

# UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

## Recomendación UIT-R M.1851-1 (01/2018)

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

**Serie M**

**Servicios móviles, de radiodeterminación,  
de aficionados y otros servicios  
por satélite conexos**



## Prólogo

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

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

## Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

### Series de las Recomendaciones UIT-R

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

Series	Título
<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, 2018

© UIT 2018

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.1851-1

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

(2009-2018)

**Cometido**

Esta Recomendación describe los diagramas de antena de los sistemas de radar de radiodeterminación 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

**Abreviatura**

ADP Diagrama de directividad de antena

**Recomendaciones UIT-R conexas**

Recomendaciones UIT-R F.699, UIT-R F.1245, UIT-R M.1638, UIT-R M.1652, UIT-R M.1849.

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,

*recomienda*

**1** que, si en otras Recomendaciones UIT-R relativas a las características de los sistemas de radar del servicio de radiodeterminación figuran diagramas de antena y/o ecuaciones de diagramas de antena aplicables a los radares, deben utilizarse dichas Recomendaciones;

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

## Anexo 1

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

#### 1 Introducción

Es necesario elaborar un modelo matemático generalizado para los diagramas de antena de los sistemas de radar de radiodeterminación cuando estos diagramas no aparecen definidos en las Recomendaciones UIT-R aplicables al sistema de radar del servicio de radiodeterminación 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 texto 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 estudiados, obtenido de las Recomendaciones del UIT-R.

CUADRO 1

#### Límites de los parámetros de antena estudiados

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		Omnidireccional, 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> ) (ecuación 12 y Cuadro 4)	3,6 ( $\theta_3$ ) 20 ( $\theta_{\text{máx}}$ )	3,6 ( $\theta_3$ ) 44 ( $\theta_{\text{máx}}$ )
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 radar con una anchura de haz estrecha

#### 2.1.1 Antecedentes

Si se carece de información concreta sobre la anchura del haz a 3 dB, la forma de distribución de corriente o el campo de iluminación en la apertura de la antena, pero se dispone de datos relativos al tamaño de la antena, la apertura del haz a media potencia  $\theta^3$  (grados) ronda los  $70 \lambda/D$ , siendo  $\lambda$  la longitud de onda y  $D$  la longitud de la antena y estando ambos valores expresados en las mismas unidades (véase el *recomienda* 4.1 de la Recomendación UIT-R F.699).

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 el Cuadro 2 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

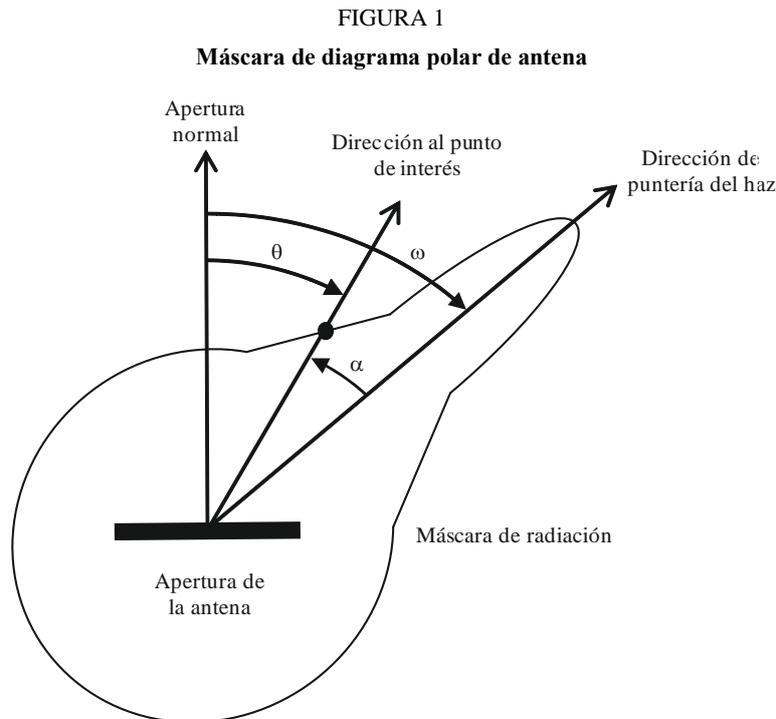
$\omega$ : ángulo (exploración) de puntería en elevación o acimut del haz con respecto a la apertura normal

$\theta$ : 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.



Los diagramas de antena teóricos propuestos para antenas con distribución de campo de fase uniforme figuran en el Cuadro 2.

Los diagramas de antena teóricos propuestos para antenas compuestas de elementos enfasados figuran en el § 7, y tienen en cuenta los efectos específicos de los lóbulos laterales que surgen en amplios ángulos  $\omega$  de exploración.

Los parámetros y fórmulas para determinar los diagramas de directividad de antena (DDA) indicados en el Cuadro 2 (y posteriormente en el Cuadro 3 y las Figuras) sólo son correctos si la amplitud de campo en el borde de la apertura de la antena es igual a cero y se encuentra dentro de los límites del lóbulo principal y del primero de los dos lóbulos laterales del diagrama de directividad de antena.

Con otros valores de amplitud de campo en el borde de la apertura de la antena, la forma del diagrama de directividad y sus parámetros puede diferir significativamente de los valores teóricos presentados en esta Recomendación.

Si se carece de otro tipo de datos, los estudios de compartición y compatibilidad con sistemas de radar pueden basarse en un diagrama de antena simplificado que se ajuste al lóbulo principal teórico y una máscara en otras direcciones. A fin de realizar dichos estudios, se recomienda el uso de máscaras de cresta o media 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, según se indica en el § 2.1.3.

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

### 2.1.2 Ecuaciones de antena teóricas

El Cuadro 2 contiene ecuaciones de diagramas de directividad y parámetros conexos aplicables a diferentes formas de distribución de campo en la apertura de la antena.

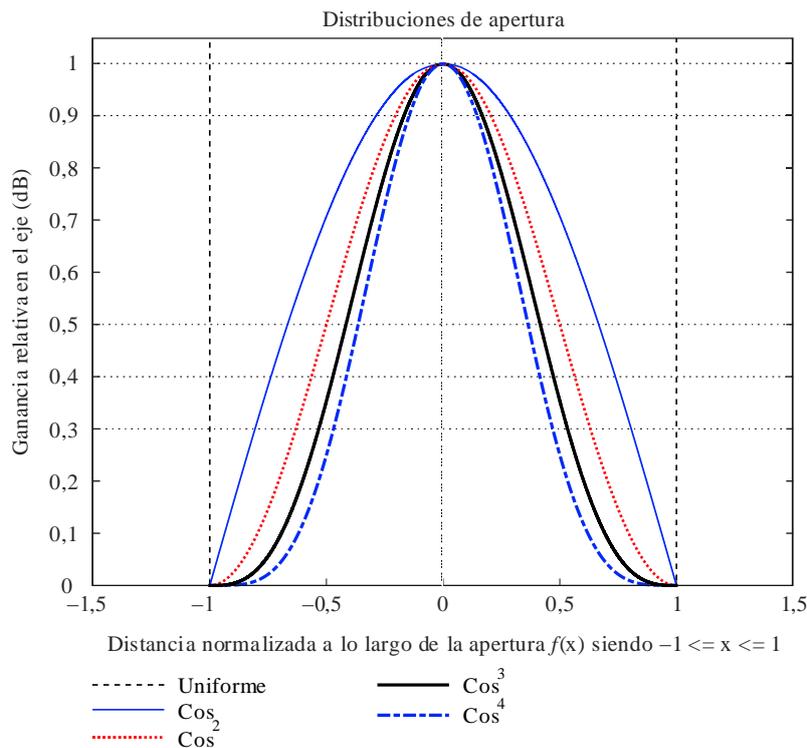
CUADRO 2

Parámetros teóricos de directividad de antena

Forma relativa de la distribución de campo $f(x)$ donde $-1 \leq x \leq 1$	Diagrama de directividad $F(\mu)$	Apertura del haz a media potencia $\theta^3$ (grados)	$\mu$ en función de $\theta^3$	Nivel del primer lóbulo lateral por debajo del valor de cresta del lóbulo principal (dB)	Ecuación N.º
Valor uniforme de 1	$\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$	$50,8 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta)}{\theta_3}$	-13,2	(2)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)$	$\frac{\pi}{2} \left[ \frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$68,8 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 68,8 \cdot \text{sen}(\theta)}{\theta_3}$	-23	(3)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^2$	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[ \frac{\text{sen}(\mu)}{\left(\pi^2 - \mu^2\right)} \right]$	$83,2 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 83,2 \cdot \text{sen}(\theta)}{\theta_3}$	-32	(4)
$\text{COS}(\pi \cdot x/2)^3$	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[ \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]$	$95 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 95 \cdot \text{sen}(\theta)}{\theta_3}$	-40	(5)
$\text{COS}^4(\pi \cdot x/2)$	$\frac{3\pi^4 \text{sen}(\mu)}{2\mu(\mu^2 - \pi^2)(\mu^2 - 4\pi^2)}$	$106 \left( \frac{\lambda}{l} \right)$	$\frac{\pi \cdot 106 \cdot \text{sen}(\theta)}{\theta_3}$	-47	(6)

siendo  $\theta_3$  la apertura del haz a media potencia de la antena a 3 dB (grados). Las formas relativas de las funciones de distribución de campo  $f(x)$ , definidas en el Cuadro 2, se representan en la Fig. 2.

FIGURA 2  
Distribuciones de apertura

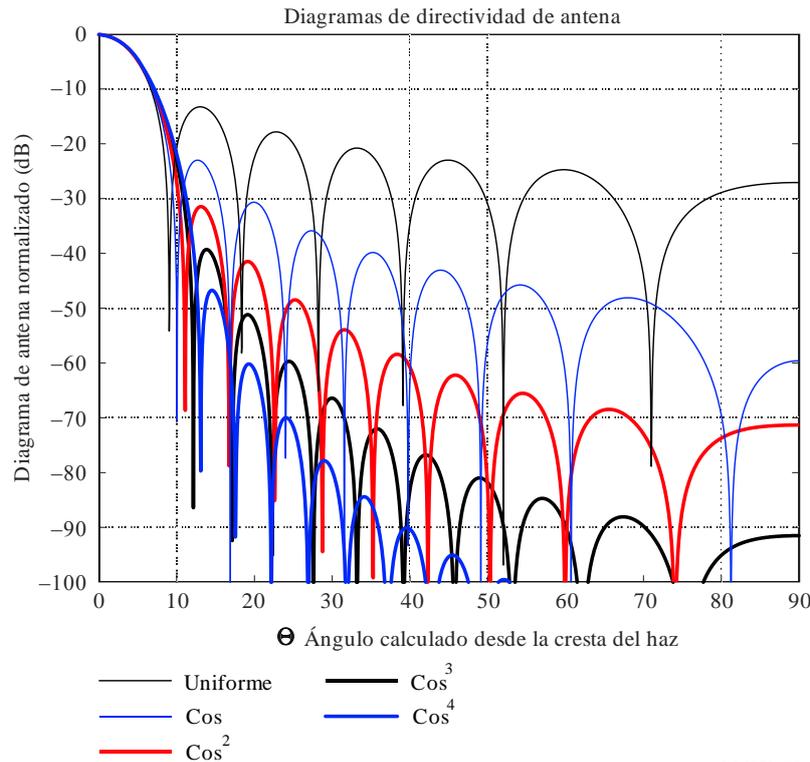


Conociendo la apertura del haz a media potencia,  $\theta_3$ , puede redefinirse el valor de  $\mu$  en función de la apertura del haz de la antena a media potencia, sustituyendo la cantidad  $\left(\frac{l}{\lambda}\right)$  en  $\mu = \pi \left(\frac{l}{\lambda}\right) \text{sen}(\alpha)$  por una constante 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. Estos valores constantes de 50,8; 68,8; 83,2, 95 y 106, mostrados en el Cuadro 2, pueden obtenerse fijando la ecuación para  $F(\mu)$  igual a  $-3$  dB, y resolviéndola para el ángulo  $\theta$ .

La Fig. 3 representa diversos diagramas de antena de apertura lineal para las funciones de distribución 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 3

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



M.1851-03

### 2.1.3 Procedimiento para determinar la máscara

Utilizando la Fig. 3 *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 (6) en dB utilizando  $20 \cdot \log_{10}$  (valor absoluto (diagrama de directividad de campo));
- se normalizan las ganancias de los diagramas de antena. 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;
- para dibujar la máscara, se utiliza el diagrama de directividad teórico del Cuadro 2, 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 3;
- 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 indica el Cuadro 3;

- 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 el Cuadro 3;
- $\theta_3$  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 unos 4 dB. Obsérvese que los puntos críticos del diagrama de cresta son distintos que los puntos críticos de los diagramas medios.

El Cuadro 3 indica las ecuaciones utilizadas en los cálculos.

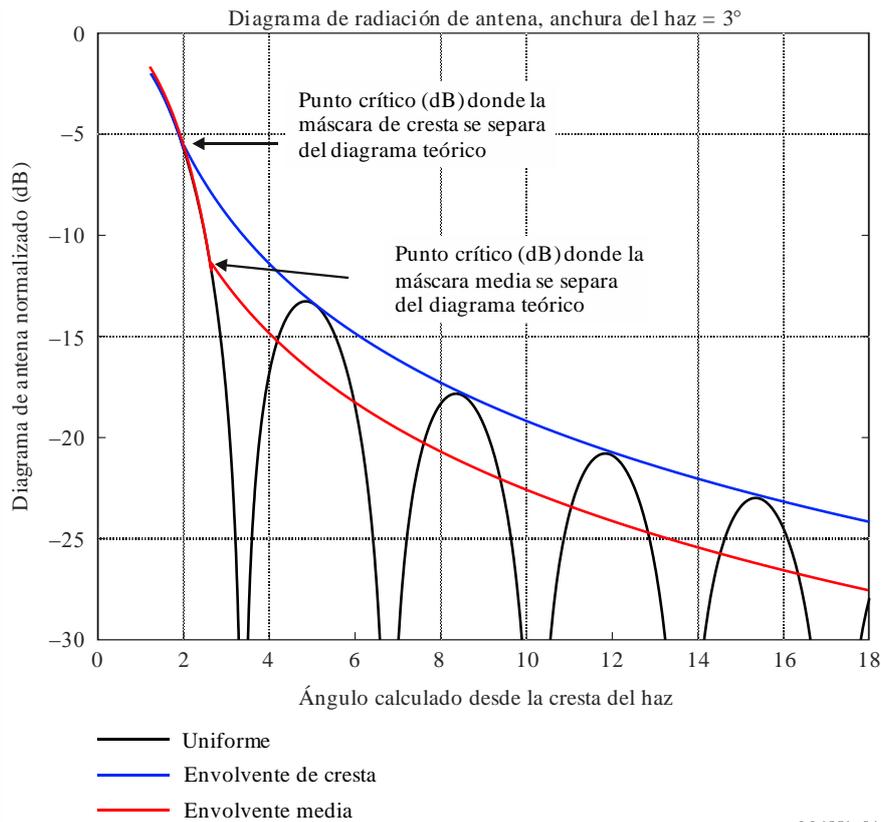
CUADRO 3

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

Distribución de campo	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	$-8,584 \cdot \ln \left( 2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-30	(7)
COS	$-17,51 \cdot \ln \left( 2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50	(8)
COS <sup>2</sup>	$-26,882 \cdot \ln \left( 1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60	(9)
COS <sup>3</sup>	$-35,84 \cdot \ln \left( 1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70	(10)
COS <sup>4</sup>	$-45,88 \cdot \ln \left( 1,56 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-39,4	-42,5	-2,61	-80	(11)

La función  $\ln()$  es la función logarítmica natural. En la Fig. 4 se representa un ejemplo de punto crítico.

FIGURA 4  
Ejemplo de punto crítico



M.1851-04

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

El diagrama de cosecante cuadrado es un caso especial. La potencia (a diferencia de la intensidad de campo) viene dada por:

$$G(\theta) = G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2 \quad (12)$$

donde:

- $G(\theta)$ : diagrama de cosecante cuadrado entre los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_{\text{máx}}$
- $G(\theta_1)$ : ganancia del diagrama en  $\theta_1$
- $\theta_1$ : apertura del haz de la antena a media potencia donde arranca el diagrama de cosecante cuadrado =  $\theta_3$
- $\theta_{\text{máx}}$ : máximo ángulo donde se detiene el diagrama de cosecante cuadrado
- $\theta$ : ángulo de elevación (grados)
- $\theta_3$ : apertura del haz de la antena a media potencia (grados).

La ganancia del diagrama de antena medio no se considera en el diagrama de cosecante cuadrado. Debe utilizarse para fuentes de interferencia única y múltiples. El diagrama de cosecante se aplica de conformidad con el Cuadro 4.

CUADRO 4

## Ecuaciones del diagrama de antena de cosecante cuadrado

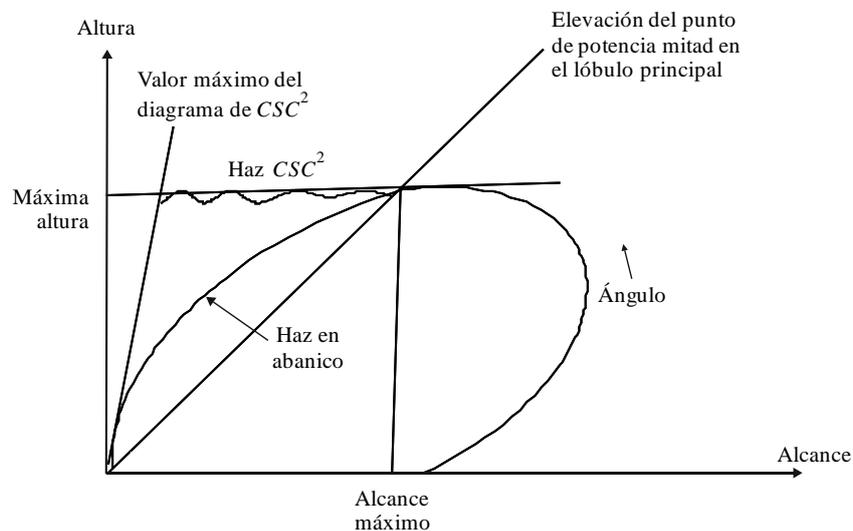
Ecuación de cosecante cuadrado	Condición	Ecuación N°
$\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$ ; $\mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta))/\theta_3$	$\frac{-\theta_3}{0,88} \leq \theta \leq +\theta_3$	(13)
$G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2$	$+\theta_3 \leq \theta \leq \theta_{m\acute{a}x}$	(14)
Nivel mínimo de cosecante (ejemplo = -55 dB)	$\theta_{m\acute{a}x} \leq \theta \leq \theta_{90}$	(15)
$G(\theta_1) = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}}$	$\theta_1 = \theta_3$	(16)

Tngase en cuenta que  $G(\theta_1) \cdot \left( \frac{\text{CSC}(\theta)}{\text{CSC}(\theta_1)} \right)^2$  se refiere a la amplitud del diagrama de potencia, mientras que  $\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$  y  $G(\theta_1) = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}}$  se refieren al «diagrama de directividad F( $\mu$ )» y a la amplitud de campo, que son cuadrados de la amplitud de potencia. La solución podría consistir en escribir  $\frac{\text{sen}(\mu)}{\mu}$  y  $G(\theta_1) = \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}\right)}{\frac{\pi \cdot 50,8 \cdot \text{sen}(\theta_1)}{\theta_3}}$ .

Las Figuras que aparecen a continuación representan gráficamente los diagramas.

FIGURA 5

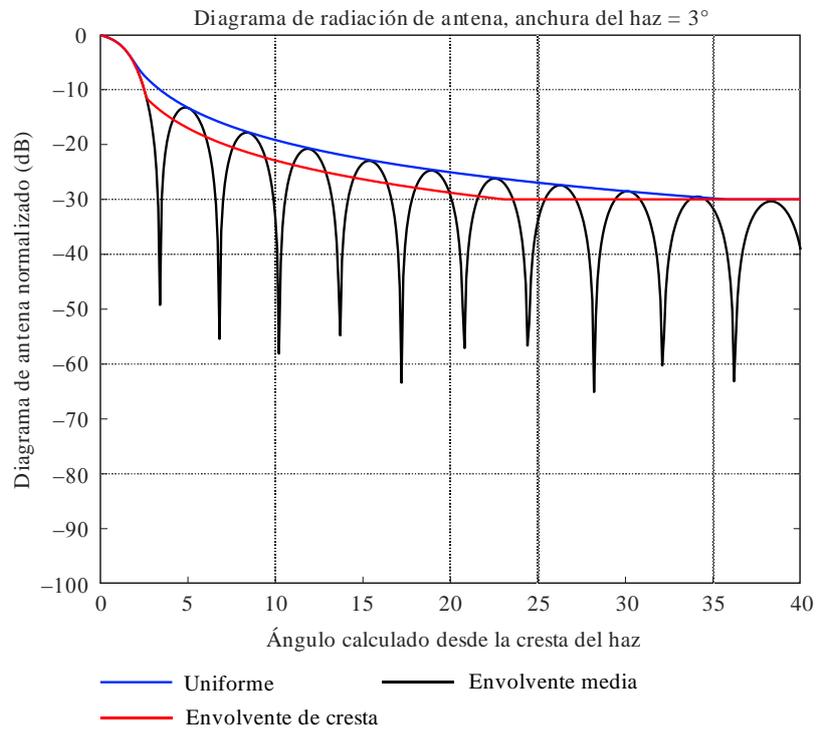
## Cobertura del haz en cosecante cuadrado para radar de búsqueda



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

FIGURA 6

Diagrama de antena con envolvente de cresta  $\left(\frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right)^2$  en radianes o  $\left(\frac{\text{sen } \theta}{\theta} \times \frac{180}{\pi}\right)^2 \approx \left(\frac{\text{sen } \theta}{\theta} \times 57,3\right)^2$  en grados y envolvente media para una distribución de campo uniforme



M.1851- 06

FIGURA 7

**Ejemplo de diagrama de antena de traza polar con envolvente de cresta y media para una distribución de campo uniforme**

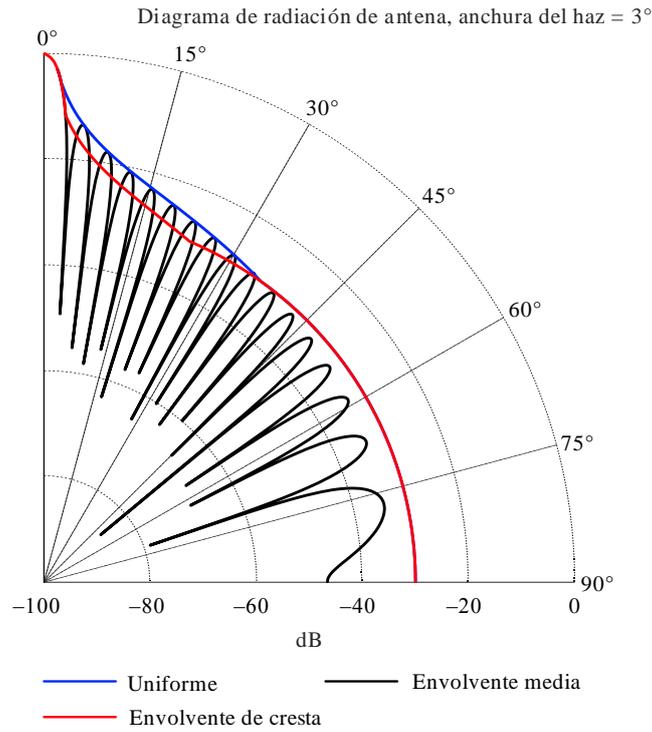


FIGURA 8

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

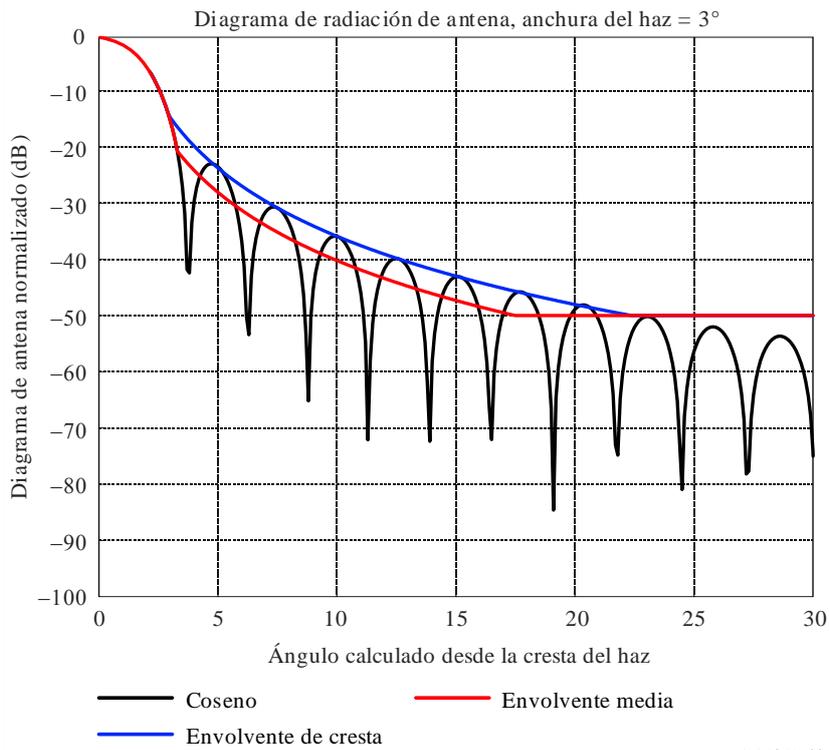


FIGURA 9

**Diagrama de antena con envolvente de cresta y media para una distribución en coseno cuadrado**

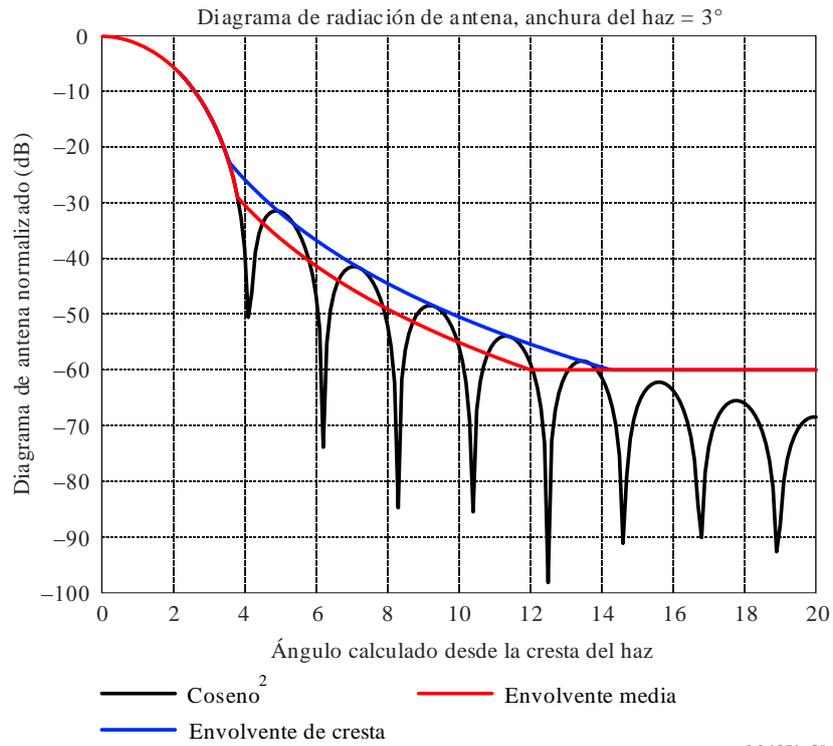


FIGURA 10

**Diagrama de antena con envolvente de cresta y media para una distribución en coseno cubo**

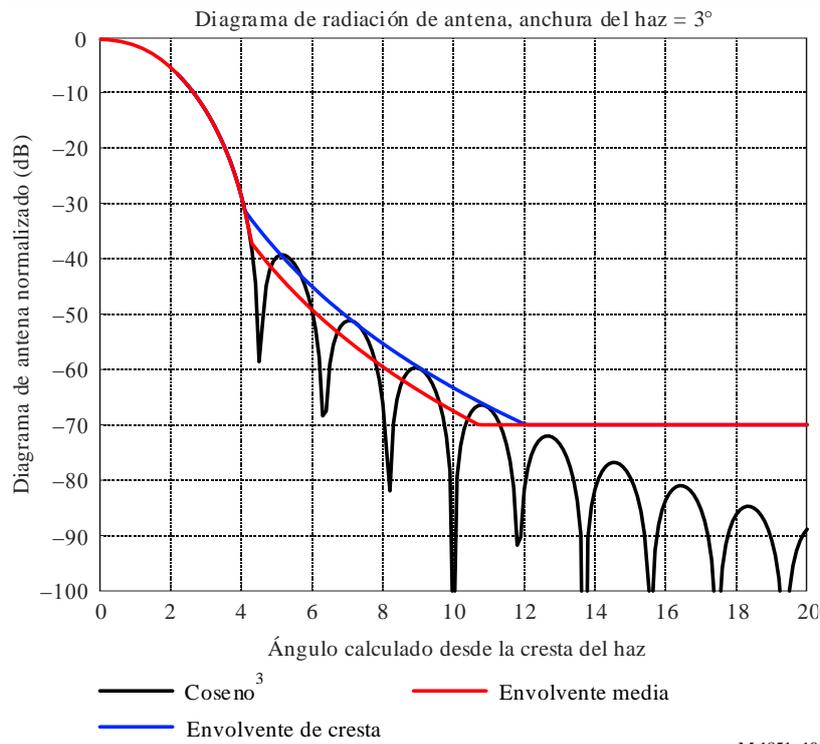


FIGURA 11

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

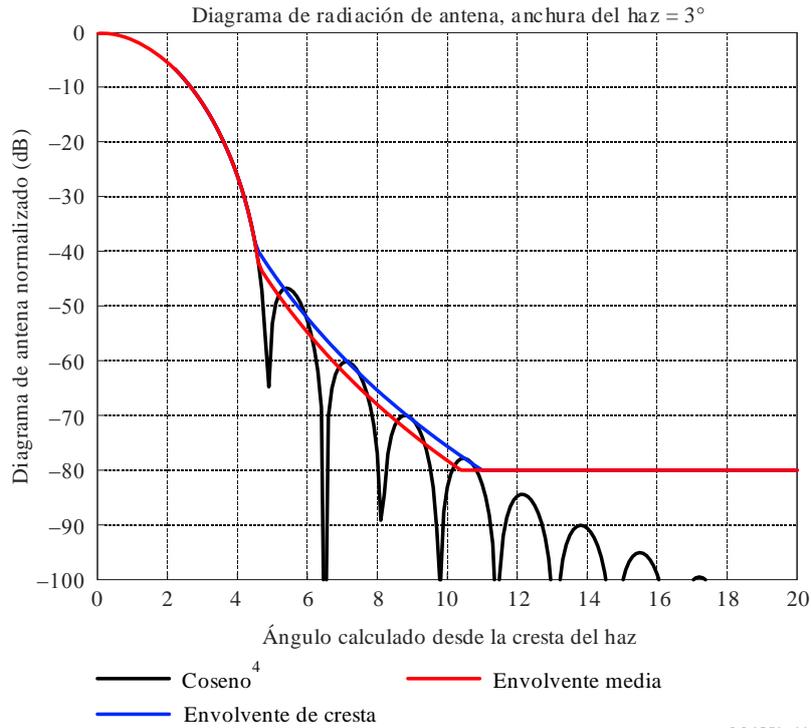
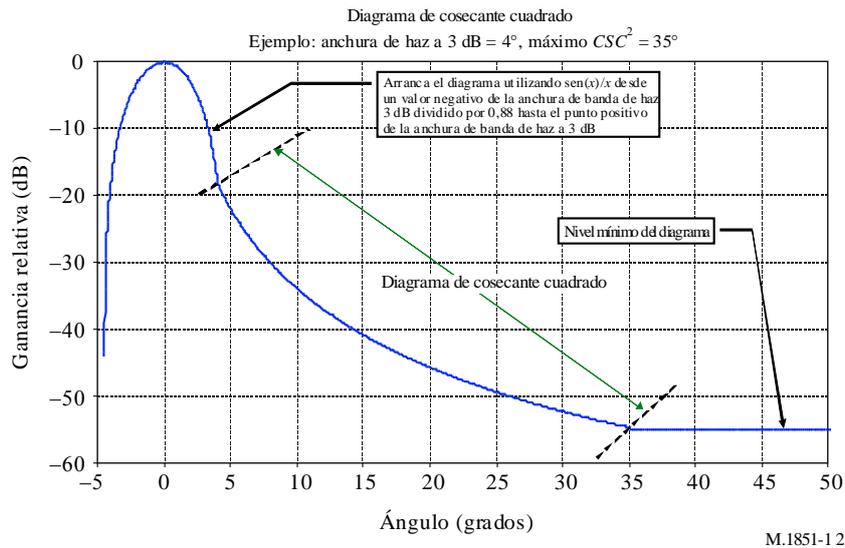


FIGURA 12

Envolvente de diagrama de antena en CSC<sup>2</sup>



### 3 Selección del diagrama de antena

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 5 se facilita información sobre la apertura del haz a media potencia.

CUADRO 5

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)

#### 4 Comparación del diagrama de antena

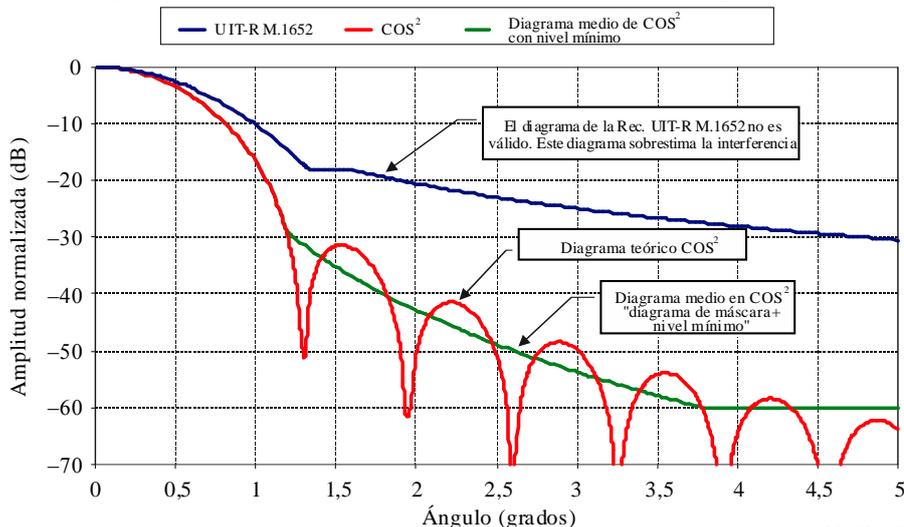
La Recomendación UIT-R M.1652 contiene un modelo matemático para un diagrama de antena de radar del servicio de radiodeterminación utilizado en análisis de interferencia, que incluye ecuaciones para varios diagramas en función de la ganancia de antena. Una comparación entre los modelos desarrollados 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. 13, 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 ( $0^\circ$ ).

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

FIGURA 13

Comparación de diagramas de antena

Comparación de los diagramas de la Rec. UIT-R M.1652 con los diagramas de  $\text{COS}^2$   
 (Ejemplo, radar C: ganancia = 44 dBi, anchura de haz en  $EI = Az = 0,95^\circ$ , nivel del primer lóbulo lateral  $SLL = -35$  dB)



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

Los datos obtenidos de las trazas del contorno pueden utilizarse como herramientas de análisis de simulación. Puede aproximarse fácilmente el diagrama de antena tridimensional (3-D) multiplicando los cortes de tensión del plano principal horizontal y vertical. Para ello, se sitúa el diagrama del plano principal vertical en la columna central de una matriz cuadrada y se fija el resto de elementos a cero. Se sitúa el diagrama del plano principal horizontal en la fila central de una matriz cuadrada y se fija el resto de elementos a cero. Se multiplican las dos matrices y se dibuja el gráfico. Obsérvese que todos los diagramas deben estar normalizados.

La ecuación para calcular los diagramas 3-D es la siguiente:

$$P_{i,h} = 20 \log \left[ \sum_{k=0}^N |H_{k,i} V_{h,k}| \right] \quad (17)$$

donde las matrices de elevación y acimut, en unidades de voltios, se definen en las ecuaciones (18) y (19).

El diagrama vertical viene dado por:

$$\text{Matriz vertical } (V_{h,k}) = \begin{vmatrix} 0 & \dots & 0 & El_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 0 & El_3 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & El_{N-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & El_N & 0 & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (18)$$

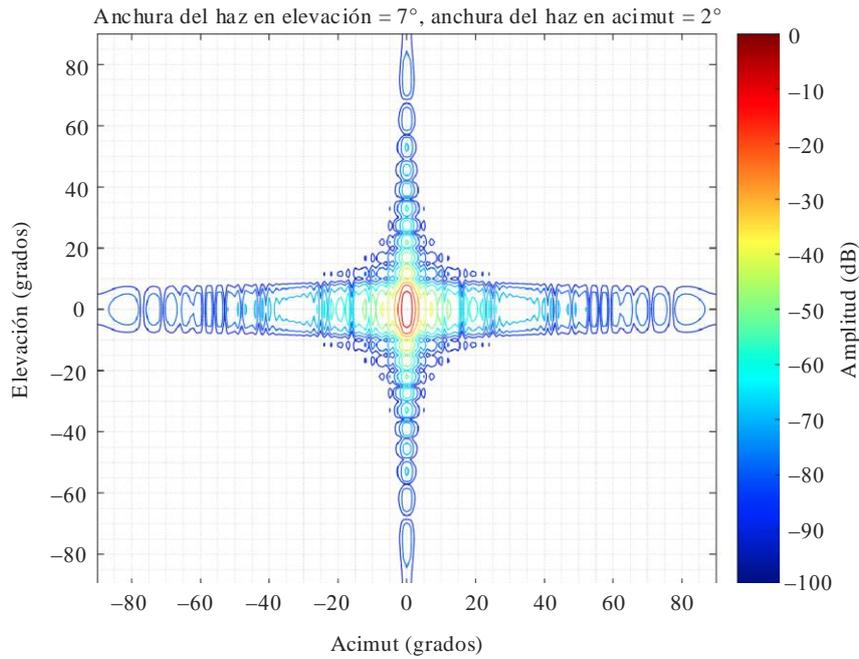
El diagrama horizontal viene dado por:

$$\text{Matriz horizontal } (H_{k,i}) = \begin{vmatrix} 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ Az_1 & Az_2 & & & Az_{N-1} & Az_N \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{vmatrix} \quad (19)$$

Las Figs. 14 y 15 muestran un ejemplo de diagrama 3-D.

FIGURA 14

Diagrama de contorno normalizado (dB)

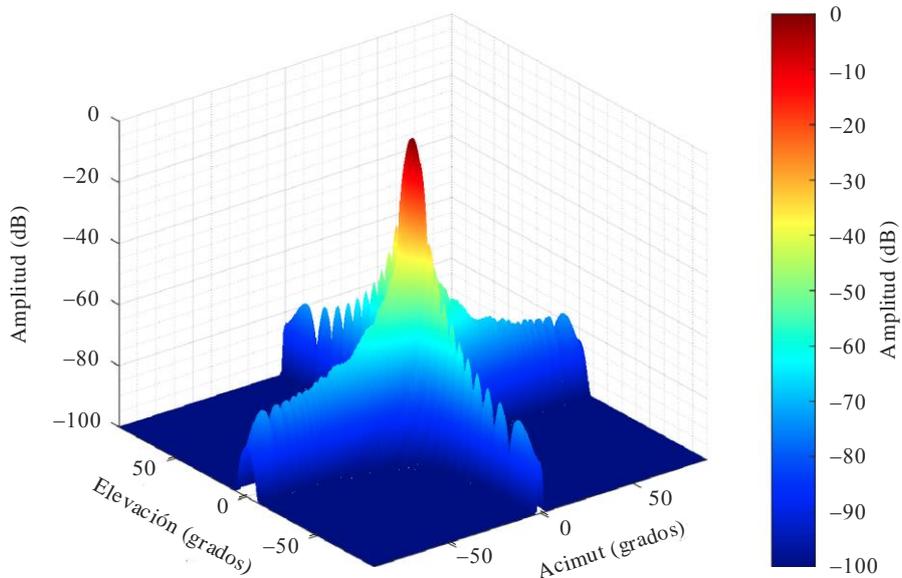


M.1851-14

FIGURA 15

Ejemplo de traza tridimensional de antena en acimut y en elevación relativos con distribución de campo uniforme de una apertura rectangular y atenuación (dB) frente al ángulo con respecto al eje;  $\theta$  (elevación en grados) y  $\phi$  (acimut en grados)

Anchura del haz en elevación =  $7^\circ$ , anchura del haz en acimut =  $2^\circ$



M.1851-15

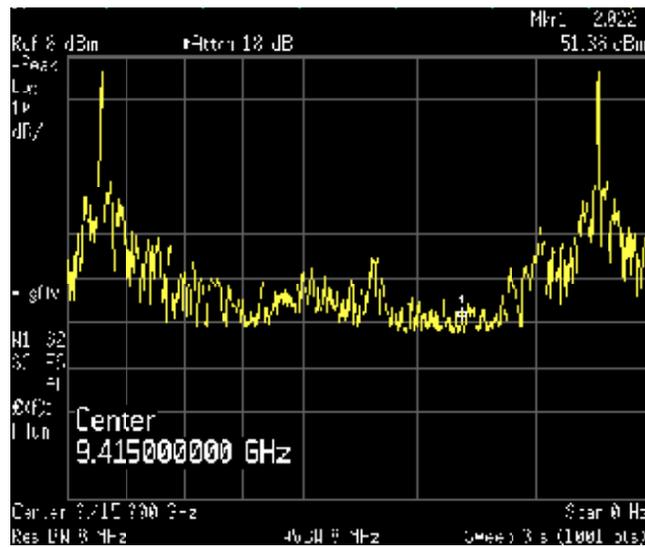
## 6 Ejemplos de diagrama medido

Las Figs. 16 y 17 ilustran ejemplos de diagramas de antena de radar medidos en la banda de 9 GHz. El eje X representa el ángulo acimutal ampliado a un valor superior a  $360^\circ$ , y el eje Y representa el nivel de potencia recibido en cada ángulo acimutal. Este diagrama de potencia debe ser objeto de

normalización respecto de su valor máximo o de una antena isotrópica para adquirir la categoría de diagrama de antena o de directividad, respectivamente.

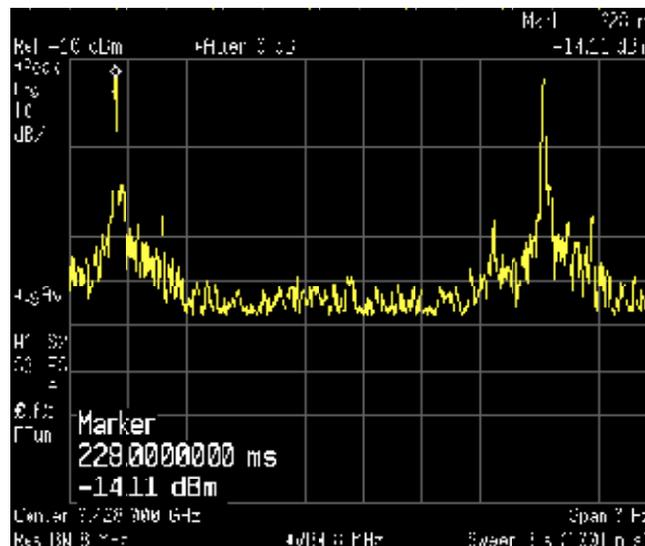
Del primer análisis de estos diagramas de antena medidos se colige que los primeros lóbulos laterales aparecen en torno a los  $-30$  dBc, con una pendiente notable en los lóbulos laterales, de la que se puede inferir, a grandes líneas, la aplicación de una ley de iluminación de apertura en  $\cos^2$ . En este caso, el nivel mínimo de máscara teórica de  $-60$  dBc que conlleva el modelo de  $\cos^2$  podría parecer demasiado bajo, dada la presencia de lóbulos posteriores y de difracción trasera en el diagrama de antena. A continuación, en caso de necesidad, se alentaría la utilización de diagramas de antena reales en lugar de teóricos cuando sea posible.

FIGURA 16  
Ejemplo de traza de antena medida



M.1851-16

FIGURA 17  
Ejemplo de traza de antena medida

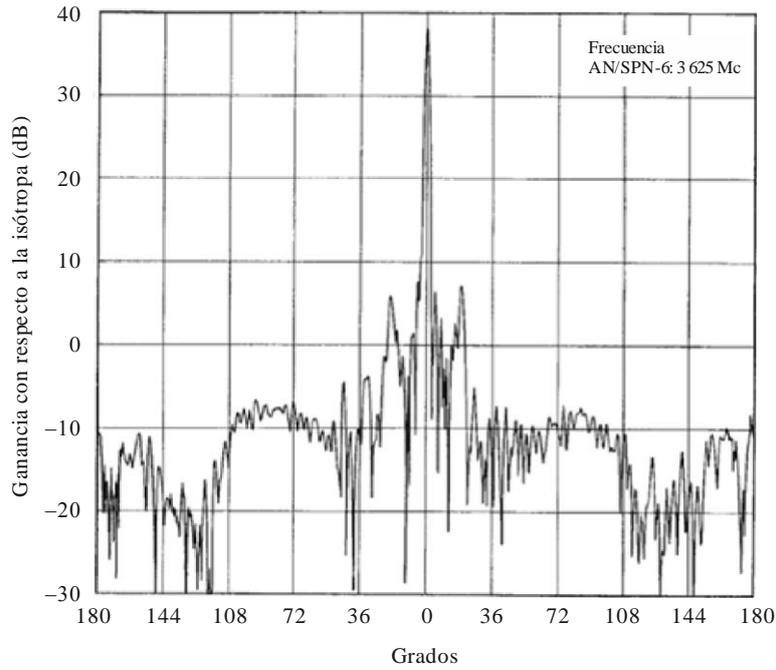


M.1851-17

Las Figs. 18 y 19 ilustran ejemplos adicionales.

FIGURA 18

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

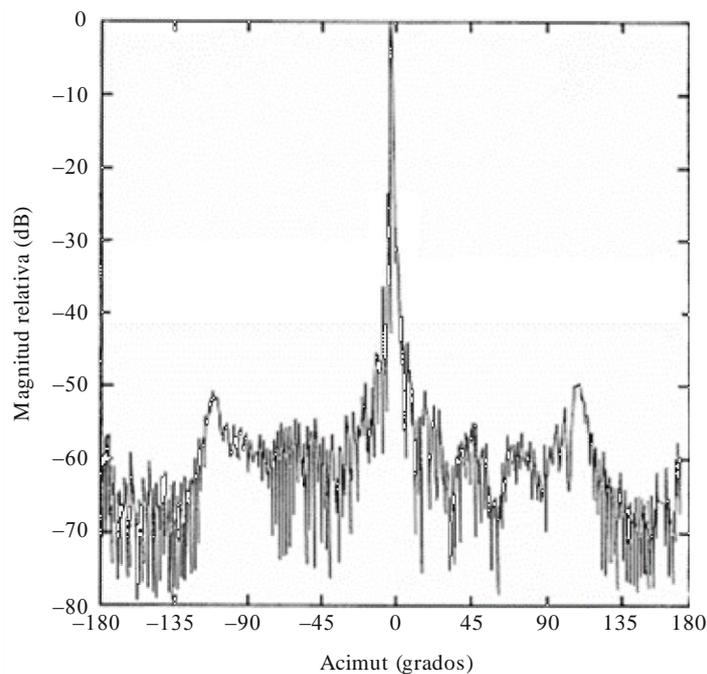


M.1851-1 8

Fuente: *Statistical Characteristics of Gain and Mutual Gain of Radar Antennas*, proyecto N.º SF 010 204, tarea 5727, Departamento de la Marina, 15 de septiembre de 1963.

FIGURA 19

Diagrama de antena de radar Doppler de radar meteorológico con un 1º lóbulo lateral a 25 dB y una relación anterior-posterior de 60 dB



M.1851-1 9

Fuente: *Manual Meteorológico Federal de los EE. UU.* N.º 11, diciembre de 2005, Parte B, FCM-H11B-2005.

## 7 Diagramas de antenas compuestas de elementos enfasados

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

$$g(\theta) = f(\theta) \cdot \frac{1}{N} |AF(\theta)|^2 \quad (20)$$

siendo:

- $g$ : diagrama de ganancia de antena lineal uniforme normalizado
- $f$ : diagrama de ganancia de elementos radiantes elementales normalizado, insertado en la antena lineal uniforme
- $N$ : número de elementos radiantes elementales
- $AF$ : factor de antena lineal uniforme;  $\psi$  (radianes):

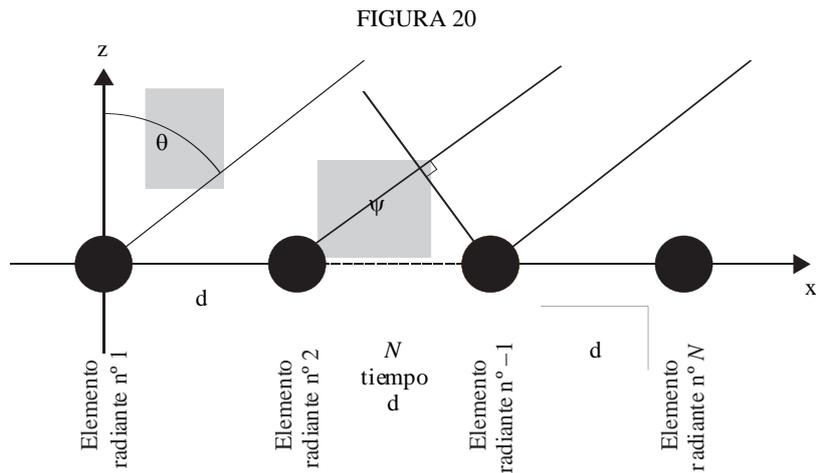
$$AF(\theta) = \frac{\text{sen}\left(\frac{N\Psi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\Psi}{2}\right)}$$

con

$$\Psi = 2\pi(d/\lambda)(\text{sen}(\theta) - \text{sen}(\omega)) \quad (22)$$

siendo:

- $d$ : espacio regular entre elementos radiantes elementales uniformes
- $\lambda$ : longitud de onda en la frecuencia objeto de estudio
- $\omega$ : ángulo de orientación del haz electrónicamente
- $\theta$ : ángulo con respecto al eje.

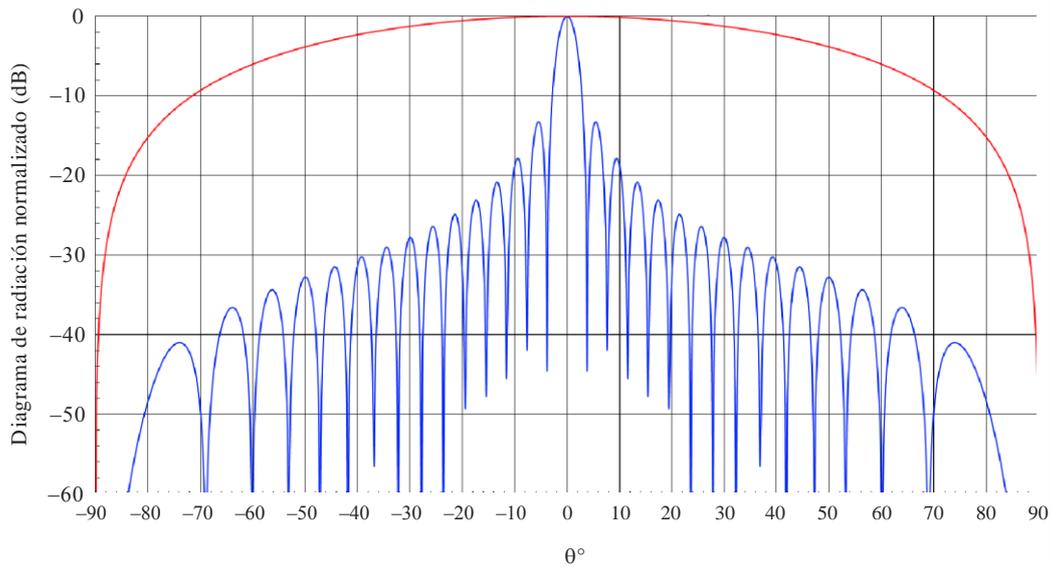


El carácter específico de las antenas compuestas de elementos enfasados permite dirigir electrónicamente el lóbulo principal del diagrama de antena dentro de una gama de  $\pm 90^\circ$  desde el eje de puntería de la antena mecánica. Los efectos específicos de los lóbulos laterales en los ángulos  $\omega$  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. 22). 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. 24).

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. 23). 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. 24).

FIGURA 21

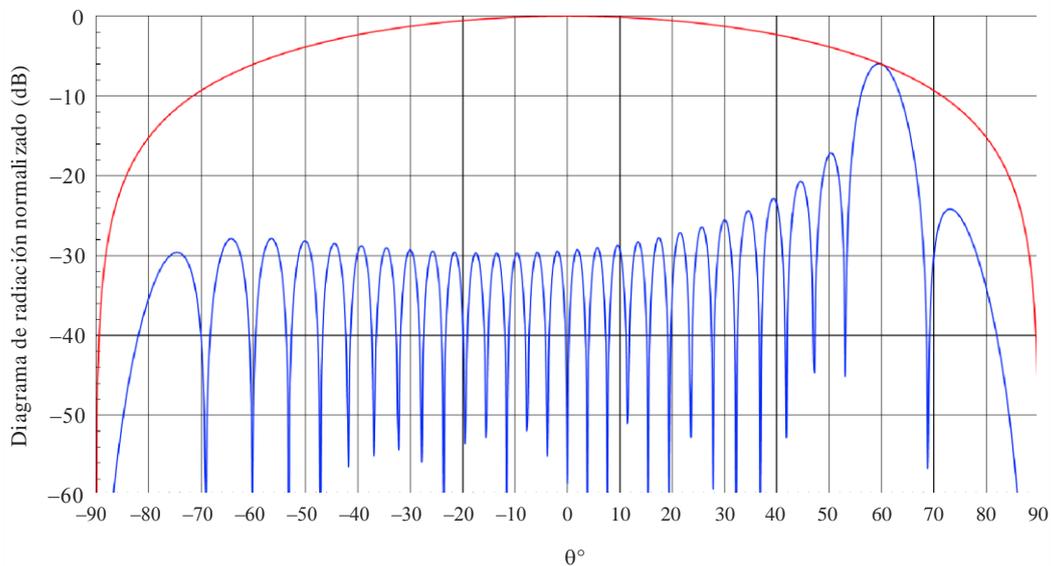
**Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $\lambda/2$  (curva azul) y un diagrama de radiación en coseno<sup>2</sup> (curva roja) orientado hacia el eje puntería**



M.1851-21

FIGURA 22

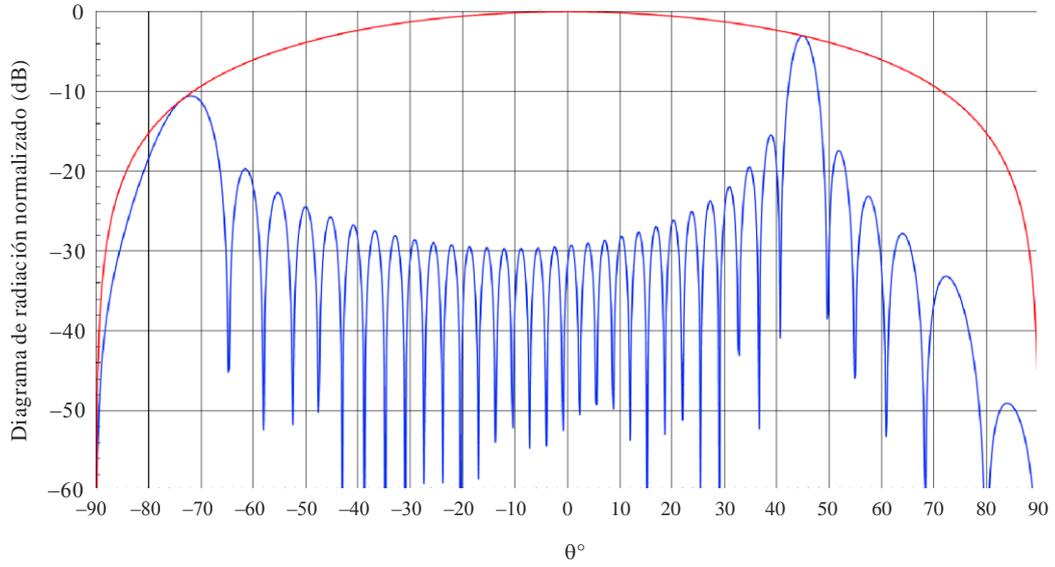
**Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $\lambda/2$  (curva azul) y un diagrama de radiación en coseno<sup>2</sup> (curva roja) a  $60^\circ$**



M.1851-22

FIGURA 23

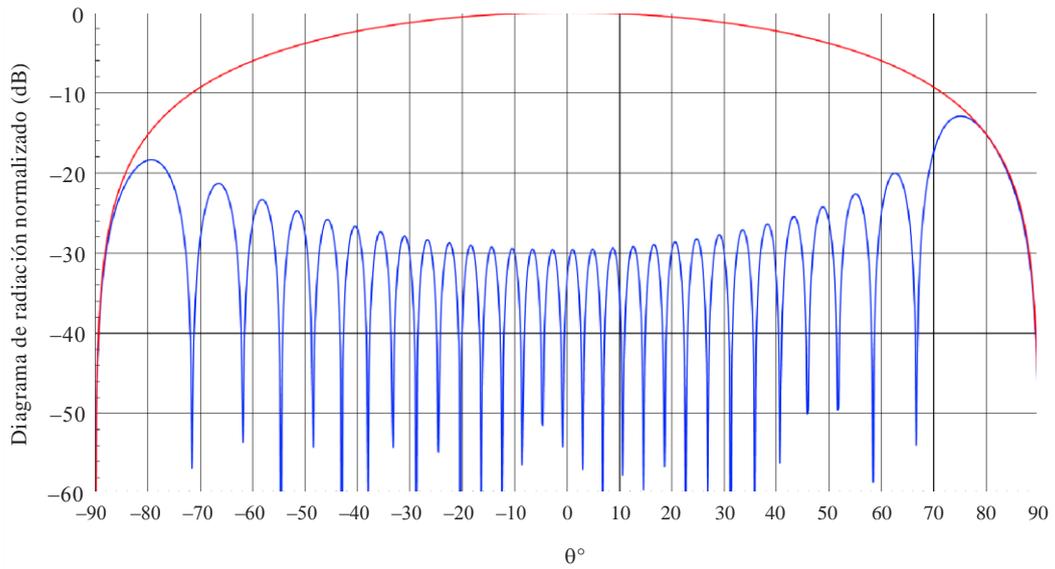
Diagrama de radiación teórico de una matriz lineal uniforme de 30 elementos radiantes con una retícula de  $0,6\lambda$  (curva azul) y un diagrama de radiación en coseno<sup>2</sup> (curva roja) a  $45^\circ$



M.1851-23

FIGURA 24

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



M.1851-24