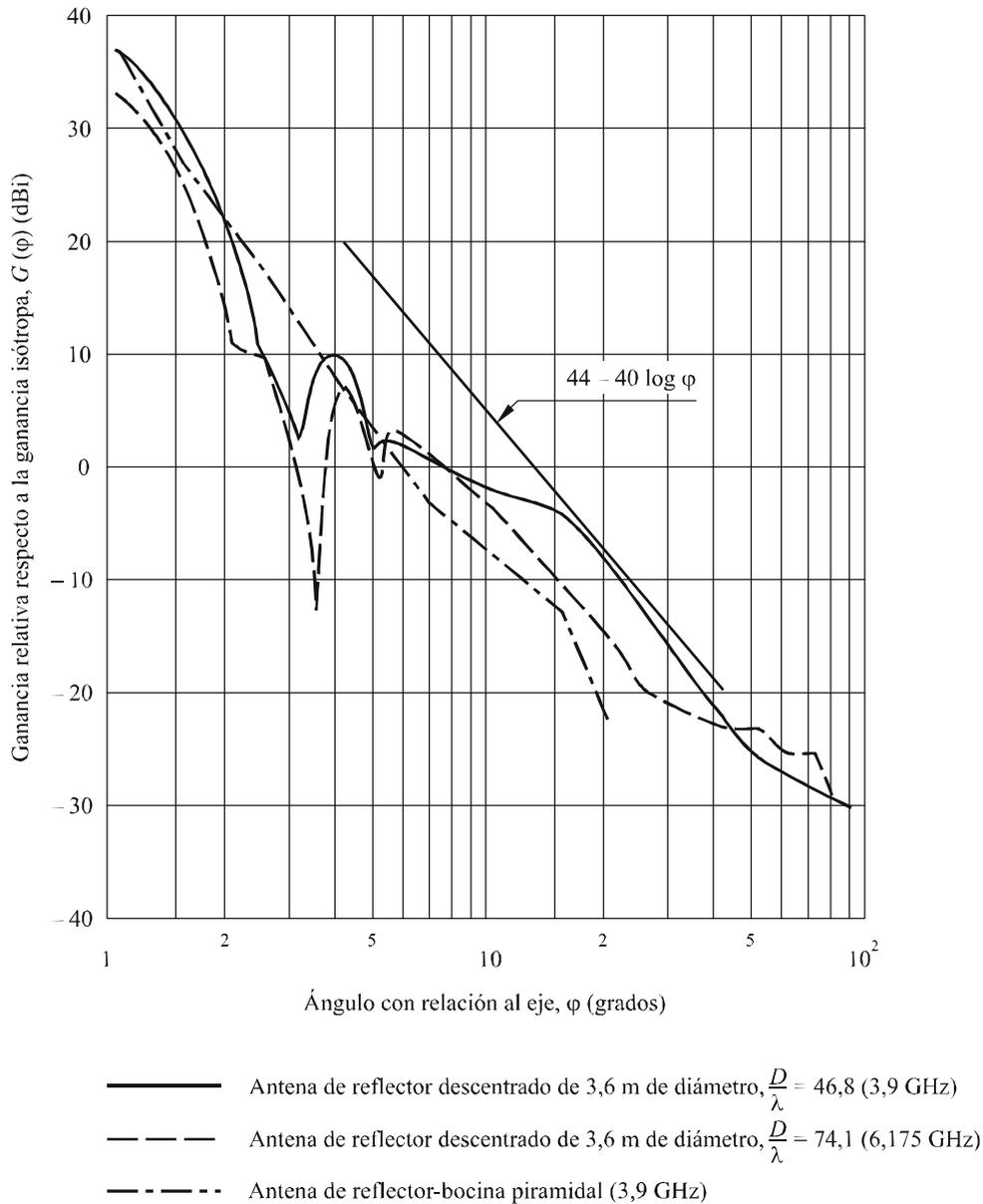


FIGURA 2

Diagramas de radiación de antenas de elevada calidad de funcionamiento



0699-02

En el caso de antenas de reflector-bocina y antenas con alimentador descentrado con muy baja iluminación en el borde del reflector, se puede utilizar provisionalmente la siguiente fórmula como diagrama de radiación de referencia en el plano horizontal:

$$G = 88 - 30 \log \frac{D}{\lambda} - 40 \log \varphi \tag{1}$$

Esta fórmula es válida fuera del lóbulo principal para  $\varphi$  hasta  $90^\circ$  aproximadamente. Sin embargo, cuando la iluminación en el borde del reflector no sea muy baja, el nivel de lóbulos laterales en ciertas direcciones puede ser superior al dado por la ecuación (1).

## Apéndice 1 al Anexo 1

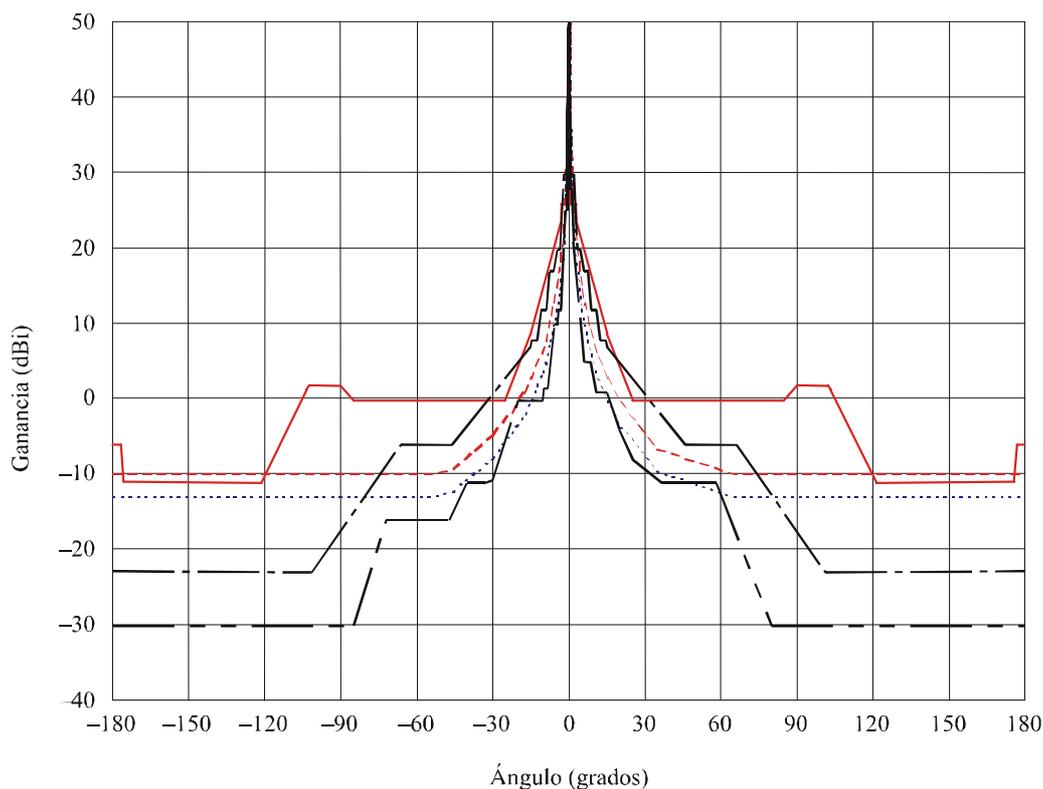
### Diagramas medidos para una futura evolución de la presente Recomendación

#### 1 Introducción

Es necesario revisar y actualizar constantemente los diagramas de radiación de referencia que se exponen en la presente Recomendación. Dado que las bandas de frecuencias que están utilizando los FWS se extienden más allá de los 70 GHz, es necesario ampliar el alcance de estos diagramas de radiación de referencia más allá de los 70 GHz. Para ello, se presentan en este Apéndice comparaciones de algunas envolventes prácticas de diagramas de antena y de diagramas de radiación con los correspondientes diagramas de referencia derivados de la presente Recomendación y de la Recomendación UIT-R F.1245.

FIGURA 3

Antena P-P de 3 m de diámetro en 10,7 GHz ( $D/\lambda = 114$ , ganancia = 49,8 dBi)  
(H: polarización horizontal, V: polarización vertical)



- Recomendación UIT-R F.699
- ..... Recomendación UIT-R F.1245
- Perfil bajo V
- Perfil medio V
- Perfil elevado V

FIGURA 4

**Diagramas para una muestra de producción de antenas  
(1,8 m de diámetro, polarización horizontal, 10,7 GHz)**

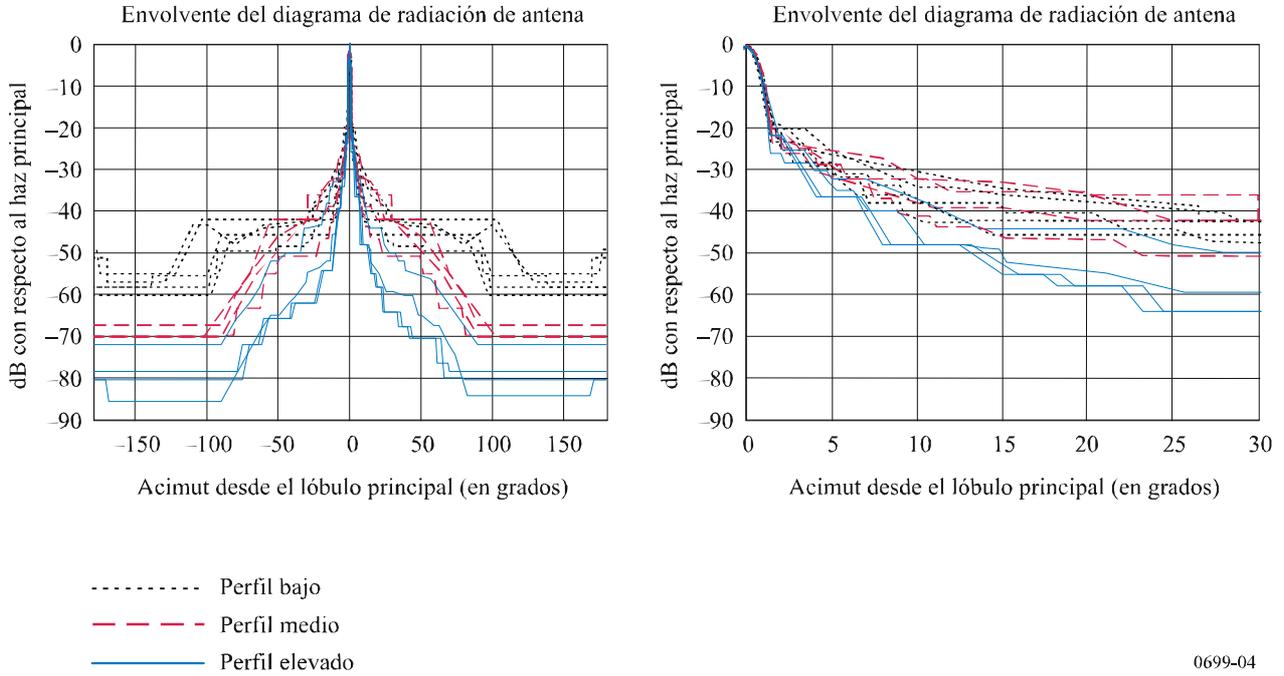
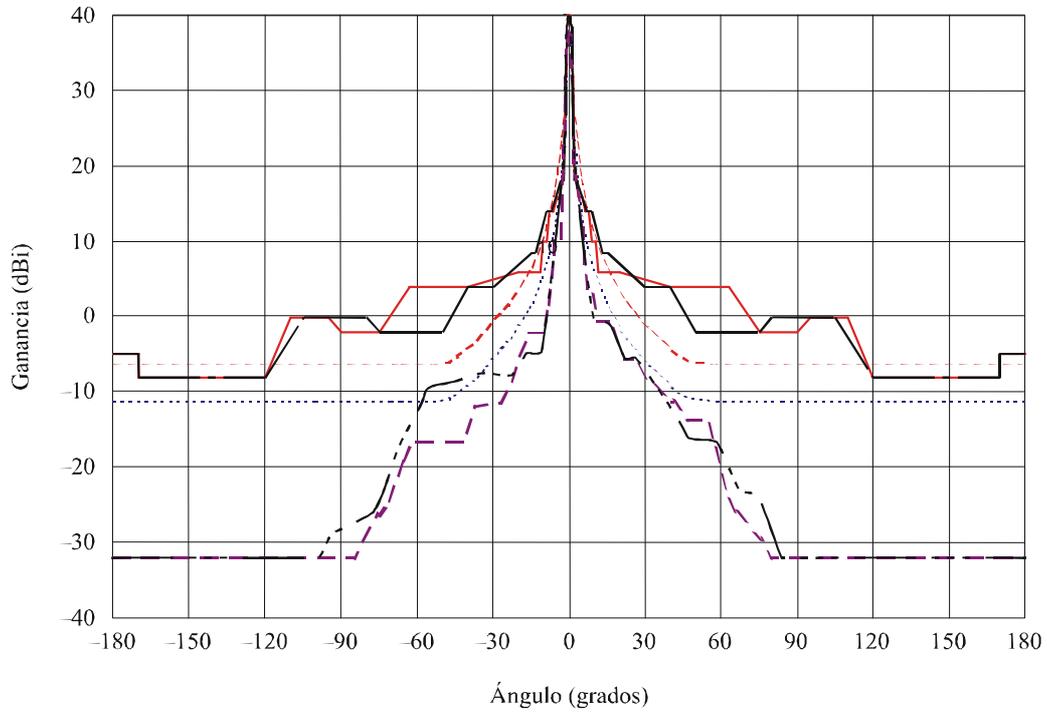
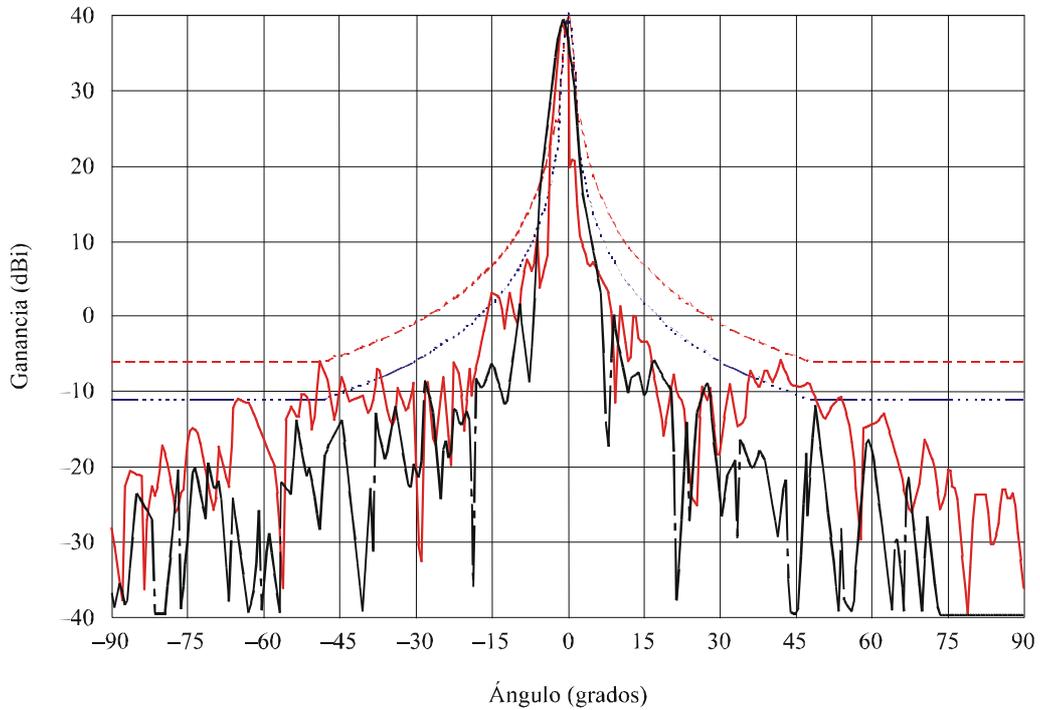


FIGURA 5  
 Antena P-P de 1,2 m de diámetro en 10,5 GHz ( $D/\lambda = 43$ , ganancia = 39,9 dBi)  
 (H: polarización horizontal, V: polarización vertical)



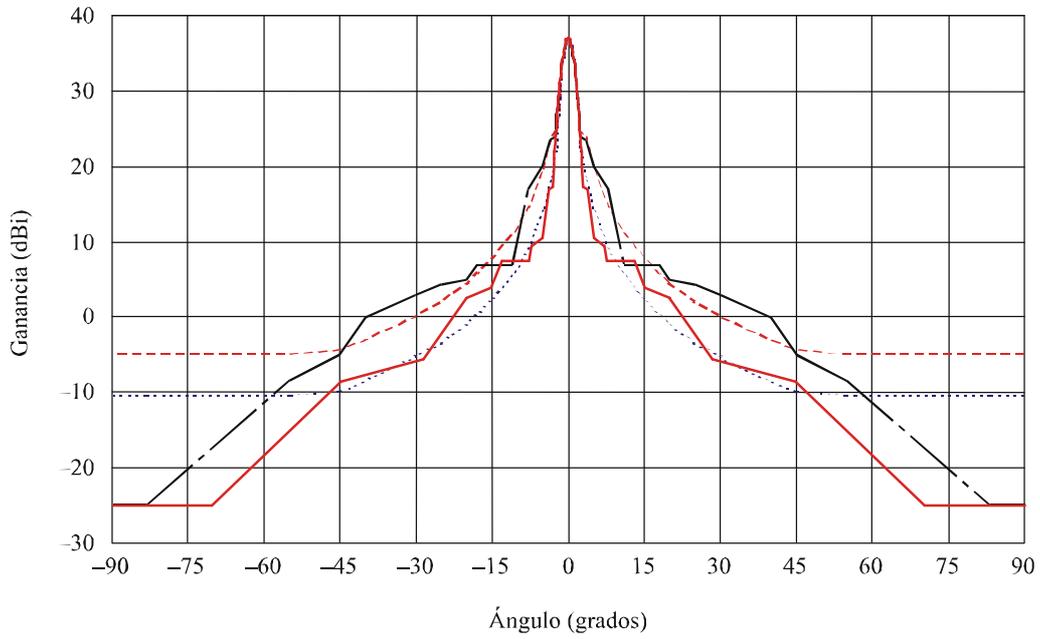
- Recomendación UIT-R F.699
- ..... Recomendación UIT-R F.1245
- Perfil bajo H
- - - Perfil bajo V
- - - Perfil elevado H
- - - Perfil elevado V

FIGURA 6  
Antena de lente y bocina P-P de 50 cm de diámetro en 21 GHz  
( $D/\lambda = 37$ , ganancia = 40 dBi)



- Recomendación UIT-R F.699
- ..... Recomendación UIT-R F.1245
- Valor medido
- Valor medido

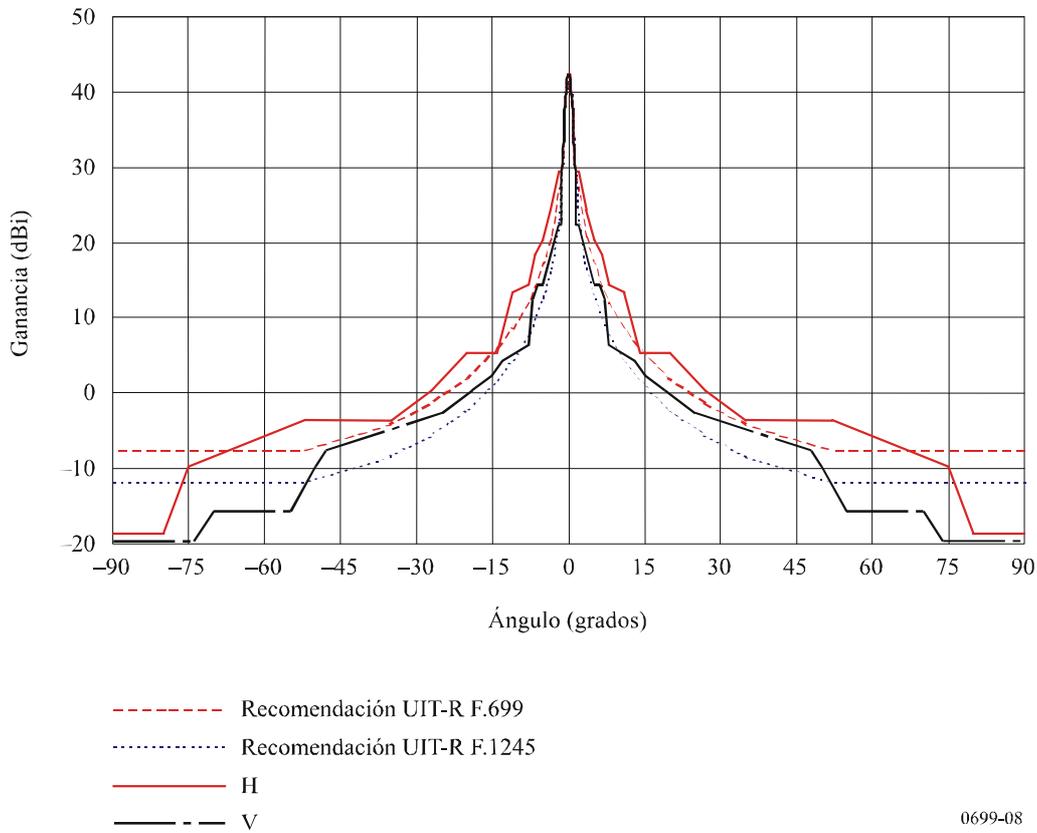
FIGURA 7  
 Antena P-P de 0,3 m de diámetro en 31 GHz ( $D/\lambda = 32$ , ganancia = 36,9 dBi)  
 (H: polarización horizontal, V: polarización vertical)



- Recomendación UIT-R F.699
- ..... Recomendación UIT-R F.1245
- H
- V

FIGURA 8

Antena P-P de 0,3 m de diámetro en 55 GHz ( $D/\lambda = 57$ , ganancia = 42,4 dBi)  
(H: polarización horizontal, V: polarización vertical)



0699-08

## Anexo 2

### Información sobre la aplicación del *recomienda 7*

#### 1 Introducción

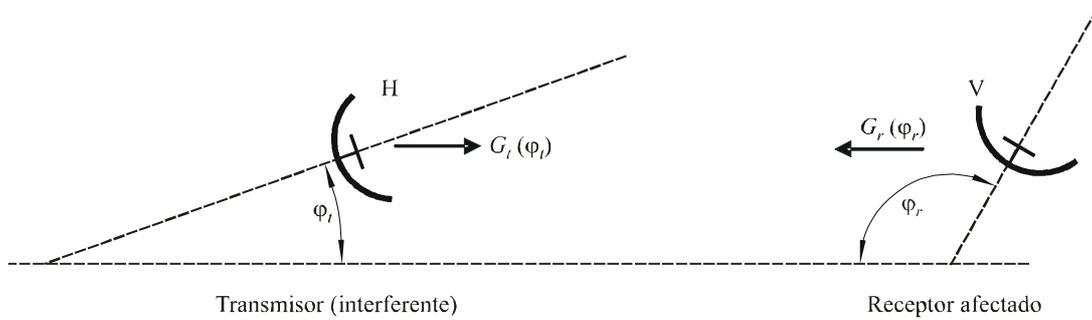
Con objeto de apoyar las designaciones utilizadas en la ecuación del *recomienda 7.1*, se proporcionan algunas cifras y ejemplos numéricos.

Puede utilizarse otra ecuación (véase el § 4) si se suministran datos de ganancia relativa de antena.

En el caso de un cálculo de ganancia mutua entre antenas copolares, se utilizará otra ecuación (véase el § 5).

2 Situación

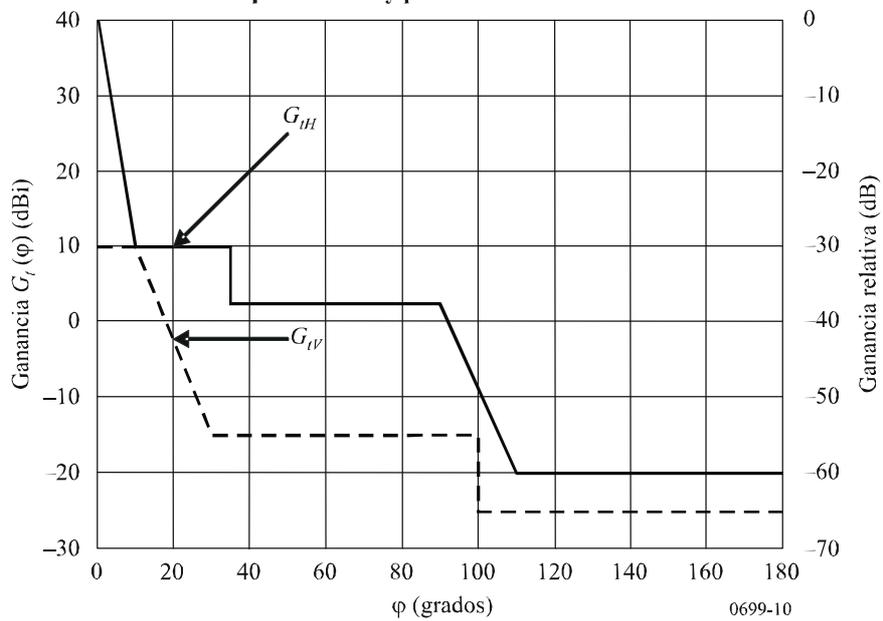
FIGURA 9  
Ejemplo genérico de situación y orientación mutua de la antena de transmisión y la antena de recepción afectada



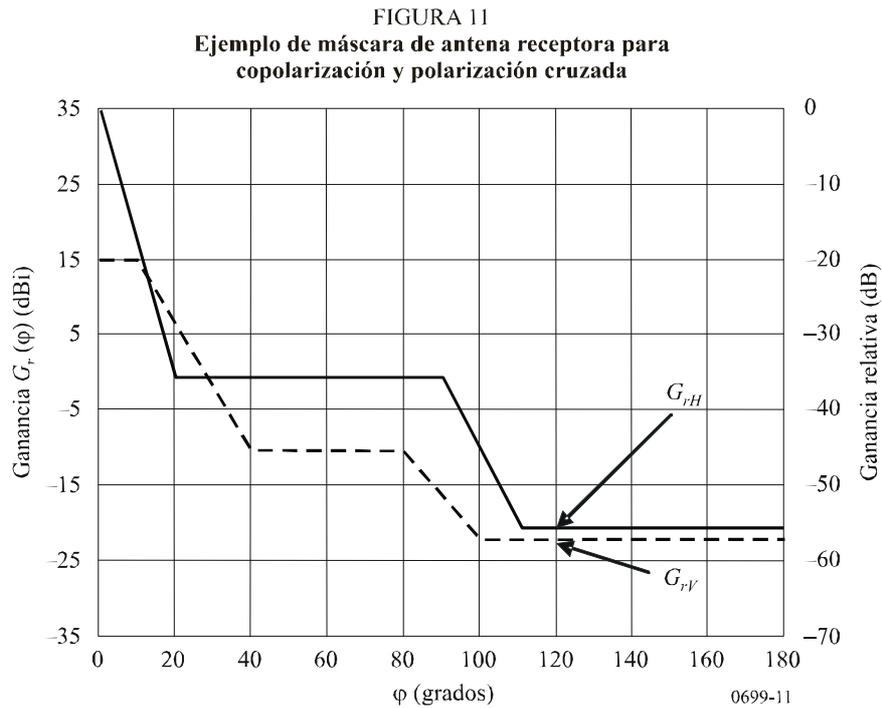
0699-09

3 Ejemplo numérico

FIGURA 10  
Ejemplo de máscara de antena transmisora para copolarización y polarización cruzada



0699-10



A continuación se facilita un ejemplo de antenas de polarización cruzada.

Los siguientes valores pueden obtenerse de las Figs. 9, 10 y 11:

$$\begin{aligned}\varphi_t &= 20^\circ \\ \varphi_r &= 120^\circ \\ G_{tH}(\varphi_t) &= 10 \text{ dBi} \\ G_{rV}(\varphi_r) &= -22 \text{ dBi} \\ G_{tV}(\varphi_t) &= -2 \text{ dBi} \\ G_{rH}(\varphi_r) &= -20 \text{ dBi}\end{aligned}$$

Aplicando estos valores en la ecuación, obtenemos el siguiente resultado:

$$G_t(20^\circ) + G_r(120^\circ) = -11,6 \text{ dBi.}$$

Por el teorema de reciprocidad, el resultado de un cálculo de ganancia mutua es el mismo si se intercambian las antenas transmisora y receptora.

#### 4 Otra ecuación para la polarización cruzada

Si se conocen los valores de  $G_{tm\acute{a}x}$ ,  $G_{rm\acute{a}x}$  y de la ganancia relativa de los lóbulos de banda lateral (como se observa en la escala lateral derecha de las Figs. 10 y 11), se aplica la ecuación (2):

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = G_{tm\acute{a}x} + G_{rm\acute{a}x} + 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} \right) \text{ dBi} \quad (2)$$

La ecuación (2),  $G_{tm\acute{a}x}$ ,  $G_{rm\acute{a}x}$  y el resultado se obtienen en dBi, pero la ganancia relativa de los lóbulos laterales se obtiene en dB.

## 5 Otra ecuación para la copolarización

Si ambas antenas son copolares, los valores se modificarán en consecuencia y se obtendrá la ecuación (3):

$$G_t(\varphi_t) + G_r(\varphi_r) = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{G_{tH}(\varphi_t) + G_{rH}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{tV}(\varphi_t) + G_{rV}(\varphi_r)}{10}} \right) \quad \text{dBi} \quad (3)$$

En la copolarización, el ejemplo numérico proporciona una ganancia común de  $-9,8$  dBi con las mismas antenas utilizadas supra (Figs. 10 y 11)

---