

## **Recomendación UIT-R M.1851-2 (12/2023)**

Serie M: Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos

**Modelos matemáticos de diagramas de antena de sistemas de radar del servicio de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico para uso en los análisis de interferencia**

## Prólogo

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

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

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

### Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica  
Ginebra, 2024

© UIT 2024

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

## RECOMENDACIÓN UIT-R M.1851-2

**Modelos matemáticos de diagramas de antena de sistemas de radar del servicio de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico para uso en los análisis de interferencia**

(2009-2018-2023)

**Cometido**

Esta Recomendación describe los modelos matemáticos de diagramas de antena de los sistemas de radar de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico que deben utilizarse para los análisis de interferencia procedente de una sola fuente y de interferencia combinada. En función de la anchura de haz a 3 dB de la antena y el nivel de cresta del primer lóbulo lateral puede seleccionarse el conjunto adecuado de ecuaciones para los diagramas de acimut y elevación. Se definen los diagramas de cresta, para una sola fuente de interferencia, y los diagramas medios, para múltiples fuentes de interferencia.

**Palabras clave**

Campo de iluminación, diagramas de antena, distribución de corriente, ecuaciones de diagramas de máscara de cresta y media

**Abreviaturas/Glosario**

- 3-D Tridimensional (*three dimensional*)  
ADP Diagrama de directividad de antena (*antenna directivity pattern*)  
CSC<sup>2</sup> Cosecante cuadrado (*cosecant squared*)  
SLL Nivel de lóbulos laterales (*sidelobe level*)

**Recomendaciones UIT-R conexas**

- Recomendación UIT-R F.699 – 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 86 GHz
- Recomendación UIT-R F.1245 – Modelo matemático de diagramas de radiación media y diagramas conexos para antenas de sistemas inalámbricos fijos punto a punto para la evaluación de la interferencia en la gama de frecuencias de 1 GHz a 86 GHz
- Recomendación UIT-R M.1638 – Características y criterios de protección para estudios de compartición de los radares de radiolocalización (excepto los radares meteorológicos situados en tierra) y radionavegación aeronáutica que funcionan en las bandas de frecuencia entre 5 250 y 5 850 MHz
- Recomendación UIT-R M.1652 – Selección dinámica de frecuencias en sistemas de acceso inalámbrico, incluidas las redes radioeléctricas de área local, para proteger el servicio de radiodeterminación en la banda de 5 GHz
- Recomendación UIT-R M.1849 – Aspectos técnicos y operacionales de los radares meteorológicos en tierra

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

que es preciso establecer un modelo matemático para diagramas de antena generalizados a fin de realizar análisis de interferencia cuando no se dispone de ningún diagrama específico para los sistemas de radar del servicio de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico,

*reconociendo*

que estos modelos matemáticos pueden no ser aplicables para todos los sistemas de radiodeterminación y móviles aeronáuticos, por ejemplo, para algunos diagramas de antena de teledeterminación móvil aeronáutica,

*recomienda*

1 que, si en otras Recomendaciones UIT-R o informes figuran diagramas de antena medidos y/o ecuaciones de diagramas de antena aplicables a un radar de radiodeterminación o a sistemas móviles aeronáuticos, deben utilizarse dichas Recomendaciones en el análisis de interferencias;

2 que, en ausencia de información sobre los diagramas de antena del sistema de radar del servicio de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico correspondiente, debería utilizarse para los análisis de interferencia uno de los modelos matemáticos de antena de referencia descritos en el Anexo 1;

3 que, en el caso de las antenas con control de fase, si se dispone de información relativa a su diseño físico (geometría, número de elementos, separación entre elementos, diagrama de radiación de un solo elemento y ganancia), deben utilizarse los diagramas para modelos de antenas en fase que figuran en el Anexo 1;

4 que, en el caso de las antenas en fase, si no se dispone de información relativa a su diseño físico, deben utilizarse en el análisis de interferencias los diagramas de antena para antenas de apertura rectangular o antenas transmisoras lineales que figuran en el Anexo 1;

5 que, cuando se disponga de ellos, se prefieran los diagramas de antena medidos de las antenas representativas de la antena del sistema de radar de radiodeterminación o del sistema móvil aeronáutico correspondiente para realizar análisis de interferencia.

## Anexo 1

### Modelos matemáticos de diagramas de antena de sistemas de radar del servicio de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico para uso en los análisis de interferencia

#### ÍNDICE

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 4
2	Fórmulas matemáticas ..... 5
2.1	Antenas de apertura rectangular ..... 5
2.1.1	Antecedentes ..... 5
2.1.2	Ecuaciones de antena teóricas ..... 6
2.1.3	Procedimiento para determinar la máscara ..... 12
2.2	Antena con diagrama de elevación de cosecante cuadrado ..... 14
2.3	Máscaras y gráficos teóricos para distintos diagramas de radiación de antena.. 19
2.4	Selección del diagrama de antena para modelos sin pedales..... 22
3	Comparación del diagrama de antena..... 23
4	Antena parabólica circular de apertura cónica ..... 23
4.1	Utilización de la antena parabólica y descripción del diagrama..... 23
4.2	Procedimiento para calcular la envolvente del lóbulo lateral ..... 26
4.3	Selección del diagrama de antena para los modelos sin pedestal ..... 30
5	Diagramas tridimensionales (3-D) aproximados ..... 30
6	Diagramas de antenas compuestas de elementos enfasados..... 33
6.1	Sistema de antenas lineales enfasado ..... 33
6.2	Sistema de antenas planas enfasado ..... 36
7	Eficacia de la antena ..... 38
8	Ejemplos de diagramas medidos ..... 39

## 1 Introducción

Es necesario elaborar un modelo matemático generalizado para los diagramas de antena de los sistemas de radar de radiodeterminación y del servicio móvil aeronáutico cuando estos diagramas no aparecen definidos en las Recomendaciones UIT-R aplicables a los sistemas de radar del servicio de radiodeterminación y móvil aeronáutico sometido a análisis. Podrían utilizarse modelos de diagrama de antena generalizados en análisis relativos a la interferencia procedente de una sola fuente y de múltiples fuentes, tales como otros radares y sistemas de comunicación.

Este Anexo describe los diagramas de antena propuestos que deben utilizarse. Conociendo la anchura de haz y el nivel de cresta del primer lóbulo lateral, puede seleccionarse el conjunto adecuado de ecuaciones para los diagramas de acimut y elevación.

En el Cuadro 1 figura el resultado de las gamas de parámetros de antena típicos, obtenido de las Recomendaciones del UIT-R.

CUADRO 1

### Límites típicos de los parámetros de antena de radar de determinación

Parámetro de antena	Unidades	Descripción	Mínimo valor	Máximo valor
Frecuencias de transmisión y recepción	MHz		420	33 400
Tipo de polarización de antena		Horizontal, vertical, circular		
Tipo de antena		Sistema de elementos yagi, reflector parabólico, sistema controlado por fase		
Tipo de haz, el más común		Abanico, estrecho, cosecante cuadrado		
Ganancia de transmisión y recepción	dBi		25,6	54
Anchura de haz en elevación (−3dB)	grados	Haz estrecho	0,25	5,75
		Cosecante cuadrado (CSC <sup>2</sup> ) (ecuaciones (22), (23) y Cuadros 7, 8)	3,6 (θ <sub>3</sub> ) 20 (θ <sub>máx</sub> )	3,6 (θ <sub>3</sub> ) 44 (θ <sub>máx</sub> )
Anchura de haz en acimut (−3dB)	grados	Haz estrecho	0,4	5,75
Límite del ángulo de exploración en elevación	grados		−60	+90
Límite del ángulo de exploración en acimut	grados		30 sector	360
Nivel del primer lóbulo lateral por debajo del nivel de cresta del lóbulo principal	dB		−35	−15,6

El Cuadro 1 se utilizó como orientación para desarrollar los tipos y diagramas de antena propuestos.

## 2 Fórmulas matemáticas

### 2.1 Antenas de apertura rectangular

#### 2.1.1 Antecedentes

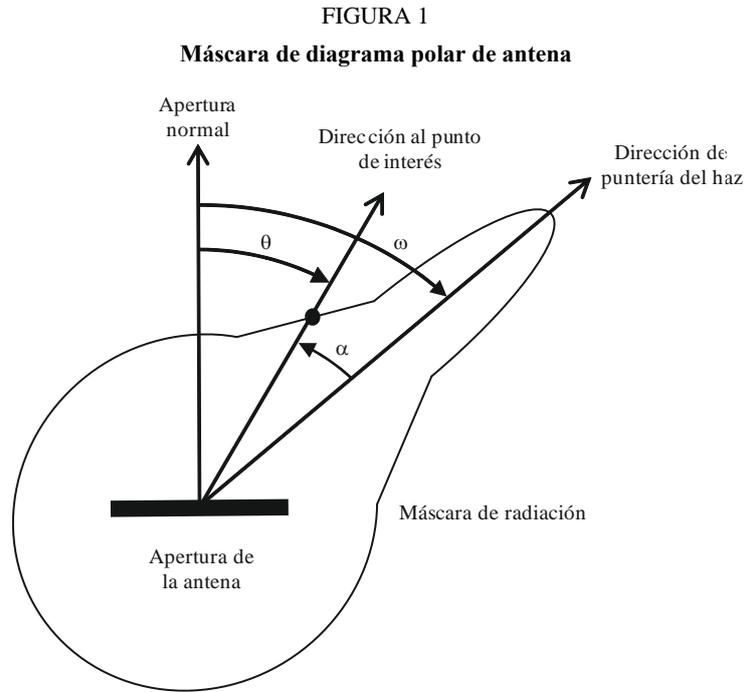
Si se dispone de información acerca de la forma de distribución de corriente o el campo de iluminación en la apertura de la antena, puede utilizarse un modelo de diagrama de antena más preciso.

Para simplificar el análisis, la distribución de la corriente de antena se considera una función de las coordenadas de elevación o acimut. El diagrama de directividad,  $F(\mu)$ , de una distribución concreta se determina a partir de la transformada finita de Fourier como sigue:

$$F(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} f(x) \cdot e^{j\mu x} dx \quad (1)$$

siendo:

- $f(x)$ : forma relativa de la distribución de campo, véase los Cuadros 2 y 4 y la Fig. 1
- $\mu$ : valor indicado en el siguiente Cuadro =  $\pi \left( \frac{l}{\lambda} \right) \text{sen}(\alpha)$
- $l$ : longitud total de la apertura
- $\lambda$ : longitud de onda
- $\omega$ : ángulo (exploración) de puntería en elevación o acimut del haz con respecto a la apertura normal
- $\theta$ : ángulo de dirección al punto de interés con respecto a la apertura normal
- $\alpha$ : ángulo de dirección al punto de interés con respecto a la dirección del ángulo de puntería ( $\alpha = \theta - \omega$ )
- $x$ : distancia normalizada a lo largo de la apertura  $-1 \leq x \leq 1$
- $j$ : notación de número complejo.



M.1851- 01

Los diagramas de antena teóricos propuestos para antenas con distribución de campo de fase uniforme figuran en los Cuadros 2 y 4.

Los parámetros y fórmulas para determinar los diagramas de directividad de antena (DDA) indicados en los Cuadros 2 y 4 (y posteriormente en los Cuadros y las Figuras) tomando en cuenta que la amplitud de campo en el borde de la apertura de la antena generalmente no es igual a cero.

Se recomiendan máscaras de cresta o media para estudios de compartición y compatibilidad con sistemas de radar y móviles aeronáuticos con una o varias fuentes de interferencia, respectivamente. La máscara parte del punto crítico inferido a partir del diagrama teórico y disminuye sobre los lóbulos laterales hasta reducirse a una máscara de nivel mínimo, a fin de representar los lóbulos laterales lejanos y los lóbulos posteriores de la antena.

Si se dispone de diagramas de antena de radar reales, deben digitalizarse y utilizarse.

### 2.1.2 Ecuaciones de antena teóricas

Los Cuadros 2 y 3 contienen ecuaciones de diagramas de directividad normalizados y los parámetros conexos aplicables a diferentes formas de coseno de campo en la apertura de la antena, teniendo en cuenta el nivel de un pedestal C. El pedestal es un nivel en los bordes de la antena cuando se normaliza la distribución de amplitud. Como  $\omega$  se denota el ángulo de exploración.  $\theta_3$  es la anchura de haz a potencia mitad de la antena a 3 dB (grados). El nivel de los lóbulos laterales (SLL) indica el nivel del primer lóbulo lateral por debajo del haz principal, en dB. Las gamas de niveles de lóbulos laterales para cada distribución de amplitud ( $n = 0, 1$  ó  $2$ ) se muestran en la columna «Gama de niveles máximos de lóbulos laterales por debajo de la cresta normalizada del lóbulo principal (dB)» del Cuadro 2 para el modelo que utiliza pedestal. En el Cuadro 4 se indican los diagramas de directividad normalizados y los parámetros asociados para el caso sin pedestal.

La diferencia entre estos dos modelos es que el primero (Cuadros 2 y 3) puede dar cualquier nivel de lóbulo lateral en la gama de  $-13,2$  dB a  $-40$  dB, mientras que el segundo da valores discretos de niveles de lóbulo lateral  $-13,2$  dB,  $-23$  dB,  $-32$  dB,  $-40$  dB y  $-47$  dB. Además, el segundo modelo da una envolvente descendente de los lóbulos laterales mucho más pronunciada que el primer modelo.

CUADRO 2

Parámetros teóricos de directividad de antena para antenas de apertura rectangular

Forma relativa de la distribución de campo $f(x)$ con pedestal $C$ donde $-1 \leq x \leq 1$	Diagrama de directividad $F(\mu)$ ( $\mu$ en radianes)	Coeficiente $K$ (°)	Apertura del haz a media potencia $\theta_3$ (grados)	$(\mu$ en radianes) como función de $\theta_3$ (en grados)	Gama del primer lóbulo lateral por debajo de la cresta del lóbulo principal (dB)	Ecuación N.º
Uniforme	$\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$	50,8	$K \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-13,2	(2)
$C + (1 - C) \cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ ( $C$ de la ecuación (5))	$\frac{C \frac{\text{sen} \mu}{\mu} + (1 - C) \frac{2}{\pi} \frac{\cos \mu}{1 - \left(\frac{2\mu}{\pi}\right)^2}}{C + (1 - C) \frac{2}{\pi}}$	Ecuación (6)	$K \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-22,7 a -13,2	(3)
$C + (1 - C) \cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$ ( $C$ de la ecuación (7))	$\frac{C \frac{\text{sen} \mu}{\mu} + \frac{(1 - C)}{2\mu} \frac{\text{sen} \mu}{1 - \left(\frac{\mu}{\pi}\right)^2}}{C + \frac{(1 - C)}{2}}$	Ecuación (8)	$K \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot K \cdot \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-40 a -22,7	(4)

CUADRO 3

Tabla de selección de los parámetros de la antena de apertura rectangular (coseno cónico)

Distribución del coseno elevada a la potencia $n$	Rango del nivel máximo del lóbulo lateral por debajo de la cresta normalizada del lóbulo principal (dB)	Pedestal C	Factor de ancho de banda K (°)
0	-13,2	-	50,8
1	-22,7 a -13,2	$C = 0,0007(SLL + 22,7)^3 - 0,006(SLL + 22,7)^2 + 0,09(SLL + 22,7) + 0,1$ (5)	$K = -0,0117(SLL + 22,7)^3 + 0,217(SLL + 22,7)^2 - 2,46(SLL + 22,7) + 64,2$ (6)
2	-40 ... -22,7	$C = 0,0056(SLL + 40)^3 - 0,04(SLL + 40)^2 + 1,1(SLL + 40) + 9,9)/100$ (7)	$K = -0,0013(SLL + 40)^3 + 0,018(SLL + 40)^2 - 0,79(SLL + 40) + 73$ (8)

CUADRO 4

Parámetros teóricos de directividad de antena para antena de apertura rectangular o fuente lineal sin pedestal

Forma relativa de la distribución de campo $f(x)$ con pedestal C donde $-1 \leq x \leq 1$	Diagrama de directividad $F(\mu)$ ( $\mu$ en radianes)	Apertura del haz a media potencia $\theta_3$ (grados)	( $\mu$ en radianes) como función de $\theta^3$ (en grados)	Gama del primer lóbulo lateral por debajo de la cresta del lóbulo principal (dB)	Ecuación N.º
Uniforme	$\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$	$50,8 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \times 50,8 \times \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-13,2	(9)
$\cos\left(\frac{\pi x}{2}\right)$	$\frac{\pi}{2} \left[ \frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$68,8 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \times 68,8 \times \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-23	(10)
$\cos^2\left(\frac{\pi x}{2}\right)$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[ \frac{\text{sen}(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]$	$83,2 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \times 83,2 \times \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-32	(11)
$\text{COS}^3(\pi^*x/2)$	$\frac{3\pi \cos(\mu)}{8} \left[ \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \times 95 \times \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-40	(12)
$\text{COS}^4(\pi^*x/2)$	$\frac{3\pi^4 \text{sen}(\mu)}{2\mu(\mu^2 - \pi^2)(\mu^2 - 4\pi^2)}$	$106 \left(\frac{\lambda}{l}\right)$	$\frac{\pi \times 106 \times \text{sen}(\theta - \omega)}{\theta_3}$	-47	(13)

El diagrama tridimensional (3-D) puede obtenerse de la siguiente manera, en unidades lineales:

$$G_{3D} = G_1(\theta_1) \times G_2(\theta_2) \tag{14}$$

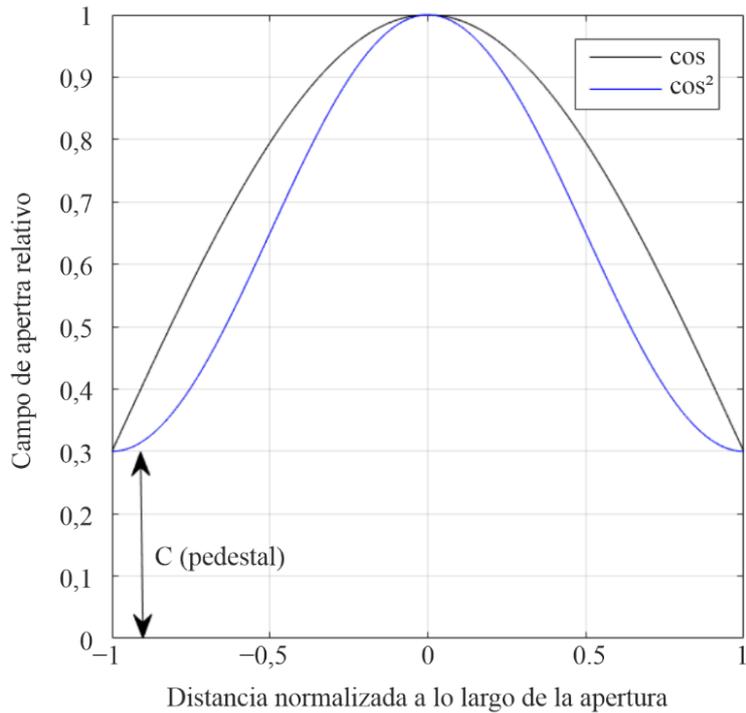
o, en dB:

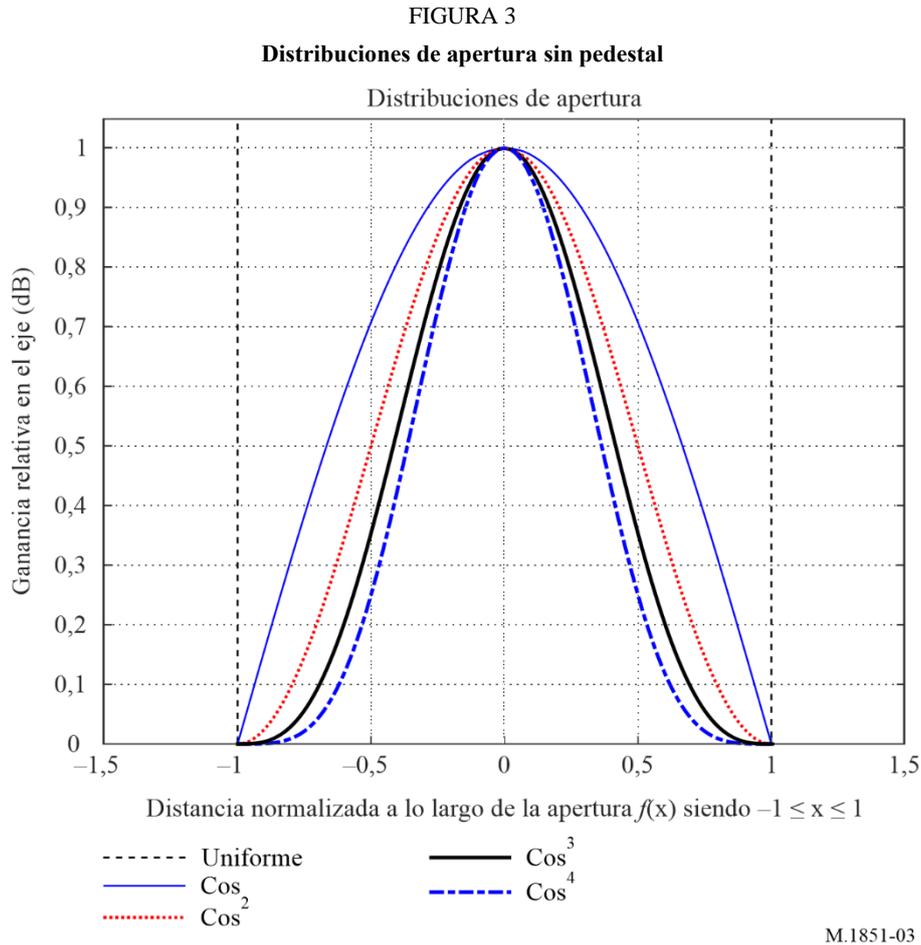
$$G_{3D,dB} = G_{1,dB}(\theta_1) + G_{2,dB}(\theta_2) \tag{15}$$

donde  $G_{3D}$ ,  $G_1$ ,  $G_2$  están normalizados,  $G_1$  y  $G_2$  son diagramas de radiación de antenna en los planos E y H,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son ángulos de elevación en estos planos.

Las formas relativas de las diferentes funciones de distribución de campo coseno  $f(x)$  con pedestal, como se define en el Cuadro 2, y sin pedestal, como se define en el Cuadro 4, se representan esquemáticamente en las Figs. 2 y 3, respectivamente.

FIGURA 2  
Distribuciones de apertura con pedestal



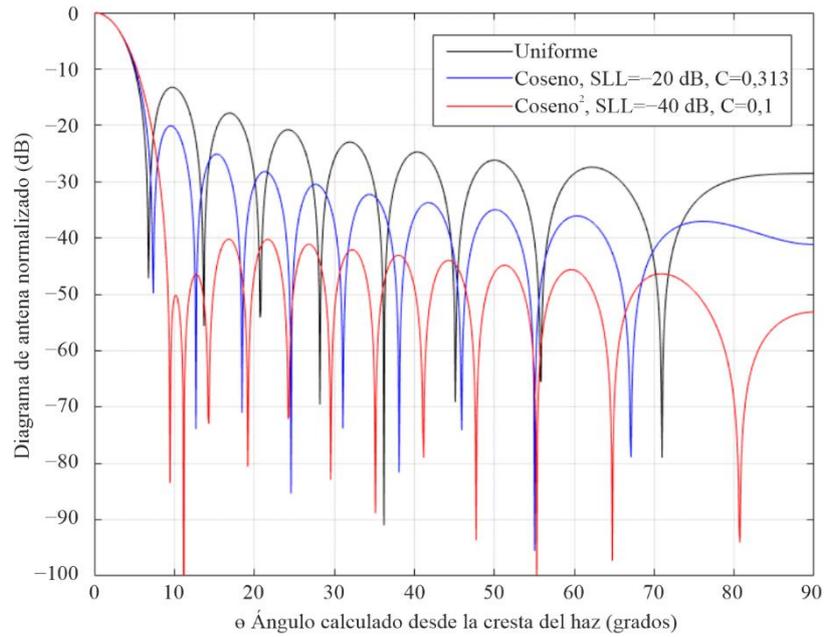


Conociendo la apertura del haz a media potencia,  $\theta_3$ , puede redefinirse el valor de  $\mu$  en función de la apertura del haz de la antena a media potencia, sustituyendo la cantidad  $\left(\frac{l}{\lambda}\right)$  en  $\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda}\right) \text{sen}(\theta)$  por una constante (factor de anchura de haz) que depende de la forma relativa de la distribución de campo, dividida por la apertura del haz a media potencia,  $\theta_3$ , como indica el Cuadro 2. En los Cuadros 2 y 4 se dan aproximaciones para el factor de apertura; estos valores pueden obtenerse fijando la ecuación para  $F(\mu)$  igual a  $-3$  dB, y resolviéndola para el ángulo  $\theta$ .

La Fig. 4 muestra diversos diagramas de antena de apertura rectangular para funciones de distribución de campo uniforme, coseno (COS) y coseno cuadrado ( $\text{COS}^2$ ) con pedestal. La Fig. 5 muestra diversos rectángulos diagramas de antena de apertura rectangular para las funciones de distribución sin pedestal de campo uniforme, en coseno (COS), en coseno cuadrado ( $\text{COS}^2$ ), en coseno cubo ( $\text{COS}^3$ ) y en coseno elevado a la cuarta potencia ( $\text{COS}^4$ ). Habida cuenta de que los diagramas son simétricos desde un punto de vista matemático, el gráfico ilustra sólo una parte. A efectos comparativos, todos los diagramas presentan la misma anchura de haz a 3 dB de 6,0 grados, lo que entraña ratios distintos para  $\lambda/l$ .

FIGURA 4

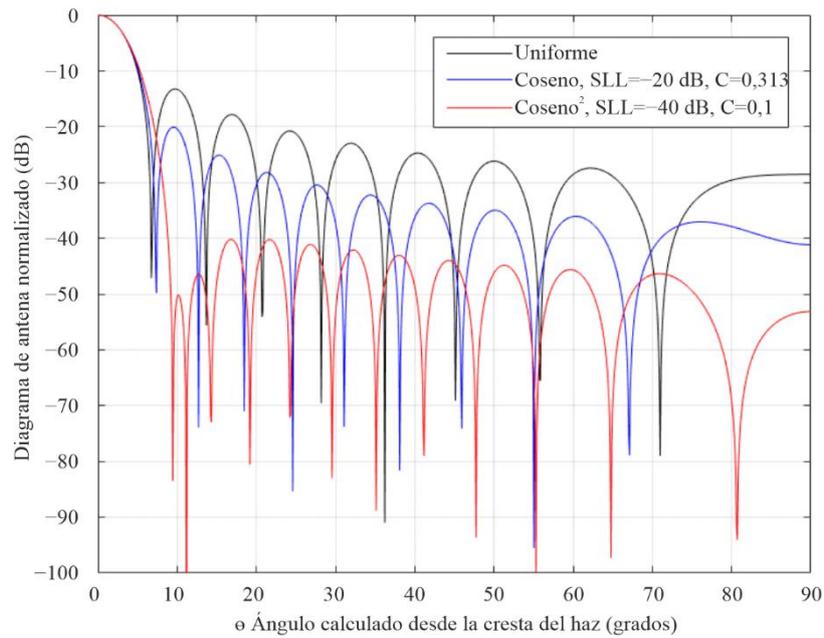
Comparación de diagramas de antena para diversas distribuciones de apertura rectangular con pedestal con una anchura de haz a 3 dB de 6,0 grados (el diagrama es simétrico)



M.1851-04

FIGURA 5

Comparación de diagramas de antena para diversas distribuciones de apertura rectangular sin pedestal con una anchura de haz a 3 dB de 6,0 grados (el diagrama es simétrico)



M.1851-05

### 2.1.3 Procedimiento para determinar la máscara

Utilizando las Figs. 4 y 5 *supra* se obtienen las ecuaciones de la máscara mediante una curva que se ajuste a los niveles de cresta del lóbulo lateral de la antena. Se ha observado que, comparando la integral de los diagramas de máscara teórico y propuesto, la diferencia entre la potencia de cresta y media en un corte de plano principal es aproximadamente 4 dB. Se aplican las siguientes definiciones:

- se convierten las ecuaciones (2) a (13) en dB utilizando  $20 \times \log_{10}(|\text{Diagrama Normalizado}|)$ ;
- se normalizan las ganancias de los diagramas de antena para el método sin pedestal del Cuadro 4. La distribución de campo uniforme no exige normalización, para el primer coseno se resta  $-3,92$  dB, para el primer coseno cuadrado se resta  $-6,02$  dB, para el primer coseno cubo se resta  $-7,44$  dB y para el primer coseno elevado a la cuarta potencia se resta  $-8,52$  dB (véase el Cuadro 6); el método del Cuadro 2 no requiere normalización;
- para dibujar la máscara, se utiliza el diagrama de directividad teórica del Cuadro 2 para los modelos con pedestal y el Cuadro 4 para los modelos sin pedestal, como se indica en los dos pasos anteriores, hasta el punto crítico para el diagrama de antena de cresta o medio, según el caso. Pasado el punto crítico, se aplica el diagrama de máscara indicado en el Cuadro 5 para los modelos con pedestal y el Cuadro 6 para los modelos sin pedestal;
- la máscara del diagrama de cresta es el diagrama de antena que se encuentra por encima de las crestas de los lóbulos laterales. Se utiliza para el caso de una sola fuente de interferencia;
- la máscara del diagrama medio es el diagrama de antena que aproxima el valor integral del diagrama teórico. Se utiliza para múltiples fuentes de interferencia combinada;
- el punto crítico de la máscara del diagrama de cresta es el punto en magnitud del diagrama (dB) por debajo de la máxima ganancia donde la forma del diagrama se separa del diagrama teórico ajustándose al diagrama de máscara de cresta, como indicala Fig. 6;
- el punto crítico de la máscara del diagrama medio es el punto en magnitud del diagrama (dB) por debajo de la máxima ganancia donde la forma del diagrama se separa del diagrama teórico ajustándose al diagrama de máscara medio, como indica la Fig. 6;
- $\theta_3$  es la anchura de haz de la antena a 3 dB (grados);
- $\theta$  es el ángulo en los cortes de plano principal en elevación (vertical) o acimut (horizontal) (grados);
- la máscara media es la máscara de cresta menos 4 dB. Obsérvese que los puntos críticos del diagrama de cresta son distintos que los puntos críticos de los diagramas medios;
- el diagrama tridimensional (3-D) puede obtenerse como  $G_{3D} = G_1(\theta_1) + G_2(\theta_2)$ , donde  $G_{3D}$ ,  $G_1$ ,  $G_2$  están normalizados y en decibelios,  $G_1$  y  $G_2$  son diagramas de radiación de antena en los paneles E y H,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son ángulos en estos planos.

Los Cuadros 5 y 6 indican las ecuaciones utilizadas en los cálculos.

CUADRO 5

**Ecuación (16): Ecuaciones del diagrama de máscara teórico normalizado de cresta y media para la conicidad de coseno con pedestal**

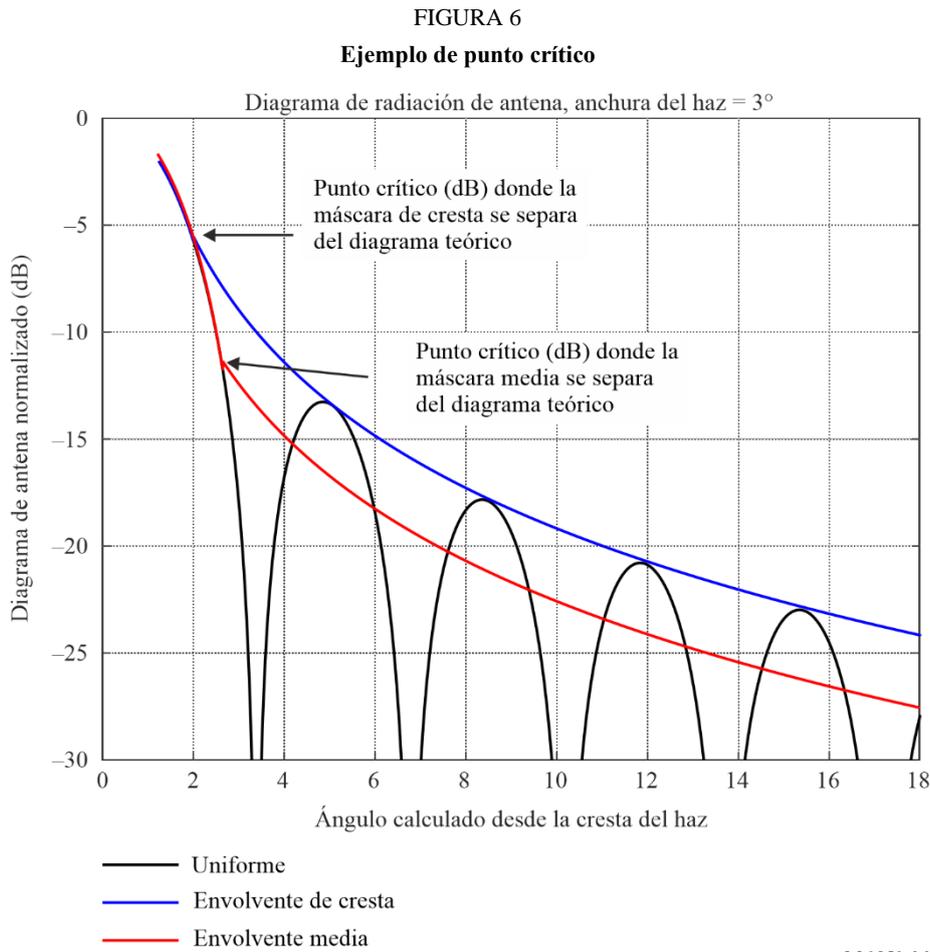
Distribución de campo	Ecuación de la máscara más allá del punto crítico del diagrama donde la máscara se separa del diagrama teórico (dB)	A	B	Nivel mínimo de máscara (dB)
Uniforme	$-A \ln \frac{B \theta }{\theta_3}$	8,584	2,876	-30
COS		$-0,000473(SLL + 13,2)^5$ $- 0,008667(SLL + 13,2)^4$ $- 0,0581(SLL + 13,2)^3$ $- 0,1455(SLL + 13,2)^2$ $- 0,1342(SLL + 13,2)$ $+ 8,2489$	si $SLL \geq -22,7$ y $SLL \leq -18$ : $0,03911 SLL^3$ $+ 2,1706 SLL^2$ $+ 39,803 SLL + 246,52$ si $SLL > -18$ y $SLL < -13,2$ : $-0,461 SLL - 3,058$	-50
COS <sup>2</sup>		$0,000119 SLL^3$ $+ 0,00869 SLL^2$ $+ 0,2488 SLL + 10,37$	$\exp(-0,00027 SLL^3$ $- 0,02255 SLL^2$ $- 0,751 SLL - 6,6)$	-60

CUADRO 6

**Ecuaciones de diagramas de máscara de cresta y medio teóricas**

Distribución de campo	Normalización	Ecuación de la máscara más allá del punto crítico del diagrama donde la máscara se separa del diagrama teórico (dB)	Punto crítico del diagrama de cresta donde la máscara se separa del diagrama teórico (dB)	Punto crítico del diagrama medio donde la máscara se separa del diagrama teórico (dB)	Constante añadida al diagrama de cresta para convertirlo en máscara media (dB)	Nivel mínimo de máscara (dB)	Ecuación N.º
Uniforme	0	$-8,584 \cdot \ln \left( 2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-30	(17)
COS	-3,92	$-17,51 \cdot \ln \left( 2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50	(8)
COS <sup>2</sup>	-6,02	$-26,882 \cdot \ln \left( 1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60	(19)
COS <sup>3</sup>	-7,44	$-35,84 \cdot \ln \left( 1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70	(20)
COS <sup>4</sup>	-8,52	$-45,88 \cdot \ln \left( 1,56 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-39,4	-42,5	-2,61	-80	(21)

La función ln() es la función logarítmica natural. En la Fig. 6 se representa un ejemplo de punto crítico.



### 2.2 Antena con diagrama de elevación de cosecante cuadrado

El diagrama de cosecante cuadrado ( $CSC^2$ ) tiene una forma especial que proporciona al receptor de radar una intensidad casi constante de los ecos de retorno, independientemente de la distancia horizontal, para aeronaves que vuelan a una altitud constante. La Fig. 7 muestra un diagrama típico de las características de detección de distancia (km) de los radares.

El diagrama de directividad de potencia normalizada de cosecante cuadrado, en dB, se define por partes, como sigue para los radares terrestres:

$$G_{Suelo}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{si } \theta \in [\theta_{Nulo}; \theta_{Inicial}] \\ G_{csc^2}(\theta) & \text{si } \theta \in [\theta_{Inicial}; \theta_{Final}] \\ G_0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (22)$$

Para radares a bordo de aeronaves, el diagrama de directividad de potencia normalizada de cosecante cuadrado viene dado por:

$$G_{Aeronave}(\theta) = \begin{cases} G_{unif}(\theta) & \text{si } \theta \in [\theta_{Inicial}; \theta_{Nulo}] \\ G_{csc^2}(\theta) & \text{si } \theta \in [\theta_{Final}; \theta_{Inicial}] \\ G_0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (23)$$

siendo:

- $G_{unif}(\theta)$ : diagrama de directividad de potencia normalizado asociado con el diagrama de campo uniforme (definido en los Cuadros 7 y 8), en dB
- $G_{CSC^2}(\theta)$ : diagrama de directividad de potencia normalizado asociado con la parte cosecante cuadrado del diagrama (definida en los Cuadros 7 y 8), en dB
- $G_0$ : nivel de directividad normalizado del fondo, en dB
- $\theta_{inicial}$ : elevación (o depresión) del punto de potencia mitad en el lóbulo principal donde comienza el diagrama de cosecante cuadrado (véanse los detalles a continuación), en grados
- $\theta_{Nulo}$ : un medio de  $\frac{\text{sen}(x)}{x}$  para el haz de antenna nulo a nulo, dado por  $\frac{\theta_3}{0,88}$ , en grados. Usando el ángulo de apuntamiento del haz de la antenna, el valor de  $\theta_{Nulo}$  es  $\theta_{Incl.} - \frac{\theta_3}{0,88}$  en grados para un radar terrestre, y  $\theta_{incl.} + \frac{\theta_3}{0,88}$  para un radar aéreo. Eso define el valor mínimo del valor de campo uniforme en el nivel más bajo de la relación anterior/posterior
- $\theta_{Final}$ : ángulo máximo donde se detiene el diagrama de cosecante cuadrado
- $\theta$ : ángulo para evaluar el diagrama de antenna, en grados
- $\theta_3$ : anchura de haz de antenna a potencia mitad, en grados
- $\theta_{incl.}$ : ángulo de elevación de inclinación del haz de la antenna o ángulo de apuntamiento del haz, en grados.

Si se proporcionan los valores de distancia y altura máximas operativas, en km, para una aplicación de sistema de radar, el ángulo en el que comienza el CSC<sup>2</sup> viene dado por<sup>1</sup>:

$$\theta_{inicial} = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{\text{Altura\_Máxima}}{\text{Gama\_Máxima}} - \frac{\text{Gama\_Máxima}}{2 * \left(\frac{4}{3}\right) R_e} \right] \quad (24)$$

donde  $R_e$  es el radio de la Tierra de 6 378 km. Sin embargo, si no se proporcionan los parámetros operacionales, entonces el ángulo inicial  $\theta_{Inicial}$  CSC<sup>2</sup>, se da por las siguientes ecuaciones:

$\theta_{Inicial} = \frac{\theta_3}{2} + \theta_{Incl.}$  para los radares terrestres y  $\theta_{Inicial} = \frac{-\theta_3}{2} + \theta_{Incl.}$  para radares a bordo de aeronaves.

El diagrama de cosecante se aplica de conformidad con los Cuadro 7 y 8.

---

<sup>1</sup> Véase Barton, David K., *Radar Equations for Modern Radar*, (Ecuaciones de radar para radares modernos), Capítulo 2, Artech House Radar Library, 2013.

CUADRO 7

**Ecuaciones normalizadas del diagrama de antena de cosecante cuadrado  
para radares terrestres**

Ecuación de cosecante cuadrado	Comentarios	Ecuación N.º
Nivel mínimo de cosecante $G_0$ (ejemplo = -55 dB)	Para ángulos inferiores a $\theta_{Nulo}$ o superiores a $\theta_{Final}$ utilizar una relación anterior/posterior de -55 dB Obsérvese que $\theta_{Nulo}$ es $\theta_{Incl.} - \frac{\theta_3}{0,88}$	(25)
$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{sen}(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta - \theta_{Incl.})) / \theta_3$	Se utiliza $\frac{\text{sen}(x)}{x}$ desde la mitad inferior de la anchura de haz nula a nula hasta el inicio del diagrama CSC <sup>2</sup> en $\theta_3$ ó $\theta_{Inicial}$ la que se proporcione	(26)
$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Inicial})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{sen} \left( \frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_{Inicial} - \theta_{Incl.})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_{Inicial} - \theta_{Incl.})}{\theta_3}} \right)^\circ$	<p>Iniciar el diagrama CSC<sup>2</sup> hasta el ángulo CSC<sup>2</sup> máximo</p> <p>La ganancia en <math>\theta_{Inicial}</math> es la ganancia del patrón <math>\frac{\text{sen}(x)}{x} \theta_{Inicial}</math></p> <p>La ganancia del diagrama es 3 dB inferior a la ganancia de cresta de la antena en <math>\theta_{Inicial}</math></p>	(27)

CUADRO 8

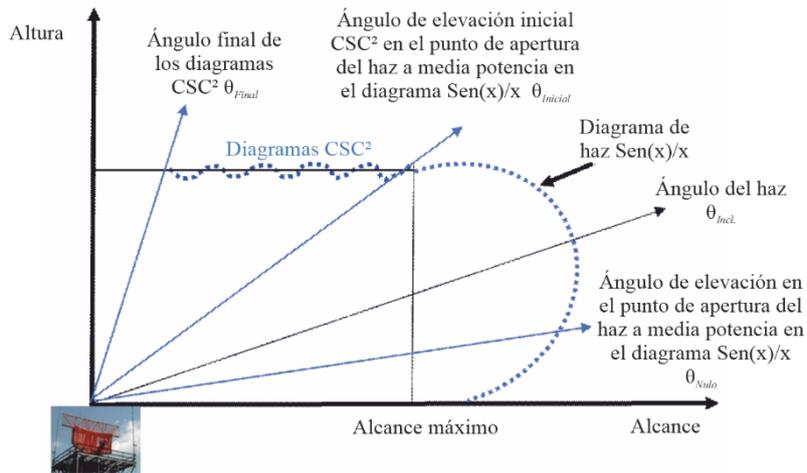
**Ecuaciones normalizadas del diagrama de antena de cosecante cuadrado  
para radares a bordo de aeronaves**

Ecuación de cosecante cuadrado	Comentarios	Ecuación N.º
Nivel mínimo de cosecante $G_0$ (ejemplo = -55 dB)	Para ángulos inferiores a $\theta_{Nulo}$ o superiores a $\theta_{Final}$ utilizar una relación anterior/posterior de -55 dB Obsérvese que $\theta_{Nulo}$ es $\theta_{Incl.} - \frac{\theta_3}{0,88}$	(28)
$G_{unif}(\theta) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{sen}(\mu)}{\mu} \right)$ $\mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta - \theta_{Incl.})) / \theta_3$	Se utiliza $\frac{\text{sen}(x)}{x}$ desde la mitad inferior de la anchura de haz nula a nula hasta el inicio del diagrama CSC <sup>2</sup> en $\theta_3$ ó $\theta_{Inicial}$ la que se proporcione	(29)
$G_{csc^2}(\theta)$ $= 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{CSC(\theta)}{CSC(\theta_{Inicial})} \right)$ $+ 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{sen} \left( \frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_{Inicial} - \theta_{Incl.})}{\theta_3} \right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_{Inicial} - \theta_{Incl.})}{\theta_3}} \right)^\circ$	<p>Iniciar el diagrama CSC<sup>2</sup> hasta el ángulo CSC<sup>2</sup> máximo</p> <p>La ganancia en <math>\theta_{Inicial}</math> es la ganancia del patrón <math>\frac{\text{sen}(x)}{x} \theta_{Inicial}</math></p> <p>La ganancia del diagrama es 3 dB inferior a la ganancia de cresta de la antena en <math>\theta_{Inicial}</math></p>	(30)

Las Figuras que aparecen a continuación representan gráficamente los diagramas.

FIGURA 7

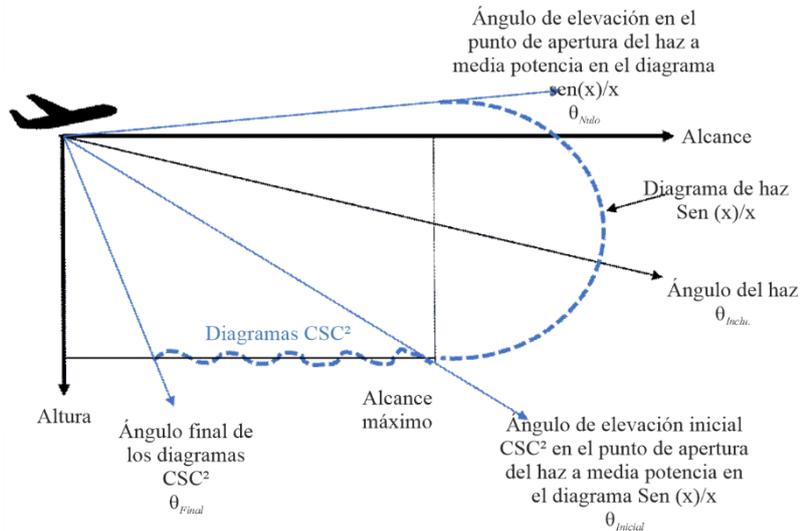
Cobertura del haz en cosecante cuadrado para radar de búsqueda



M.1851-07

FIGURA 8

Cobertura de haz cosecante cuadrado para radares a bordo de aeronaves

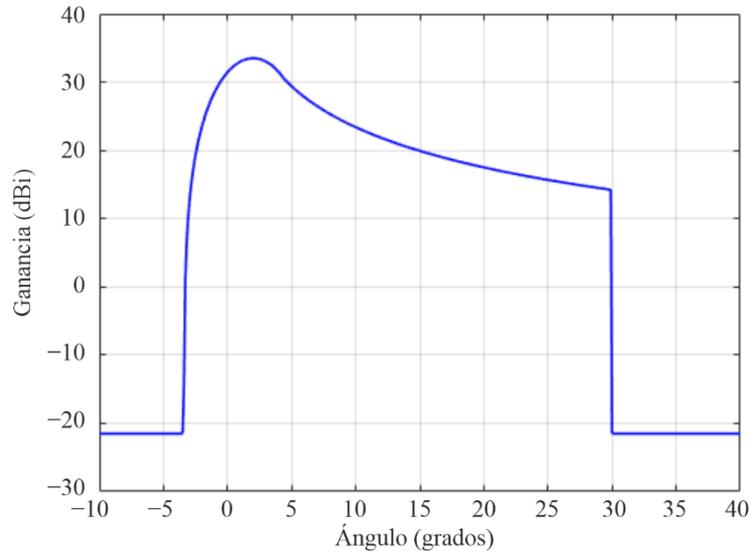


M.1851-08

Un ejemplo que utiliza el procedimiento anterior proporciona un diagrama de antena para los parámetros del radar C (de la Recomendación UIT-R M.1462-2; la Figura propiamente dicha no aparece en la Recomendación M.1462-2) y se muestra a continuación.

FIGURA 9

**Ejemplo de radar terrestre – Directividad teórica de la antena en cosecante cuadrado.**  
**Ganancia = 33,5 dBi,  $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$ ,  $\theta_{Inicial} = 4,4^\circ$ ,  $\theta_{Final} = 30,0^\circ$ ,  $\theta_{Nulo} = -3,5^\circ$ ,  $\theta_{Incl.} = 2,0^\circ$**

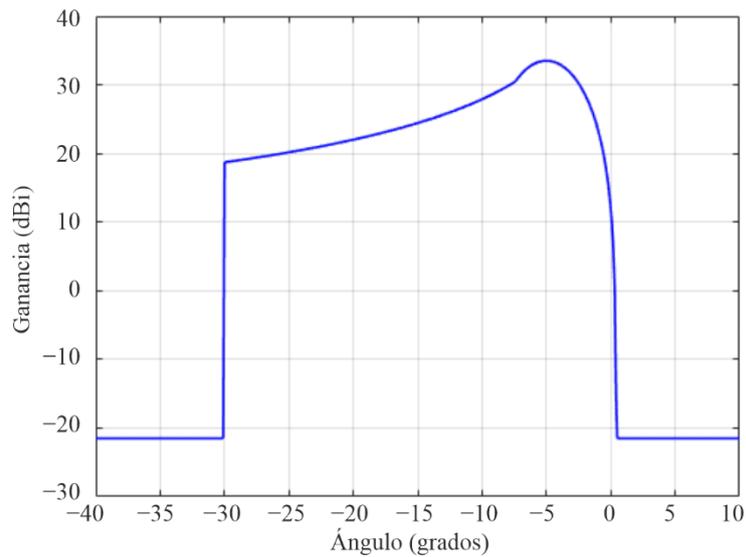


M.1851-09

Para radares a bordo de aeronaves, a continuación se muestra el diagrama de antena de elevación  $\text{CSC}^2$  invertido.

FIGURA 10

**Ejemplo de radar a bordo de aeronaves – Directividad teórica de la antena en cosecante cuadrado.**  
**Ganancia = 33,5 dBi,  $\theta_{3dB} = 4,8^\circ$ ,  $\theta_{Inicial} = -7,4^\circ$ ,  $\theta_{Final} = -30,0^\circ$ ,  $\theta_{Nulo} = 0,5^\circ$ ,  $\theta_{Incl.} = -5,0^\circ$**



M.1851-10

2.3 Máscaras y gráficos teóricos para distintos diagramas de radiación de antena

FIGURA 11

Envolvente normalizada, de cresta y media de la antena para una distribución de campo uniforme

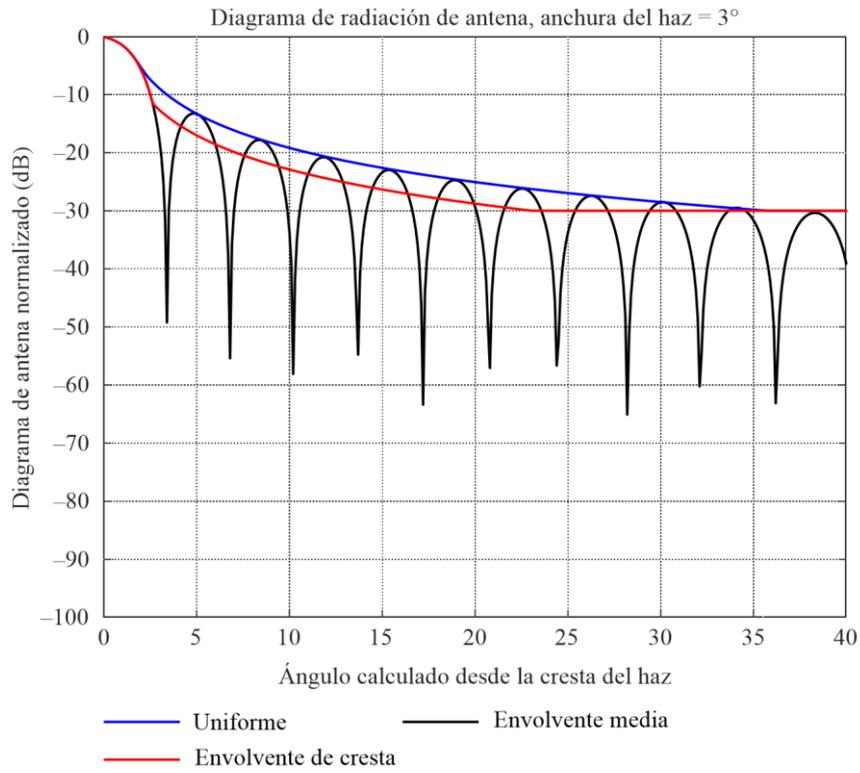
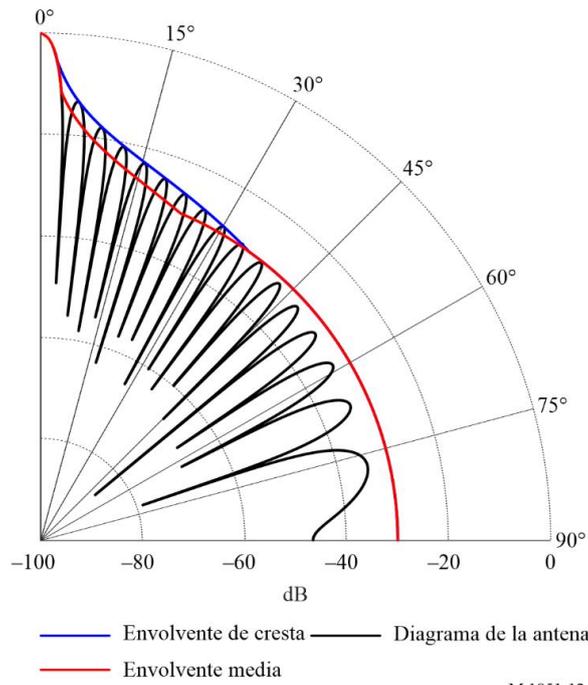


FIGURA 12

**Ejemplo normalizado de diagrama de antena de trazado polar, grados de cresta y envolvente media para una distribución de campo uniforme**

Diagrama de radiación de antena, anchura del haz = 3°

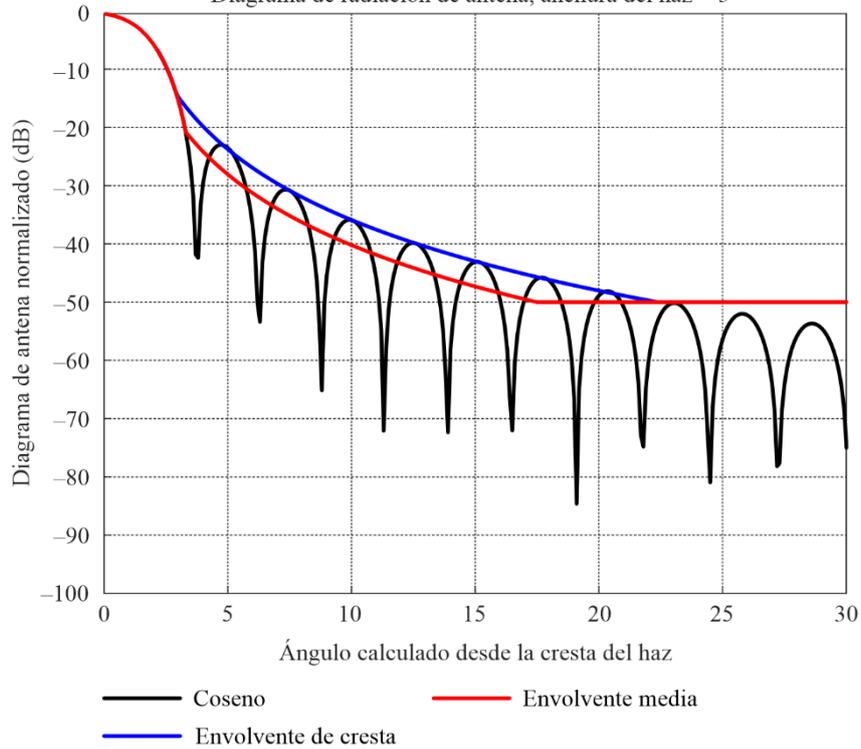


M.1851-12

FIGURA 13

**Diagrama de antena con envoltente de cresta y media para una distribución de campo en coseno**

Diagrama de radiación de antena, anchura del haz = 3°



M.1851-13

FIGURA 14

Diagrama normalizado de antena, grados, envolvente de cresta y media para una distribución en coseno cuadrado

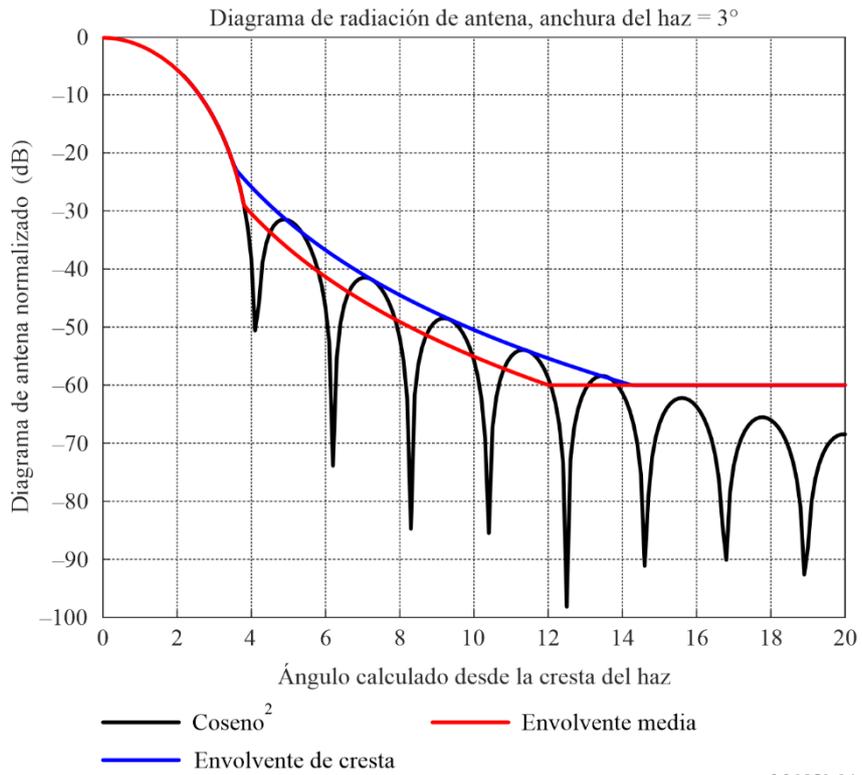


FIGURA 15

Diagrama normalizado de antena, grados, envolvente de cresta y media para una distribución en coseno cubo

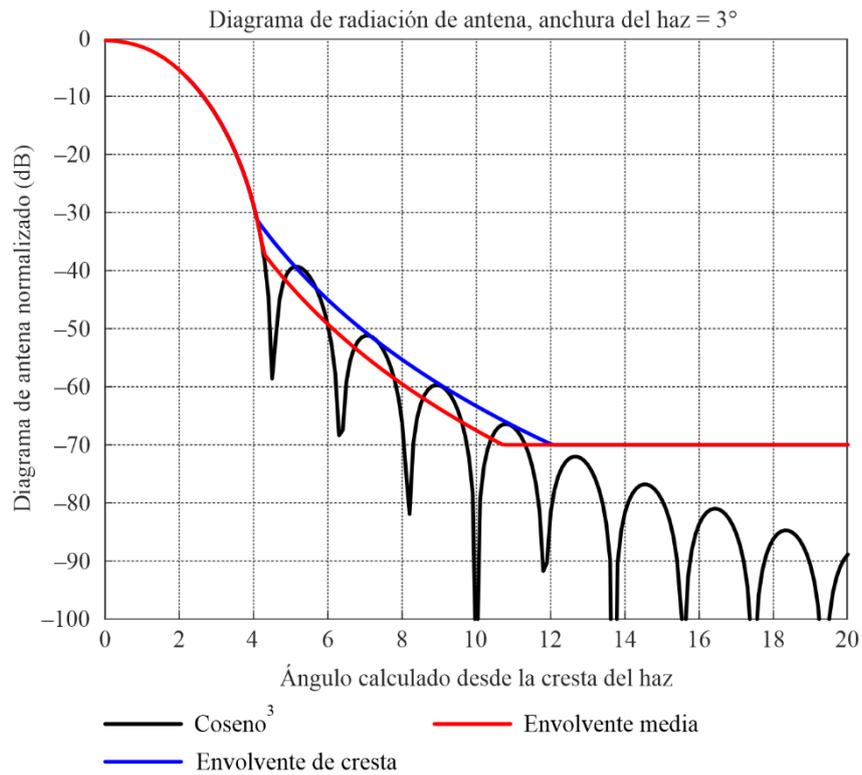
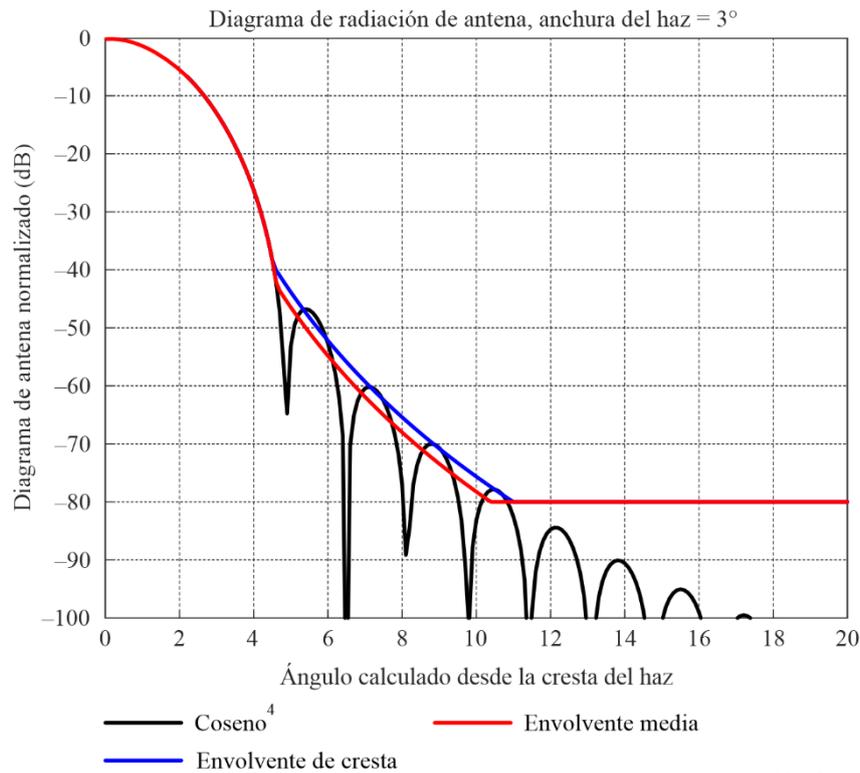


FIGURA 16

Diagrama normalizado de antena, grados, con envolvente de cresta y media para una distribución de potencia en coseno elevado a la cuarta potencia



M.1851-16

## 2.4 Selección del diagrama de antena para modelos sin pedales

Las sugerencias sobre la forma de seleccionar el diagrama de antena se basan en la información relativa a la apertura del haz a media potencia y al nivel de cresta del lóbulo lateral. En el Cuadro 9 se facilita información sobre la apertura del haz a media potencia. Este modelo proporciona valores discretos de niveles de lóbulos laterales  $-13,2$  dB,  $-23$  dB,  $-32$  dB,  $-40$  dB y  $-47$  dB.

CUADRO 9

Cuadro de selección de aproximación de diagrama

Gama del nivel del primer lóbulo lateral por debajo del valor de cresta normalizado del lóbulo principal (dB)	Posible tipo de distribución de antena y coseno elevado a la $n$ potencia	Número de la ecuación de diagrama teórico	Número de la ecuación de máscara
13,2 a < 20	Uniforme	(2)	(7)
20 a < 30	$n = 1$	(3)	(8)
30 a < 39	$n = 2$	(4)	(9)
39 a < 45	$n = 3$	(5)	(10)
$\geq 45$	$n = 4$	(6)	(11)

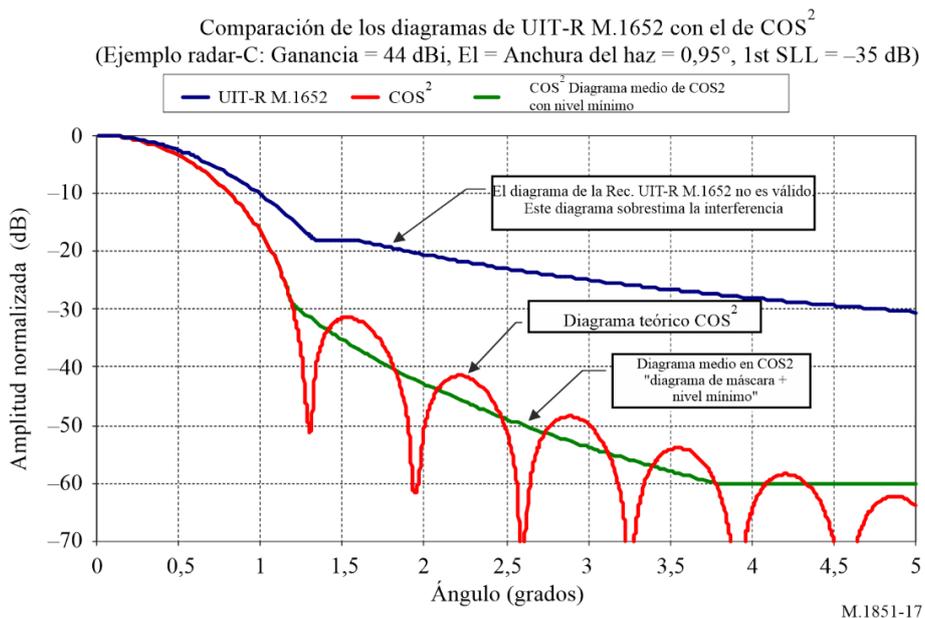
### 3 Comparación del diagrama de antena

La Recomendación UIT-R M.1652 contiene un modelo matemático para un diagrama de antena de radar del servicio de radiodeterminación utilizado en análisis de interferencia, que incluye ecuaciones para varios diagramas en función de la ganancia de antena. Una comparación entre los modelos desarrollados en esta Recomendación y el radar C de la Recomendación UIT-R M.1638-0 demuestra que el diagrama de la Recomendación UIT-R M.1652 no es óptimo. Como muestra la Fig. 18, el diagrama de la citada Recomendación UIT-R M.1652 sobrestima de manera significativa la ganancia de antena fuera del eje de puntería de la antena (0°).

Cabe asimismo señalar que las ecuaciones definidas en la Recomendación UIT-R F.699 tienden a sobreestimar los niveles de los lóbulos laterales de algunos sistemas de radar, y que esta no ha sido desarrollada para sistemas de radar.

FIGURA 17

#### Comparación de diagramas de antena



### 4 Antena parabólica circular de apertura cónica

En este punto se describe el diagrama de radiación de la antena parabólica circular de apertura cónica así como los diagramas de radiación de la envolvente de cresta y media para su utilización en los análisis de interferencia. Cuando se proporciona información sobre la anchura del haz a potencia mitad de la antena y el nivel de cresta de los lóbulos laterales, puede seleccionarse el conjunto adecuado de ecuaciones para los diagramas de cresta y medio. Los diagramas de envolvente de lóbulos laterales de cresta se utilizan para una fuente interferente de una sola fuente y los diagramas de envolvente de lóbulos laterales medios se utilizan para múltiples fuentes de interferencia.

#### 4.1 Utilización de la antena parabólica y descripción del diagrama

Una antena parabólica es una antena que utiliza un reflector parabólico, una superficie curva con la forma transversal de una parábola, para dirigir las ondas radioeléctricas. Las antenas reflectoras más comunes son la antena reflectora de esquina, la antena parabólica, la antena parabólica y la antena Cassegrain. Las antenas parabólicas pueden tener algunas de las ganancias más altas y las anchuras de haz más estrechas de cualquier tipo de antena. Para lograr anchuras de haz estrechas, el diámetro del reflector parabólico debe ser mucho mayor que la longitud de onda de las ondas radioeléctricas utilizadas.

Las antenas parabólicas se utilizan para radares de seguimiento (como barcos, aviones y nubes), comunicaciones punto a punto, enlaces inalámbricos para comunicaciones de datos, comunicaciones por satélite y antenas de comunicaciones de vehículos espaciales. También se utilizan en radiotelescopios. El UIT-R tiene muchas Recomendaciones para estas aplicaciones, como la UIT-R F.699, que especifica en el *recomienda* 4 que cuando sólo se conocen las anchuras de haz  $\theta$  de la antena:

$D/\lambda$  (expresado en la misma unidad) puede estimarse aproximadamente mediante la siguiente expresión:  $\frac{D}{\lambda} \approx \frac{70}{\theta}$  donde  $\theta$  es la anchura del haz ( $-3$  dB) (grados);

dado que  $\theta$ ,  $G_{m\acute{a}x}$  puede estimarse aproximadamente por:  $G_{m\acute{a}x}$  (dBi)  $\approx 44,5 - 20 \log \theta$ .

La atención se centra en la utilización de antenas parabólicas en aplicaciones de radar, en las que es necesario transmitir un haz estrecho de ondas radioeléctricas para localizar y seguir objetos. Para el análisis de la interferencia es necesario elaborar un diagrama de lóbulo lateral de antena de cresta y de lóbulo lateral medio que dependa únicamente de la anchura de haz de potencia mitad de la antena y del nivel de lóbulo lateral de cresta conocidos. El método utilizado es similar al de la apertura lineal.

A partir de las referencias [1] y [3], la función de patrón de directividad normalizada para la distribución parabólica  $F(\theta, n)$  para diferentes conos en un pedestal  $C$  se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1(\beta a \text{sen}(\theta))}{\beta a \text{sen}(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \text{sen}(\theta))}{n+1(\beta a \text{sen}(\theta))^{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}} \quad (31)$$

para modelos sin pedestal:

$$F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}(\beta a \text{sen}(\theta))}{(\beta a \text{sen}(\theta))^{n+1}} \quad (32)$$

siendo:

$\beta$ : constante del espacio libre =  $\frac{2\pi}{\lambda}$ , donde  $\lambda$  en metros

$a$ : radio de la antena, en metros

$D$ : diámetro de la antena, en metros

$\theta_3$ : diagrama de antena anchura de haz a potencia mitad de 3 dB, en grados

$J_n$ : función de Bessel (puede evaluarse con diversas herramientas informáticas)

$\lambda$ : longitud de onda

$n$ : valor numérico de la potencia del cono parabólico.

En las ecuaciones (31) y (32),  $\beta a = \frac{\pi K}{\theta_3}$  para antenas basadas en modelos matemáticos  $\theta_3 = D/\lambda$  (en radianes). Para el modelo con pedestal, los valores para  $K$ , en grados, figuran en el Cuadro 10 donde  $K = \frac{2a \theta_3}{\lambda}$  y  $SLL$  indica el nivel del primer lóbulo lateral, en dB. La ecuación (31) puede expresarse como:

$$F(\theta, n) = \frac{\frac{2J_1\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)\right)}{\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)} + \frac{(1-C)2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)\right)}{n+1\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)\right)^{n+1}}}{C + \frac{(1-C)}{n+1}} \quad (33)$$

y para los modelos sin pedestal, la ecuación (32) puede expresarse como:

$$F(\theta, n) = \frac{2^{n+1}(n+1)!J_{n+1}\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)\right)}{\left(\frac{\pi K}{\theta_3} \text{sen}(\theta)\right)^{n+1}} \quad (34)$$

El diagrama tridimensional (3D) puede obtenerse girando el diagrama de radiación de las ecuaciones (33) y (34) alrededor de la perpendicular a la abertura.

En el Cuadro 10 se muestra la relación entre el nivel de lóbulos laterales, el pedestal C y el factor de anchura del haz. El modelo con pedestal puede dar cualquier nivel de lóbulo lateral en el intervalo de -17,66 dB a -44,72 dB. Las gamas de niveles de lóbulos laterales para cada distribución de amplitudes ( $n = 0, 1, 2$  ó  $3$ ) se muestran en la columna «Gama del nivel máximo de lóbulos laterales por debajo del pico normalizado del lóbulo principal (dB)» del Cuadro 10.

Los parámetros para el modelo sin pedestal se indican en el Cuadro 11. Este modelo proporciona valores discretos de niveles de lóbulos laterales -17,66 dB, -24,64 dB, -30,61 dB, -35,96 dB y -40 dB. Además, da una envolvente descendente de los lóbulos laterales mucho más pronunciada en comparación con el modelo basado en la ecuación (33).

CUADRO 10

**Cuadro de selección de parámetros de antena para antenas de apertura circular con pedestal**

Distribución parabólica elevada a la potencia $n$	Gama del nivel máximo del lóbulo lateral por debajo de la cresta normalizada del lóbulo principal (dB)	Pedestal C	Factor de anchura de haz K (°)
0	-17,66	-	58,2125
1	-24,2 a -17,66	$C = 0,0016(SLL + 24,265)^3 - 0,009(SLL + 24,265)^2 + 0,12(SLL + 24,265) + 0,1$ (35)	$K = 0,0051(SLL + 24,265)^4 - 0,089(SLL + 24,265)^3 + 0,599(SLL + 24,265)^2 - 3,11(SLL + 24,265) + 69,43$ (36)
2	-24,2 a -34,7	$C = (0,0022(SLL + 34,7)^3 - 0,032(SLL + 34,7)^2 + 0,38(SLL + 34,7) + 1,1)/10$ (37)	$K = 0,0019(SLL + 34,7)^4 - 0,052(SLL + 34,7)^3 + 0,492(SLL + 34,7)^2 - 2,63(SLL + 34,7) + 74,9$ (38)
3	-44,72 a -34,7	$C = 0,01008 SLL + 0,4959$ (39)	$K = 0,0057 SLL^3 + 0,7079 SLL^2 + 28,061 SLL + 433,7618$ (40)

CUADRO 11

**Cuadro de selección de parámetros de antena para antenas de apertura circular sin pedestal**

Potencia parabólica, <i>n</i>	Nivel de cresta del lóbulo lateral (dB)	Factor de ancho de haz K (°)
0	-17,66	58,2125
1	-24,64	72,5938
2	-30,61	84,0529
3	-35,96	96,3142
4	-40,0	108,2317

**4.2 Procedimiento para calcular la envolvente del lóbulo lateral**

Utilizando la ecuación (33) y el Cuadro 12 para modelos con pedestal o la ecuación (34) y el Cuadro 13 para modelos sin pedestal, es posible desarrollar las ecuaciones de la máscara. Estas máscaras se obtienen utilizando los ajustes de curva a los niveles de cresta de los lóbulos laterales de la antena más allá de la primera ubicación nula del diagrama de antena. Se ha comprobado, comparando la integral de los diagramas de máscara teórico y propuesto, que la diferencia entre las envolventes de cresta y media en un corte del plano principal es de 4 dB. Para calcular las envolventes de cresta y media se utiliza el siguiente procedimiento:

- 1) calcular la ecuación (33) para modelos con pedestal o (34) para modelos sin pedestal para diferentes *n* valores utilizando el valor de K del Cuadro 10 u 11, normalizar después el diagrama y convertirlo a dB utilizando  $20 \times \log_{10}(|\text{Diagrama normalizado}|)$ ;
- 2) para trazar la máscara, utilice el diagrama de directividad teórico de la ecuación (33) para los modelos que utilizan pedestal o (34) para los modelos sin pedestal hasta el punto de corte para el diagrama de antena de cresta o medio, según se requiera. Después del punto de corte, aplique el patrón de máscara como se indica en el Cuadro 12 para los modelos con pedestal o 13 para los modelos sin pedestal;
- 3) la máscara del diagrama de cresta es el diagrama de antena que se desplaza sobre las crestas de los lóbulos laterales. Se utiliza para una fuente interferente de una sola fuente;
- 4) la máscara del diagrama medio es el diagrama de antena que se aproxima al valor integral del diagrama teórico. Se utiliza para fuentes de interferencia combinadas;
- 5) el punto de corte medio de la máscara de diagrama es el punto de la magnitud del diagrama (dB) por debajo de la ganancia máxima, donde la forma del diagrama se aparta del diagrama teórico y se convierte en el diagrama de máscara medio;
- 6) el punto de corte de la máscara del diagrama de cresta es el punto de la magnitud del diagrama (dB) por debajo de la ganancia máxima, donde la forma del diagrama se aparta del diagrama teórico hacia el diagrama de máscara de cresta;
- 7)  $\theta_3$  es la anchura de haz de la antena a 3 dB (grados);
- 8)  $\theta$  es el ángulo en los cortes del plano principal de elevación (vertical) o acimut (horizontal) (grados); y
- 9) la máscara media se calcula utilizando la máscara de cresta y restando 4 dB. Obsérvese que los puntos críticos del diagrama de cresta son diferentes de los diagramas promedio;

10) el diagrama tridimensional (3D) puede obtenerse rotando el diagrama de radiación de la envolvente del Cuadro 12 para los modelos con pedestal o del Cuadro 13 para los modelos sin pedestal alrededor de la perpendicular a la abertura.

Los Cuadros 12 y 13 muestran las ecuaciones que han de utilizarse en los cálculos de las máscaras de antena media y de cresta.

CUADRO 12

**Ecuación (41): Ecuaciones del diagrama de máscara teórico normalizado de cresta y media para el cono parabólico con pedestal**

Distribución parabólica elevada a la potencia $n$	Ecuación de la máscara más allá del punto crítico del diagrama donde la máscara se aparta del diagrama teórico (dB)	A	B	Nivel mínimo de la máscara (dB)
0		12,55	2,394	-35
1		$A = -0,00227(SLL + 17,66)^5 - 0,02745(SLL + 17,66)^4 - 0,1224(SLL + 17,66)^3 - 0,204(SLL + 17,66)^2 - 0,1727(SLL + 17,66) + 12,2586$	si $SLL \geq -24,2$ y $SLL \leq -21,55$ : $B = 0,083177 SLL^3 + 5,4731 SLL^2 + 119,8649 SLL + 877,4646$ si $SLL \geq -21,55$ y $SLL \leq -17,66$ : $B = -0,2471 SLL - 1,6534$	-50
2	$-A \ln \frac{B \theta }{\theta_3}$	si $SLL \geq -34,7$ y $SLL \leq -31,55$ : $A = -0,06419753 SLL^3 - 6,17611 SLL^2 - 198,013 SLL - 2105,5$ si $SLL \geq -31,55$ y $SLL \leq -24,2$ : $A = 0,0053 SLL^2 + 0,4366 SLL + 18,714$	si $SLL \geq -34,7$ y $SLL \leq -32,6$ : $B = -1,5961 SLL^2 - 106,45 SLL - 1758,7$ si $SLL \geq -32,6$ y $SLL \leq -24,2$ : $B = 0,0656 SLL^2 + 2,574 SLL + 29,4$	-60
3		$A = 0,0005(SLL + 34,7)^3 + 0,0022(SLL + 34,7)^2 + 0,0324(SLL + 34,7) + 11,7177$	$B = -0,0219(SLL + 34,7)^3 - 0,148(SLL + 34,7)^2 - 0,856(SLL + 34,7) + 7,64$	-70

CUADRO 13

Ecuaciones del diagrama de máscara teórico normalizado de cresta y media sin pedestal

Ecuación de distribución de campo (22)	Ecuación de la máscara más allá del punto de ruptura del diagrama donde la máscara se aparta del diagrama teórico (dB)	Punto de corte del diagrama de cresta en el que la máscara se aparta del diagrama teórico (dB)	Punto de corte del diagrama medio en el que la máscara se aparta del diagrama teórico (dB)	Máscara de adelante hacia atrás desde el nivel mínimo (dB)	Ecuación N.º
$n = 0$	$-28,9 \times \log_{10} \left( \frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 11,9$	$0,8537 \times \theta_3$	$1,051 \times \theta_3$	-35	(42)
$n = 1$	$-49,0 \times \log_{10} \left( \frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 14,4$	$0,9893 \times \theta_3$	$1,161 \times \theta_3$	-50	(43)
$n = 2$	$-69,13 \times \log_{10} \left( \frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 15,46$	$1,13 \times$	$1,273 \times \theta_3$	-60	(44)
$n = 3$	$-89,0 \times \log_{10} \left( \frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 16,12$	$1,2165 \times \theta_3$	$1,339 \times \theta_3$	-70	(45)
$n = 4$	$-108,8 \times \log_{10} \left( \frac{ \theta }{\theta_3} \right) - 16,27$	$1,2835 \times$	$1,3906 \times$	-80	(46)

El método se muestra en la Fig. 18.

FIGURA 18  
Ejemplo de punto crítico

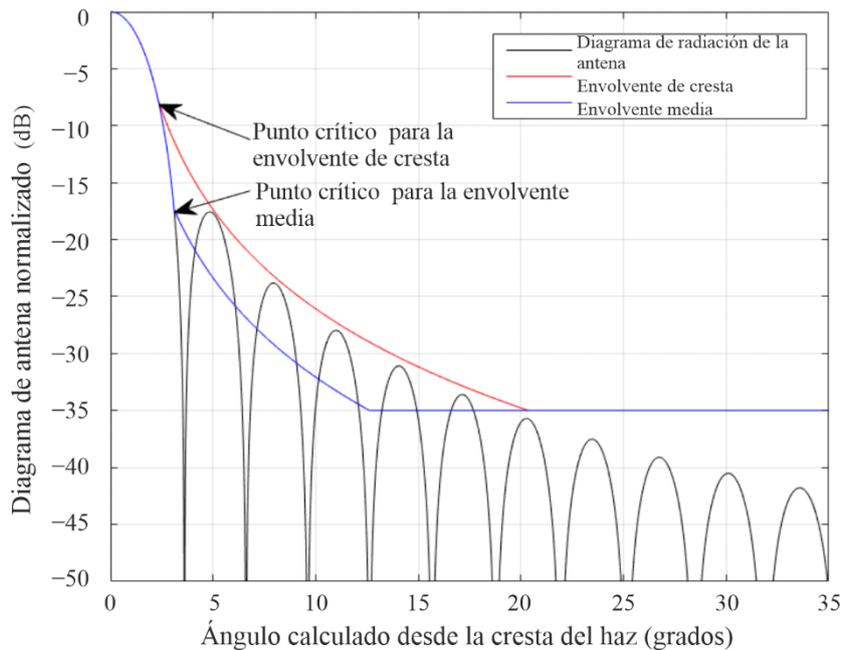
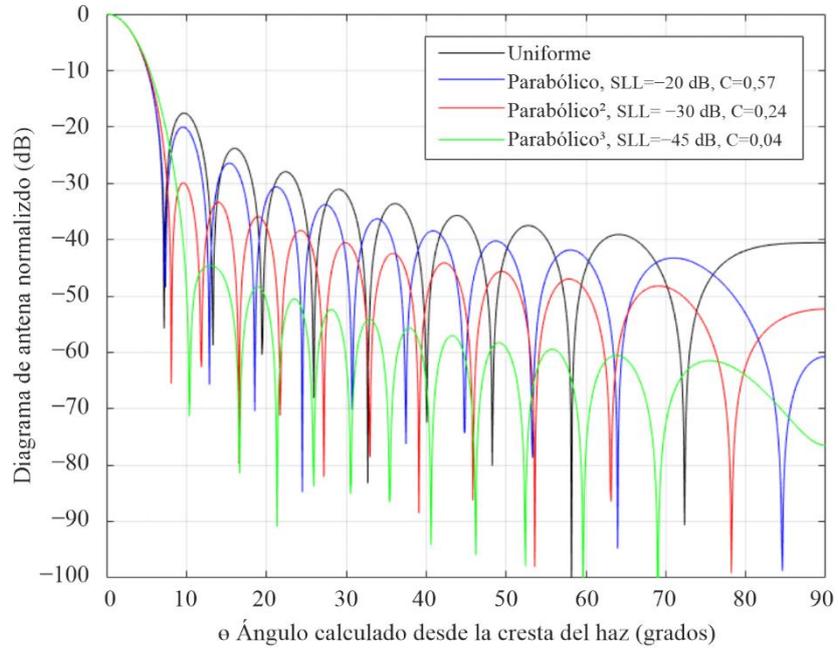


FIGURA 19

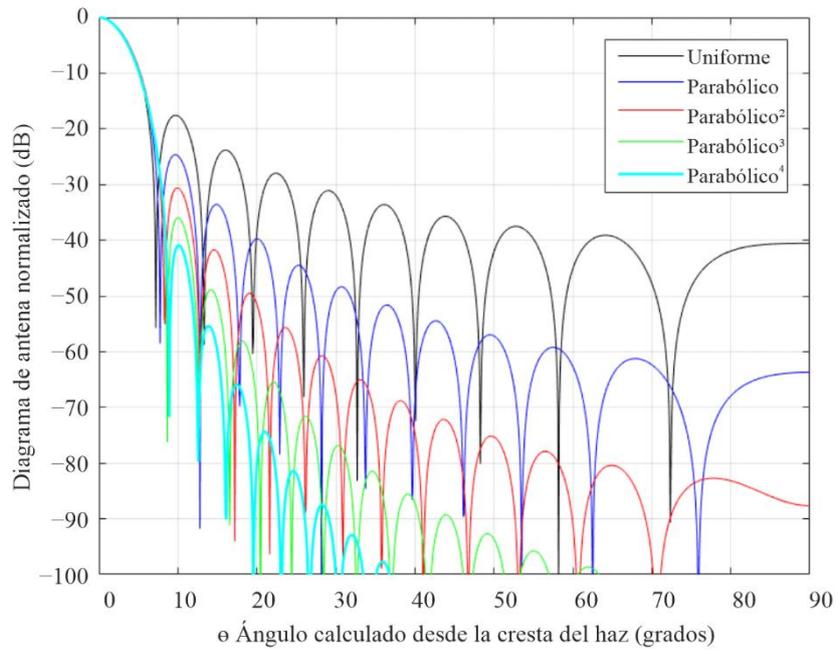
Comparación del diagrama de antena para diversas distribuciones de apertura cónica parabólica circular con pedestal, la anchura de haz a 3 dB es de 6,0 grados (el diagrama es simétrico)



M.1851-19

FIGURA 20

Comparación del diagrama de antena para diversas distribuciones de apertura cónica parabólica circular sin pedestal, la anchura del haz a 3 dB es de 6,0 grados (el diagrama es simétrico)



M.1851-20

### 4.3 Selección del diagrama de antena para los modelos sin pedestal

El Cuadro 14 ofrece sugerencias sobre cómo debe seleccionarse el diagrama de antena en función de la información sobre el nivel de cresta de los lóbulos laterales. Este modelo proporciona valores discretos de niveles de lóbulos laterales  $-17,66$  dB,  $-24,64$  dB,  $-30,61$  dB,  $-35,96$  dB y  $-40$  dB.

CUADRO 14

#### Cono parabólico en función del nivel de cresta de los lóbulos laterales

Gama de niveles de cresta normalizados de lóbulos laterales (dB)	Potencia de distribución de la antena parabólica, $n$
-15 a -20	$n = 0$
-20 a -27	$n = 1$
-27 a -33	$n = 2$
-33 a -38	$n = 3$
Menos de -38	$n = 4$

### Referencias

- [1] Barton, David K., and Ward, Harold R., *Handbook of Radar Measurement*, Artech House, 1984, Cuadro A.15, página 264.
- [2] Chang, Kai, editor-in-chief, *et al.*, *Encyclopaedia of RF and microwave engineering*, 6 Volume set. Koazkoff, Dennis, *Aperture Antennas*, DeVry University, Alpharetta, Georgia, página 365. The *Encyclopaedia of RF and Microwave Engineering* is available online at <http://www.mrw.interscience.wiley.com/erfme>.
- [3] Stutzman, Warren L. and Thiele, Gary A., *Antenna theory and design*, 3<sup>rd</sup> ed. 2013. Cuadro 9-2.

### 5 Diagramas tridimensionales (3-D) aproximados

En algunos casos, las técnicas de simulación y predicción requieren el uso de un diagrama de radiación de antena tridimensional. La mayoría de los fabricantes de antenas sólo proporcionan información sobre los dos cortes de radiación planos principales (acimut/elevación, véase el sistema de coordenadas de la Fig. 29) de la antena utilizada en la simulación. Dado que puede ser necesario el diagrama tridimensional, se proporciona una mejor estimación de la radiación tridimensional utilizando los cortes de acimut y elevación.

En general, la forma más sencilla de aproximar el diagrama de radiación tridimensional a partir de sus dos cortes principales (acimut y elevación) es sumando los valores en dB de las muestras disponibles para cada ángulo acimutal y de elevación. Este método clásico se utiliza ampliamente en muchas herramientas de simulación, cuando se requieren capacidades 3D.

En el caso de antenas direccionales, se han definido varios métodos. La lista de referencias muestra varias de estas referencias. De [3] se han seleccionado dos métodos sencillos. Estos métodos son el método de suma y el método de suma ponderada. Estos métodos se comparan con el método de suma.

El método de suma se define como la suma de las muestras disponibles de los planos horizontal y vertical en dB. Este método se adopta especialmente para antenas omnidireccionales en acimut, y puede utilizarse cuando se dispone de cortes principales en acimut y elevación.

$$G_{sum} = G_{az}(\varphi) + G_{el}(\theta)$$

Para el método de suma ponderada de la referencia [3], las ecuaciones utilizadas en la referencia dependen del corte horizontal  $G_{az}$  en dB, definido de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , y el corte vertical  $G_{el}$  en dB se define de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Sólo se utiliza el diagrama de ganancia de elevación frontal. El diagrama de ganancia del lóbulo posterior de elevación no se utiliza en la metodología.

$$G_{az}(\varphi) = 10 \log_{10}(g_{az}(\varphi))$$

$$G_{el}(\theta) = 10 \log_{10}(g_{el}(\theta))$$

En el punto  $(\theta, \varphi)$ , la ganancia ponderada  $GW$  se aproxima por referencia [3]:

$$GW(\theta, \varphi) = \frac{G_{az}(\varphi) \times w_1 + G_{el}(\theta) \times w_2}{\sqrt[k]{w_1^k + w_2^k}}$$

donde  $w_1$  y  $w_2$  están determinados por:

$$w_1(\theta, \varphi) = g_{el}(\theta) \times (1 - g_{az}(\varphi))$$

$$w_2(\theta, \varphi) = g_{az}(\varphi) \times (1 - g_{el}(\theta))$$

En [3] se indicó que el concepto que subyace a esta técnica es que el proceso de estimación de una muestra de radiación comprende los datos reales de los otros diagramas principales de elevación y acimut, en función de la distancia angular entre el punto de interés y el punto de muestra, mediante una ponderación cruzada entre los dos cortes principales.

En este enfoque, la función de ponderación proporciona los medios para una ponderación adecuada de la distancia angular.

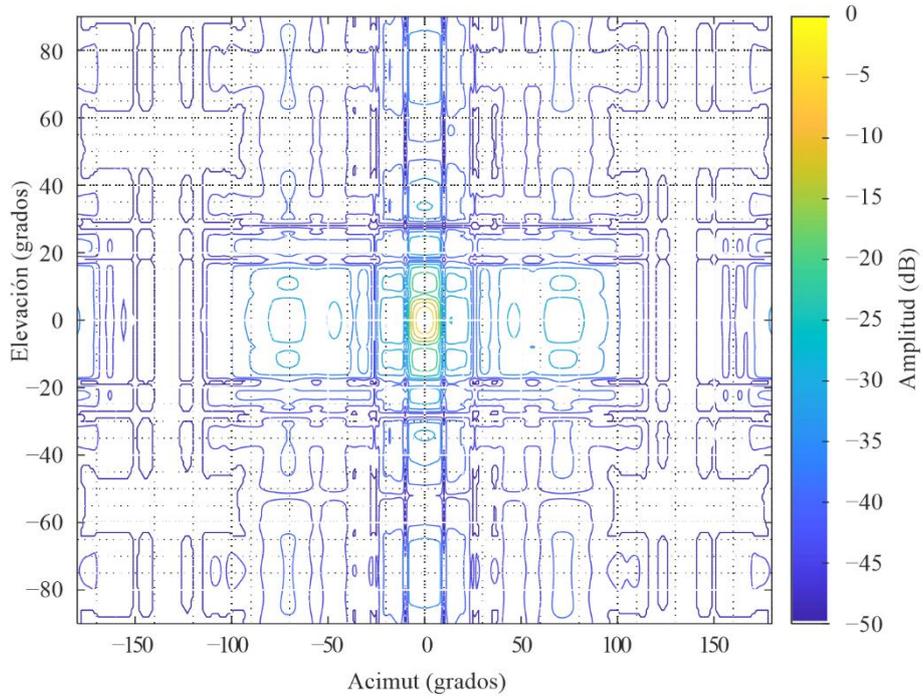
Se ha comprobado que un valor de  $k$  igual a 2 es adecuado para antenas direccionales, pero también pueden considerarse otras aproximaciones.

En lo que respecta a la utilización del § 2.1 (antena de apertura rectangular), los diagramas de radiación o diagramas de envolvente del diagrama 3D pueden obtenerse mediante la ecuación (14). En lo que respecta a la utilización del § 4 (apertura circular), los diagramas de radiación de diagrama 3D o diagramas de envolvente pueden obtenerse girando el diagrama 2D. Si se dispone de diagramas de radiación de antena medidos, pueden utilizarse los mismos métodos dependiendo del tipo de antena considerada.

Las Figs. 21 y 22 muestran un ejemplo de diagrama tridimensional a partir de sus cortes planos bidimensionales indicados en la Fig. 23

FIGURA 21

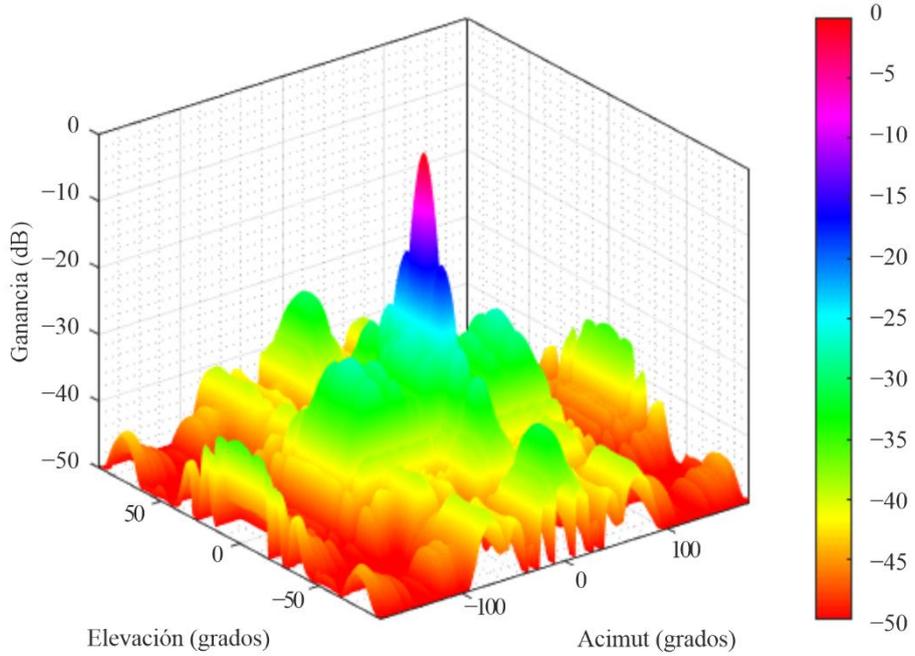
Ejemplo de diagrama de antena de contorno normalizado (dB) calculado a partir de sus cortes planos en la Fig. 23



M.1851-21

FIGURA 22

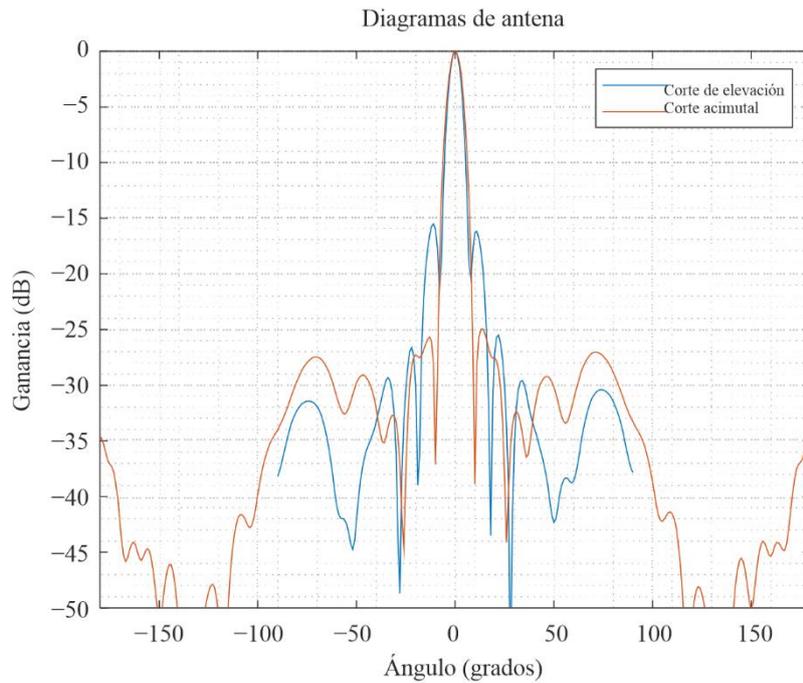
Ejemplo de un gráfico tridimensional relativo de acimut y elevación de antena calculado a partir de sus cortes planos en la Fig. 23



M.1851-22

FIGURA 23

Cortes planos de la antena utilizados como ejemplo para calcular los diagramas tridimensionales<sup>2</sup>



M.1851-23

## 6 Diagramas de antenas compuestas de elementos enfasados

### 6.1 Sistema de antenas lineales enfasado

La siguiente ecuación podría utilizarse para calcular un diagrama de antena lineal uniforme normalizado:

$$g(\theta) = f(\theta) \cdot \frac{1}{N} |AF(\theta)|^2 \quad (47)$$

siendo:

$g(\theta)$ : diagrama de ganancia de antena lineal uniforme normalizado

$f(\theta)$ : diagrama de ganancia de elementos radiantes elementales normalizado, insertado en la antena lineal uniforme

$N$ : número de elementos radiantes elementales

$AF(\theta)$ : factor de<sup>o</sup> antena lineal uniforme:

$$AF(\theta) = \frac{\text{sen}\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \quad (48)$$

con

$$\Psi = 2\pi(d/\lambda)(\text{sen}(\theta) - \text{sen}(\omega)) \quad (49)$$

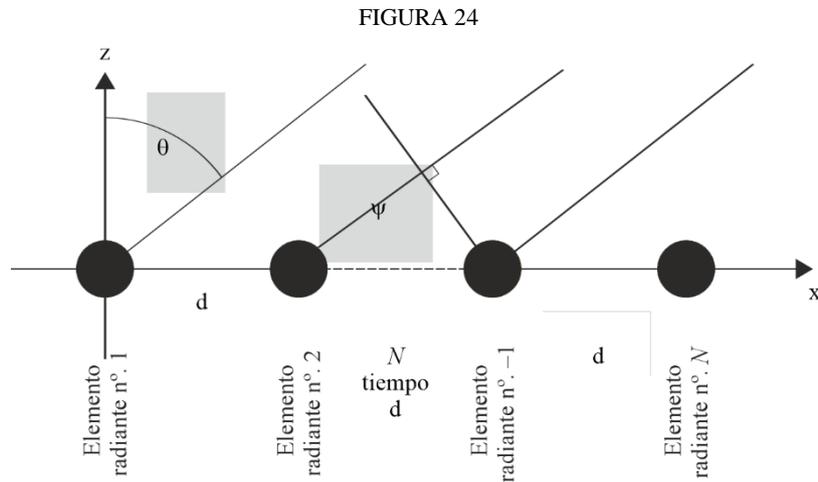
siendo:

$d$ : espacio regular entre elementos radiantes elementales uniformes

$\lambda$ : longitud de onda en la frecuencia objeto de estudio

<sup>2</sup> Mediciones desde una antena UltraDish™ TP 27 de RF Elements.

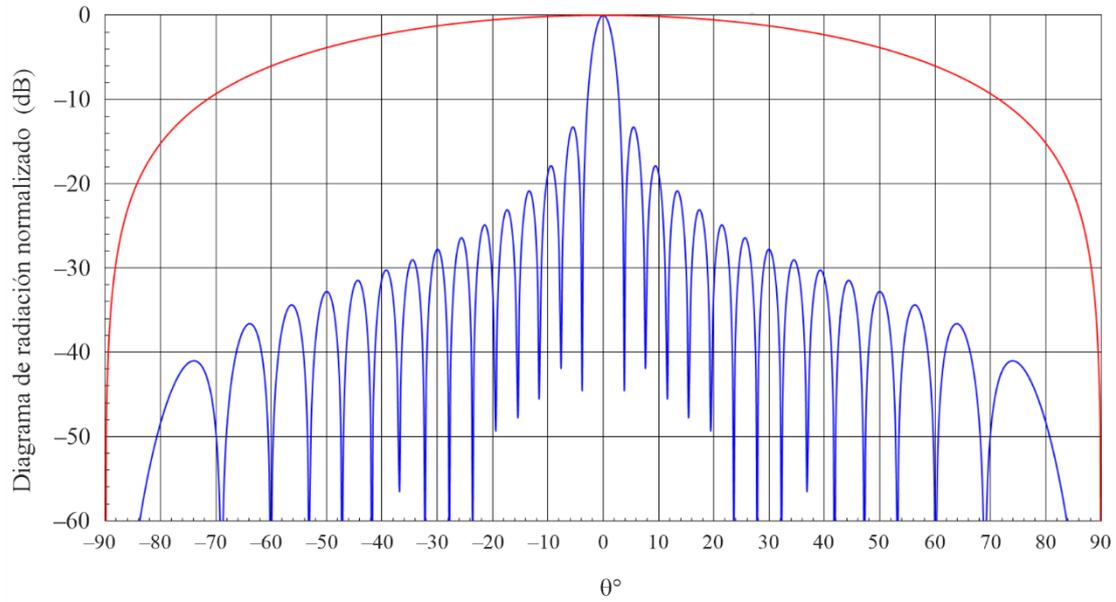
- $\omega$ : ángulo de orientación del haz electrónicamente  
 $\theta$ : ángulo con respecto al eje  
 $N$ : número de elementos radiantes elementales.



El carácter específico de las antenas compuestas de elementos enfasados permite dirigir electrónicamente el lóbulo principal del diagrama de antena desde el eje de puntería de la antena mecánica. Los efectos específicos de los lóbulos laterales en los ángulos  $\omega$  de exploración más amplios de los diagramas de antena deberían tomarse en consideración en cuanto que ampliación y desimetrización importantes del lóbulo principal (véase la Fig. 25). De hecho, el valor máximo del lóbulo principal disminuye como  $\cos(\omega)$ , además de como diagrama de elemento radiante elemental en la matriz. Todo ello resulta en un haz principal más ancho, una serie de pérdidas de ganancia máxima y, en consecuencia, unos lóbulos laterales lejanos mayores. Para un valor de  $\omega$  entre las gamas de  $\pm 60^\circ$  y  $\pm 90^\circ$  desde el eje de puntería de la antena mecánica, el diagrama resultante adolece de tantas perturbaciones que no puede utilizarse (véase la Fig. 26). Los valores prácticos de  $\omega$  oscilan entre las gamas de  $0^\circ$  y  $\pm 60^\circ$  desde el eje de puntería de la antena mecánica. Además, si la retícula entre los elementos radiantes elementales de la matriz es mayor que  $\lambda/2$ , los lóbulos reticulados del lóbulo principal podrían aparecer en  $\omega$  incluso en un valor inferior a la gama  $\pm 60^\circ$  desde el eje de puntería de la antena mecánica (véase la Fig. 27). Incluso si la retícula entre los elementos radiantes elementales de la matriz equivale a  $\lambda/2$ , los lóbulos laterales de los lóbulos reticulares del lóbulo principal, situados a  $-90^\circ$  y  $+90^\circ$  desde el eje de puntería de la antena mecánica, alteran el diagrama de matriz (véase la Fig. 28), así como un importante agrandamiento y desimetrización del lóbulo principal.

FIGURA 25

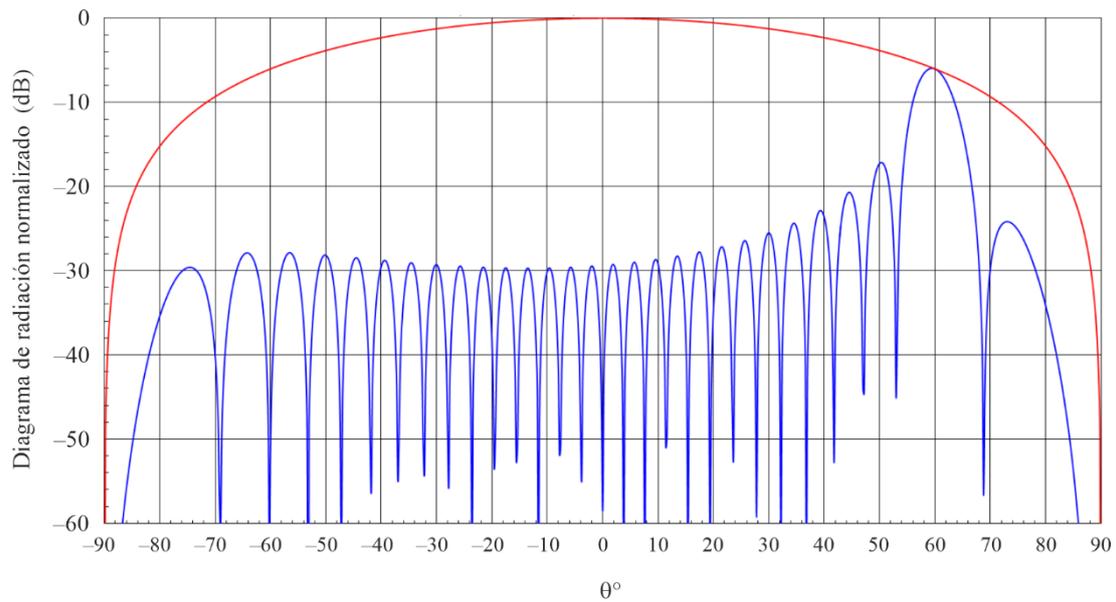
Diagrama de radiación normalizado teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $\lambda/2$  (curva azul) orientado hacia el eje de puntería y un diagrama de radiación de elementos en  $\cos^2$  (curva roja)



M.1851-25

FIGURA 26

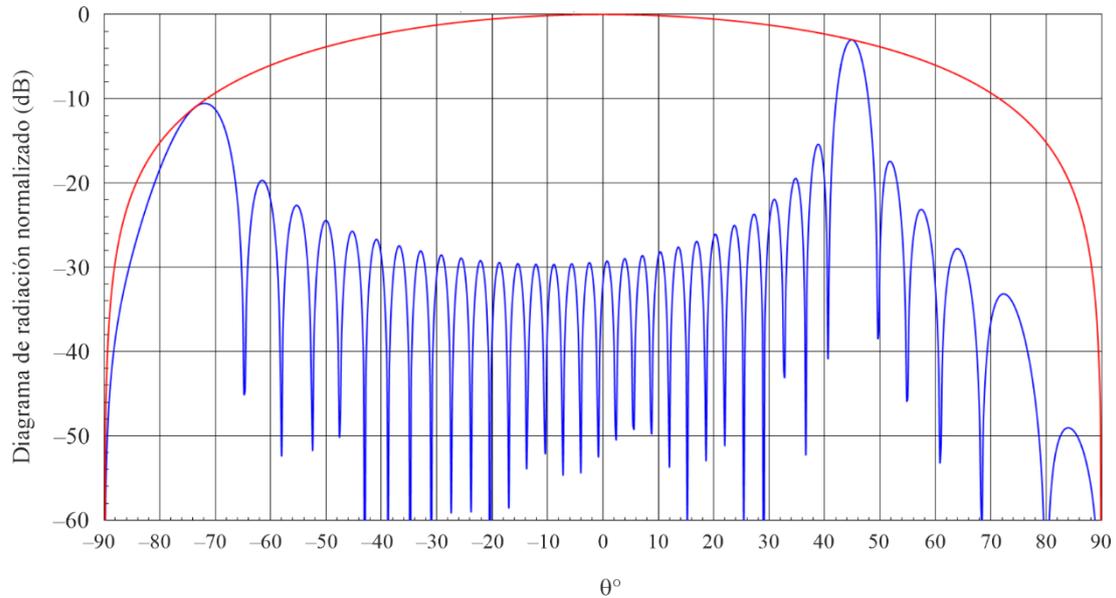
Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $\lambda/2$  (curva azul) a  $60^\circ$  y un diagrama de radiación de elementos en  $\cos^2$  (curva roja)



M.1851-26

FIGURA 27

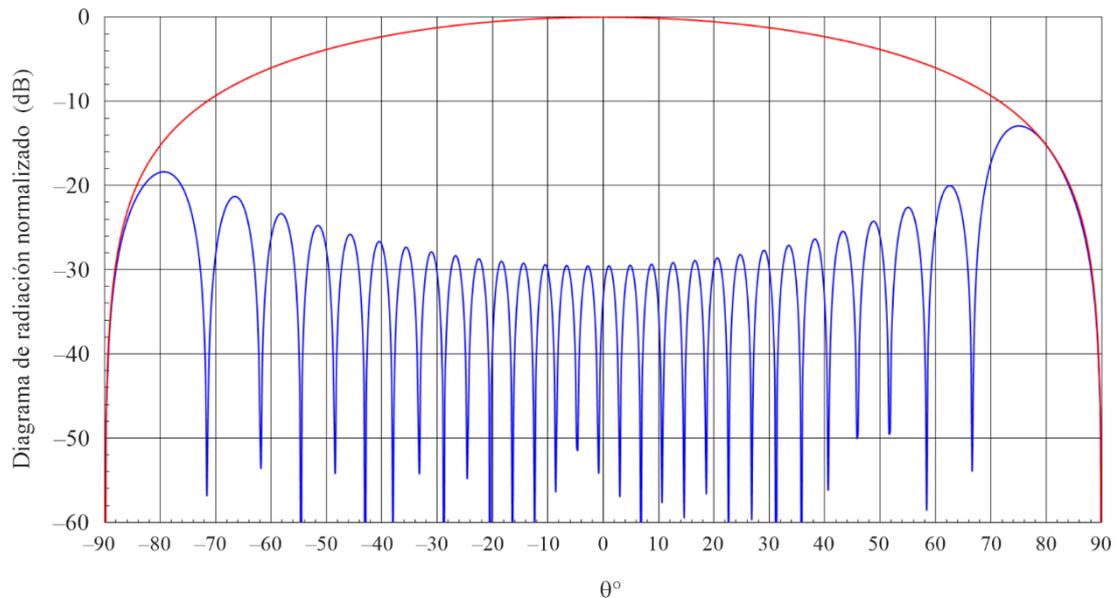
Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $0,6\lambda$  (curva azul) a  $45^\circ$  y un diagrama de radiación de elementos en  $\cos^2$  (curva roja)



M.1851-27

FIGURA 28

Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $\lambda/2$  (curva azul) a  $80^\circ$  y un diagrama de radiación de elementos en  $\cos^2$  (curva roja)



M.1851-28

## 6.2 Sistema de antenas planas enfasado

Los conjuntos planos suelen ser un conjunto de elementos radiantes únicos idénticos (por ejemplo, monopolos, dipolos, microbandas) dentro de un plano. Generalmente están organizados/espaciados en una estructura regular, lo que da como resultado una geometría típica como rectangular, hexagonal, circular, etc. Los conjuntos permiten explorar el haz principal en cualquier dirección de  $\theta$  (elevación) y  $\varphi$  (acimut) en cualquier dirección del espacio tridimensional.

Por consiguiente, el diagrama de radiación 3D del sistema plano puede expresarse mediante dos elementos:

- a) el **elemento único** directividad  $D_e(\theta, \varphi)$  en todas las direcciones angulares  $(\theta, \varphi)$  (ya sea a través de un patrón o a través de las características físicas tales como altura, anchura, longitud,  $\epsilon_r$  constante dieléctrica del elemento, etc),
- b) el **factor del conjunto**  $AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)$  en función de la orientación del haz  $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$  y dirección angular  $(\theta, \varphi)$  (a través de la geometría del conjunto, el número de elementos, la separación entre elementos y a través de los coeficientes de ponderación en los elementos del conjunto enfocado (uniforme o no).

A partir de estos dos elementos, la directividad del conjunto plano  $D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$  puede expresarse de la siguiente manera:

$$D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = 4\pi \frac{D_e(\theta, \varphi) \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta, \varphi)|^2}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} D_e(\theta', \varphi') \cdot |AF_{(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})}(\theta', \varphi')|^2 \sin\theta' d\theta' d\varphi'}$$

Aplicando el factor de eficiencia  $\eta$  del sistema plano, puede establecerse el diagrama de ganancia  $G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$  de la orientación de la orientación del haz  $(\theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$  y la dirección angular  $(\theta, \varphi)$ :

$$G_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan}) = \eta \cdot D_a(\theta, \varphi, \theta_{e-tilt}, \varphi_{scan})$$

La siguiente ecuación captaría la directividad para el caso de un sistema de antenas planas con retícula rectangular de la siguiente manera:

$$D_a(\theta, \varphi) = D_e(\theta, \varphi) \cdot \frac{1}{N} \cdot |AF(\theta, \varphi)|^2 \quad (50)$$

siendo:

$\theta$ : ángulo de elevación (radianes)

$\varphi$ : ángulo de acimut (radianes)

$D_a(\theta, \varphi)$ : diagrama de directividad de antenas planas uniformes

$D_e(\theta, \varphi)$ : diagrama de directividad de los elementos radiantes elementales insertado en el conjunto de antenas planas uniformes

$N_x$ : número de elementos radiantes elementales a lo largo del eje x

$N_y$ : número de elementos radiantes elementales a lo largo del eje y

$N = N_x \cdot N_y$ : número total de elementos radiantes elementales

AF: factor de antena de conjunto plano uniforme:

$$AF(\theta, \varphi) = \frac{\text{sen}\left(\frac{N_x \psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_x(\theta, \varphi)}{2}\right)} \times \frac{\text{sen}\left(\frac{N_y \psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi_y(\theta, \varphi)}{2}\right)} \quad (51)$$

con

$$\psi_x(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_x}{\lambda} \times (\text{sen}(\theta) \times \cos(\varphi) - \text{sen}(\omega_\theta) \times \cos(\omega_\varphi)) \quad (52)$$

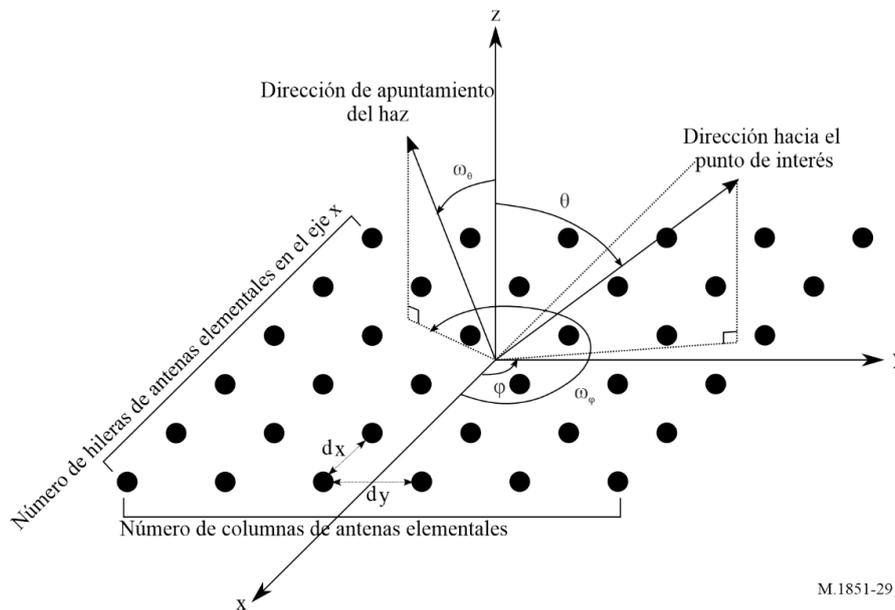
$$\psi_y(\theta, \varphi) = 2\pi \times \frac{d_y}{\lambda} \times (\text{sen}(\theta) \times \text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\omega_\theta) \times \text{sen}(\omega_\varphi)) \quad (53)$$

siendo

$d_x$ : espacio regular entre elementos radiantes elementales uniformes a lo largo del eje x (m)

- $d_y$ : espacio regular entre elementos radiantes elementales uniformes a lo largo del eje y(m)
- $\lambda$ : longitud de onda a la frecuencia considerada (m)
- $\omega_\theta$ : ángulo de orientación de elevación del haz electrónico (radianes)
- $\omega_\varphi$ : ángulo de orientación acimutal del haz electrónico (radianes).

FIGURA 29



M.1851-29

Al igual que las antenas lineales enfasadas, las antenas planas enfasadas permiten orientar electrónicamente el lóbulo principal de la antena hacia cualquier coordenada esférica. Sin embargo, los grandes ángulos de dirección en acimut y elevación producen efectos específicos de los lóbulos laterales en el diagrama de antena, así como un importante agrandamiento y desimetrización del lóbulo principal. Los lóbulos de rejilla son los mismos que los descritos en el § 6.1.

El modelo de este punto requiere conocer el número de elementos ( $N_x$ ,  $N_y$ ), la separación entre elementos ( $dx$ ,  $dy$ ), el diagrama de radiación de un solo elemento y la ganancia de elementos asociada. En ausencia de conocimiento de estos parámetros de entrada, deben utilizarse las máscaras de cresta o media descritas en el § 2.1.1.

## 7 Eficacia de la antena

La eficacia de la antena cuantifica la parte de la potencia suministrada a la antena que realmente se radia, y se define como la relación (en unidades lineales de potencia) entre las dos magnitudes y debe ser estrictamente inferior a 1 (o, lo que es equivalente, a 0 dB). En consecuencia, al utilizar uno de los modelos de esta Recomendación debe tomarse cierto cuidado para asegurar que el diagrama de ganancia de antena generado cumple con esta restricción de la eficacia de la antena.

El cálculo de la ganancia integrada total (TIG) es posible cuando se dispone del diagrama de radiación 3D de una antena. La TIG puede sobreestimarse en los casos en que se utilizan máscaras de cresta o media de la antena. La TIG se define en unidades lineales como:

$$\text{TIG} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\pi} G(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

siendo:

$\theta$ : ángulo de elevación (radianes)

$\varphi$ : ángulo de acimut (radianes)

$G(\theta, \varphi)$ : ganancia de antena con respecto a una antena isótropa (linear).

## 8 Ejemplos de diagramas medidos

Las Figs. 30 y 31 muestran ejemplos de diagramas de antena de radar medidos en la banda de 9 GHz. El eje X representa el ángulo acimutal abarcado en más de 360°, y el eje Y representa el nivel de potencia recibido en cada ángulo acimutal. El diagrama de potencia se normaliza a su máximo o a una antena isótropa que ha de considerarse como el diagrama de antena normalizado o el diagrama de directividad.

El primer análisis de estos diagramas de antena medidos indica que los primeros lóbulos laterales aparecen cerca de  $-30$  dBc con una pendiente notable de los lóbulos laterales, lo que lleva a estimar aproximadamente que se utilizó una ley de iluminación de apertura de  $\cos^2$ . Un nivel mínimo de máscara teórico a  $-60$  dBc dado por el modelo  $\cos^2$  parecería en este caso un poco demasiado bajo debido a la presencia de lóbulos posteriores y lóbulos de difracción posteriores en este diagrama de antena, y, si es necesario, utilizar diagramas de antena reales en lugar de teóricos cuando sea posible.

La Fig. 31 muestra un ejemplo de diagramas de cosecante cuadrado medidos. Los haces del radar se obtienen de una antena reflectora, alimentada por dos bocinas que entregan dos haces inclinados a diferentes ángulos de elevación.

FIGURA 30  
Ejemplo de diagrama de antena medido

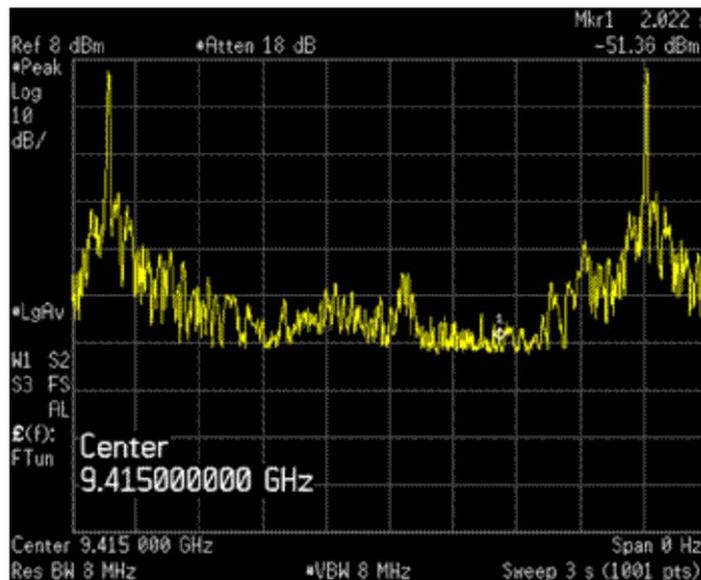
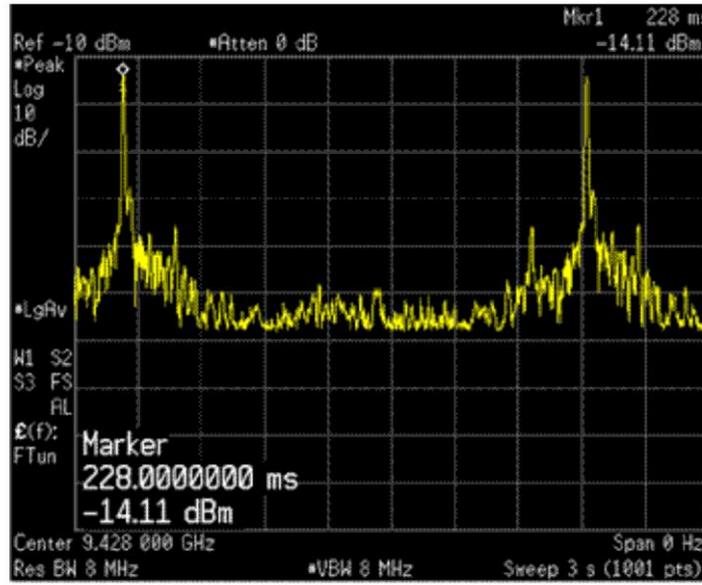


FIGURA 31

Ejemplo de diagrama de antena medido

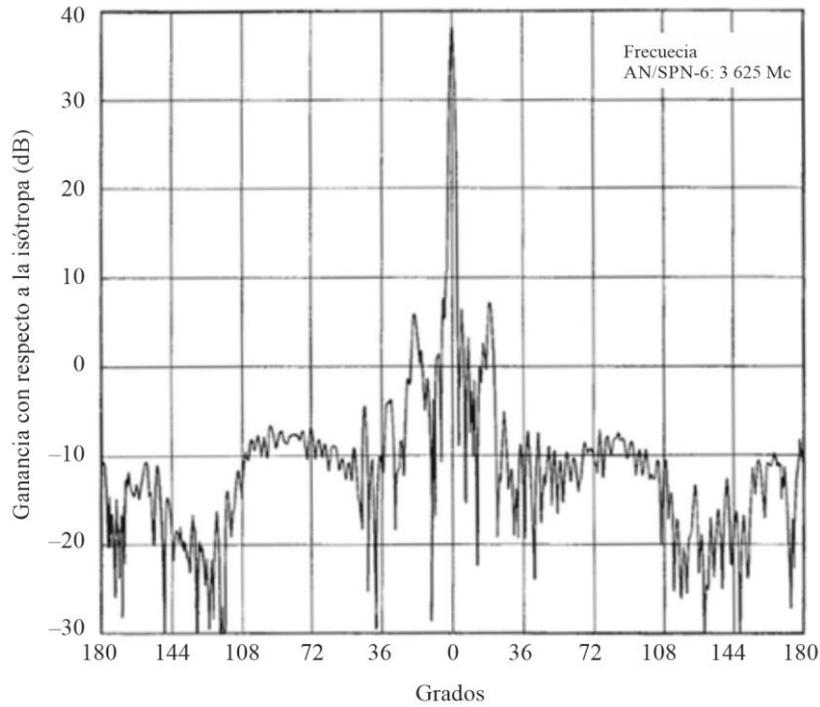


M.1851-31

Las Figs. 32 y 33 muestran otros dos ejemplos.

FIGURA 32

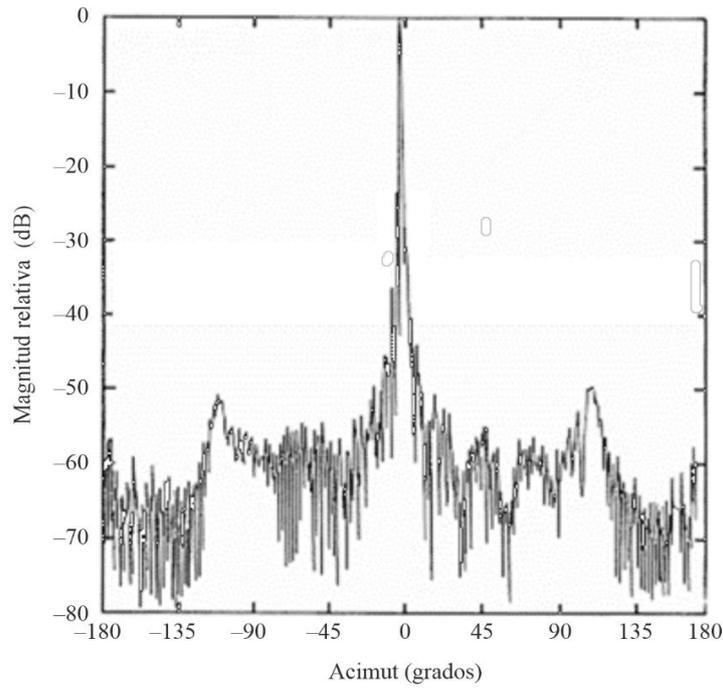
Mediciones desde una antena de radar AN/SPN-6 a 3,6 GHz y 38 dBi



M.1851-32

FIGURA 33

Diagrama de antena de radar Doppler de radar meteorológico con un 1<sup>er</sup> lóbulo lateral a 25 dB y una relación anterior-posterior de 60 dB

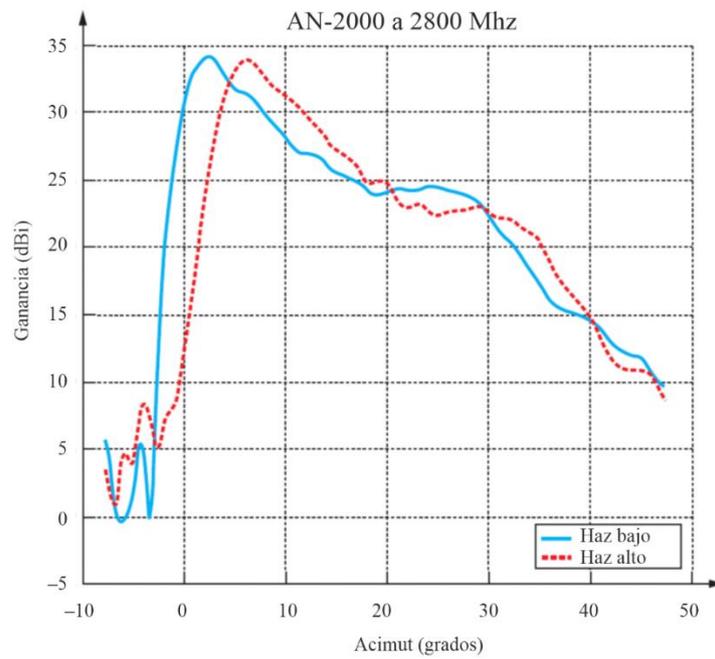


M.1851-33

La Fig. 34 puede compararse con el diagrama teórico de antena en cosecante cuadrado dado por las ecuaciones (22) y (23).

FIGURA 34

Mediciones desde STAR2000 radar de control de tráfico aéreo (ATC) a 2,8 GHz



M.1851-34