RECOMENDACIÓN UIT-R S.672-4*

Diagramas de radiación de antenas de satélite para utilizar como objetivo de diseño en el servicio fijo por satélite que emplea satélites geoestacionarios

(1990-1992-1993-1995-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

a) que el empleo de antenas de estación espacial con los mejores diagramas de radiación actuales conducirá a una utilización más eficaz del espectro radioeléctrico y de la órbita de los satélites geoestacionarios;

b) que en las estaciones espaciales operacionales se utilizan tanto antenas elípticas (o circulares) con un solo alimentador, como antenas de haz conformado con múltiples alimentadores;

c) que aunque se está perfeccionando el diseño de antenas de estación espacial, todavía se requiere información antes de que pueda adoptarse un diagrama de radiación de referencia a fines de coordinación;

d) que la adopción de un diagrama de radiación que sirva de objetivo de diseño para las antenas de estación espacial estimulará la fabricación y utilización de antenas que contribuyan a una utilización eficaz de la órbita;

e) que a fines de coordinación sólo es necesario especificar las características de radiación de la antena de la estación espacial en las direcciones de la interferencia potencial;

f) que para una aplicación más amplia, las expresiones matemáticas deberían concordar de la manera más sencilla posible con las predicciones efectivas;

g) que, sin embargo, esas expresiones deberían tener en cuenta las características de sistemas de antenas reales y ser adaptables a las nuevas tecnologías;

h) que las dificultades de medición dan lugar a imprecisiones en el modelo de las antenas de vehículo espacial para ángulos grandes a partir del eje;

j) que las dificultades debidas al tamaño de los lanzadores originan, a su vez, limitaciones en los valores de la relación D/λ de las antenas de satélite, sobre todo a frecuencias bajas, tales como las de las bandas de 6/4 GHz;

k) que en el Anexo 1 figuran los parámetros del diagrama de radiación de las antenas de estación espacial, tales como el punto de referencia, la zona de cobertura y la ganancia máxima equivalente, que puedan utilizarse para definir un diagrama de antena de estación espacial de referencia;

l) que se han desarrollado dos programas de computador para calcular los contornos de cobertura (véase el Anexo 2),

^{*} La Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2001 de conformidad con la Resolución UIT-R 44 (AR-2000).

recomienda

1 que en el caso de las antenas de satélite con haces circulares o elípticos y un solo alimentador empleadas en el servicio fijo por satélite (SFS), se utilice el siguiente diagrama de radiación como objetivo de diseño fuera de la zona de cobertura:

 $G(\psi) = G_m - 3 (\psi/\psi_b)^{\alpha} \quad \text{dBi} \qquad \text{para} \quad \psi_b \le \psi \le a \,\psi_b \tag{1}$

$G(\psi) = G_m + L_N + 20\log z$	dBi	para	$a \psi_b < \psi \le 0.5 b \psi_b$	(2a)
$G(\mathbf{\psi}) = G_m + L_N$	dBi	para 0,	$5b\psi_b < \psi \le b\psi_b$	(2b)
$G(\psi) = X - 25 \log \psi$	dBi	para	$b \psi_b < \psi \le Y$	(3)
$G(\mathbf{\psi}) = L_F$	dBi	para	$Y < \psi \le 90^{\circ}$	(4a)

$$G(\psi) = L_B$$
 dBi para $90^\circ < \psi \le 180^\circ$ (4b)

donde:

$$X = G_m + L_N + 25 \log (b \psi_h)$$
 y $Y = b \psi_h 10^{0.04(G_m + L_N - L_F)}$

- $G(\psi)$: ganancia para un ángulo ψ respecto a la dirección del haz principal (dBi)
 - G_m : ganancia máxima en la dirección del lóbulo principal (dBi)
 - ψ_b : mitad de la abertura del haz a 3 dB en el plano considerado (3 dB por debajo de G_m) (grados)
 - L_N : nivel de los lóbulos laterales próximos con relación a la ganancia máxima (dB) que exige el diseño del sistema
 - $L_F = 0$ dBi nivel de los lóbulos laterales lejanos (dBi)
 - z: (eje mayor/eje menor) para el haz de radiación
 - *L_B*: $15 + L_N + 0.25 G_m + 5 \log z dBi o 0 dBi$, tomándose entre ambos el valor más elevado.

NOTA 1 – Los diagramas aplicables a los haces elípticos exigen verificación experimental. Los valores de a que aparecen en el Cuadro 1 son provisionales.

L_N (dB)	а	b	α
-20	2,58 $\sqrt{(1 - \log z)}$	6,32	2
-25	2,58 $\sqrt{(1 - 0.8 \log z)}$	6,32	2
-30	-	6,32	Ι

CUADRO 1

Los valores numéricos de *a*, *b* y α para valores de $L_N = -20$ dB y -25 dB figuran en el Cuadro 1. La determinación de *a* y α para $L_N = -30$ dB requiere ulterior estudio; se invita a las administraciones a que faciliten datos que permitan determinar los valores de *a* y α para $L_N = -30$ dB;

2 que para las antenas de vehículos espaciales con haces conformados de múltiples alimentadores, en el SFS, se utilice como objetivo de diseño el diagrama de radiación seleccionado a partir de las fórmulas siguientes, dependiendo de la clase de antena y de la gama de valores de la relación de exploración.

Definición de clases de antenas

- Definición de antenas de clase A:
 - Las antenas de clase A son aquellas en las que la posición bajo el eje de puntería se encuentra dentro de la zona de cobertura.
- Definición de antenas de clase B:

Las antenas de clase B son aquellas en las que la posición bajo el eje de puntería está fuera de las zonas de cobertura para uno o más de los haces.

Definición de relación de exploración

Existen dos definiciones de relación de exploración:

La relación de exploración, δ , que se menciona en el § 2.1 se define como la distancia angular entre el centro de la cobertura (definido como el centro de la elipse de área mínima) y el punto del borde de la zona de cobertura, dividida por la abertura angular del haz componente.

La relación de exploración, *S*, utilizada en los § 2.2 y 2.3 se define como la distancia angular entre el eje de puntería de la antena y el punto del borde de la zona de cobertura, dividida por la abertura angular del haz componente.

En la determinación inicial de la parte del *recomienda* que es aplicable a una antena específica de clase A, debe utilizarse la definición de relación de exploración δ ;

2.1 que para antenas de clase A con valores de relación de exploración $\delta \le 3.5$:

$$G_{\text{dBi}} (\Delta \psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0.256 - 13.065 \left(\frac{\Delta \psi}{Q \psi_0} + 0.5\right)^2 & \text{para} & 0 \le \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le 0.8904 \, Q \\ G_{ep} - 25 & \text{para} & 0.8904 \, Q < \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le 1.9244 \, Q \\ G_{ep} - 25 + 20 \log\left(\frac{1.9244 \, Q \, \psi_0}{\Delta \psi}\right) & \text{para} & 1.9244 \, Q < \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le 18/\psi_0 \end{cases}$$

donde:

- $\Delta \psi$: ángulo (grados) a partir del contorno de cobertura convexo a un punto fuera de la región de cobertura en una dirección normal a los lados del contorno
- G_{ep} : ganancia de cresta equivalente (dBi)

$$= G_e + 3,0$$

 ψ_0 : abertura del haz de la potencia mitad del haz componente (grados)

- $= 72 (\lambda/D)$
 - λ : longitud de onda (m)

D: diámetro físico del reflector (m)

$$Q = 10^{\left(\frac{0,000075(\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0,02)]^2}\right)}$$

- δ : relación de exploración tal como se define en el § 2 anterior
- F/D_p : relación entre la longitud focal del reflector F y el diámetro D_p de la parábola correspondiente

$$D_p = 2(d + h)$$

d: diámetro de la apertura proyectada del paraboloide descentrado

h: altura descentrada al borde del reflector;

2.2 que para las antenas de clase A con valores de relación de exploración $S \ge 5$:

$$G_{\text{dBi}}\left(\Delta\psi\right) = \begin{cases} G_e - B\left[\left(1 + \frac{\Delta\psi}{\psi_b}\right)^2 - 1\right] & \text{para} & 0^\circ \leq \Delta\psi \leq C\,\psi_b \\ G_e - 22 & \text{para} & C\,\psi_b < \Delta\psi \leq (C + 4,5)\,\psi_b \\ G_e - 22 + 20\log_{10}\left[\frac{(C + 4,5)\,\psi_b}{\Delta\psi}\right] & \text{para} & (C + 4,5)\,\psi_b < \Delta\psi \leq 18^\circ \end{cases}$$

donde:

- ángulo (grados) a partir del contorno de cobertura convexo en una dirección $\Delta \psi$: normal a los lados del contorno
- G_e : ganancia en el borde de la zona de cobertura (dBi)

$$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B \text{ para } S \ge 5$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

$$\psi_b$$
: radio del haz puntual

$$= 36 \lambda/D$$

ſ

- λ : longitud de onda (m)
- D: diámetro físico del reflector (m)

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

- *S*: relación de exploración, tal como se define en el § 2 anterior
- F/D: relación entre la longitud focal y el diámetro físico de la antena;

2.3 que para antenas de clase B que utilizan únicamente la relación de exploración S (para $S \ge 0$):

$$G_{\text{dBi}} (\Delta \Psi) = \begin{cases} G_e - B \left[\left(1 + \frac{\Delta \Psi}{\Psi_b} \right)^2 - 1 \right] & \text{para} & 0^\circ \leq \Delta \Psi \leq C \, \Psi_b \\ G_e - 17 + 18,7012 \log_{10} \left(\cos \left[\frac{\Delta \Psi - C \, \Psi_b}{\Psi_b} \right] \right) & \text{para} & C \, \Psi_b < \Delta \Psi \leq (C+1) \, \Psi_b \\ G_e - 22 & \text{para} & (C+1) \, \Psi_b < \Delta \Psi \leq (C+4,5) \, \Psi_b \\ G_e - 22 + 20 \log_{10} \left[\frac{(C+4,5)\Psi_b}{\Delta \Psi} \right] & \text{para} & (C+4,5) \, \Psi_b < \Delta \Psi \leq 18^\circ \end{cases}$$

donde:

- ángulo (grados) a partir del contorno de cobertura convexo en una dirección $\Delta \psi$: normal a los lados del contorno
- ganancia en el borde de la zona de cobertura (dBi) G_e :

$$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B \text{ para } S \ge 0$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

radio del haz puntual Ψ_b :

 $= 36 \lambda/D$

 λ : longitud de onda (m)

D: diámetro físico del reflector (m)

$$C = \sqrt{1 + \frac{17}{B}} - 1$$

S: relación de exploración tal como se define en el § 2 anterior

F/D: relación entre la longitud local y el diámetro físico de la antena;

2.4 que para las antenas de clase A con valores de relación de exploración entre $\delta > 3,5$ y S < 5, el objetivo de diseño sigue en estudio. Se precisan estudios en particular sobre la ampliación a esta región de las ecuaciones dadas en los § 2.1 y 2.2. En el Anexo 1 se describe un posible método para ampliar el objetivo de diseño a esta región. Para la definición de relaciones de exploración, δ y *S*, y sus aplicaciones, véase el § 2;

2.5 que las siguientes Notas se consideren parte de los anteriores § 2.1 y 2.2:

NOTA 1 – Se definirá la zona de cobertura como el contorno definido por el polígono que une los puntos que rodean la zona de servicio, empleando el método indicado en el Anexo 2.

NOTA 2 – En el caso de los cortes, cuando el contorno de ganancia a -3 dB quede fuera del contorno de la zona de cobertura construida, el diagrama objetivo de diseño debe basarse en el contorno de ganancia a -3 dB.

NOTA 3 – La presente Recomendación se aplicará sólo en la dirección de un sistema sensible a la interferencia, es decir, no hace falta que se aplique en aquellas direcciones en las que no exista ninguna posibilidad de causar interferencias a otras redes (por ejemplo, regiones oceánicas inhabitadas o regiones fuera del horizonte terrestre). El 10% de los cortes pueden superar el diagrama objetivo de diseño.

NOTA 4 – La presente Recomendación no se aplica a las antenas que funcionan en banda de frecuencia doble. Las antenas que utilizan el error de fase inducido por el reflector para lograr ensanchamiento del haz pertenecen a esta categoría y requieren estudios ulteriores.

ANEXO 1

Diagramas de antenas de satélite en el servicio fijo por satélite

1 Diagramas de radiación de referencia de las antenas de satélite

1.1 Haces circulares con un solo alimentador

El diagrama de radiación de la antena del satélite es importante tanto en la región del lóbulo principal como en la de los lóbulos laterales más lejanos. De ahí que los diagramas posibles comiencen en el contorno a -3 dB del lóbulo principal y se dividan en las cuatro regiones que se ilustran en la Fig. 1.

Sin embargo, se tropieza con dificultades para aplicar a un haz no circular el diagrama postulado. Se invita por lo tanto a las administraciones a que presenten mediciones de diagramas de radiación de antenas con haces que no sean circulares simples.





Ángulo relativo con respecto al eje, ψ/ψ_0

$G(\Psi) = G_m - 3 (\Psi/\Psi_0)^2$	dBi	para	$\Psi_0 \leq \Psi \leq a \Psi_0$	(I)
$G(\Psi) = G_m + L_s$	dBi	para	$a \psi_0 < \psi \le b \psi_0$	(II)
$G(\psi) = G_m + L_s + 20 - 25 \log (\psi/\psi_0)$	dBi	para	$b \psi_0 < \psi \le \psi_1$	(III)
$G(\psi) = 0$	dBi	para	$\psi_1 < \psi$	(IV)

siendo:

 $G(\psi)$: ganancia para un ángulo ψ respecto del eje del haz (dBi)

 G_m : ganancia máxima en la dirección del lóbulo principal (dBi)

 Ψ_0 : mitad de la anchura del haz a 3 dB en el plano considerado (3 dB por debajo de G_m) (grados)

 Ψ_1 : valor de ψ cuando $G(\psi)$ en la ecuación (III) es igual a 0 dBi

 L_s : nivel requerido de los lóbulos laterales próximos (dB) con respecto a la ganancia máxima

a, *b*: los valores numéricos que se indican a continuación:

L _s	а	b
- 20	2,58	6,32
- 25	2,88	6,32
- 30	3,16	6,32

0672-01

1.2 Haces elípticos con un solo alimentador

Las funciones indicadas en la Fig. 1 definen una envolvente máxima para los primeros lóbulos laterales a un nivel de –20 dB respecto a la ganancia máxima, y este diagrama se aplica a antenas de diseño sencillo. Sin embargo, en interés de una mejor utilización de la capacidad de la órbita, puede ser deseable reducir este nivel a –30 dB y utilizar antenas de diseño más complicado. El diagrama adoptado por la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones para la radiodifusión por satélite (Ginebra, 1977) (CAMR RS-77) para las antenas de satélites de radiodifusión satisface

esta exigencia, y se está consiguiendo ya, por lo que debe aplicarse en ese caso. Pueden ser convenientes estudios adicionales para determinar la viabilidad de obtener niveles de lóbulos laterales reducidos en la práctica, particularmente con relación a las bandas de 6/4 GHz.

1.3 Haces conformados con alimentación múltiple

Un diagrama similar aplicable a los haces conformados debe basarse en un análisis de varios de dichos haces y también en consideraciones teóricas. Deben especificarse parámetros adicionales, tales como el diámetro del haz elemental y el nivel de los dos primeros lóbulos laterales. Además, la sección transversal y los medios de medición de ángulos forman parte de la definición del diagrama.

La consideración importante en la producción de tal referencia es la discriminación a conseguir a partir del borde de cobertura de todos los tipos de antena, incluyendo la de haz conformado más compleja, en función de la separación angular de las zonas de cobertura, vistas desde la órbita. El diagrama de radiación de una antena de haz conformado es exclusivo de la misma, y viene determinado principalmente por los siguientes factores operacionales y técnicos:

- configuración de la zona de cobertura,
- longitud del satélite,
- apertura máxima de la antena,
- diseño del alimentador y decrecimiento gradual de la iluminación,
- diámetro de la apertura del reflector normalizado (D/λ) ,
- relación entre la distancia focal y el diámetro de apertura (F/D),
- número de reutilizaciones de frecuencia y de haces independientes,
- número de elementos alimentadores utilizados,
- anchuras de banda,
- requisitos de ortogonalidad en la polarización,
- región de cobertura angular total ofrecida,
- estabilidad de fase del elemento alimentador y excitaciones de amplitud,
- requisitos sobre posibilidad de reconfiguración,
- número de posiciones orbitales desde las que hay que ofrecer coberturas del haz,
- tolerancias conseguidas en la superficie del reflector,
- puntería del haz (obtenida de la ubicación del satélite o por emplazamiento independiente del haz mediante radiobalizas de seguimiento desde Tierra),
- degradaciones de las componentes del haz debidas a aberraciones en la exploración relacionadas con la configuración específica del reflector o de la antena (reflector sencillo, reflector doble, sistemas de reflector conformado sin eje focal, sistemas de radiación directa, etc.).

Por todo lo anterior, pueden presentarse algunas dificultades en el desarrollo de un diagrama de radiación de referencia único para las antenas de haz conformado.

El diagrama de referencia de la Fig. 1 no es satisfactorio para las antenas de haz conformado, puesto que un parámetro esencial del diagrama de referencia es ψ_0 , mitad de la anchura de haz a -3 dB, en tanto que el centro del haz de un haz conformado está mal definido y no corresponde en gran medida a la respuesta fuera del haz. Un diagrama de referencia sencillo compuesto de cuatro segmentos solamente, como se ilustra en la Fig. 2, puede ser más satisfactorio como base de un diagrama de referencia. La inclinación del borde de caída de este diagrama estaría en función de la distancia angular fuera del contorno de cobertura.



Posible forma del diagrama de radiación de referencia



Otro parámetro que es preciso definir es la dirección particular en que medir esta distancia angular. Un método consiste en medir este ángulo ortogonal desde el contorno de ganancia constante que corresponda más a la zona de cobertura. Este método plantea dificultades cuando algunas partes del contorno de la ganancia son cóncavas, como ocurre con los diagramas conformados crecientes. Para este tipo de diagramas, la dirección ortogonal alejada de un contorno puede cortarse con la ganancia de la zona de cobertura. Desde el punto de vista del diseño de la antena, la dificultad para lograr una buena discriminación en la porción cóncava de un diagrama aumenta con el grado de concavidad. Otro método que permite obviar estos problemas consiste en circunscribir la zona de cobertura mediante un contorno sin concavidad, y medir luego los ángulos ortogonalmente desde este contorno, que se considera como borde de cobertura. Pueden aplicarse otros métodos para definir la dirección de medición; por ejemplo, puede utilizarse como punto de referencia el centro de una elipse circunscrita, pero para todo diagrama de referencia se necesita una definición inequívoca (véanse los § 2.1 y 2.2).

Una vez definida la dirección, los diagramas de radiación pueden dividirse en las siguientes cuatro regiones de interés:

Región a: Borde de caída del lóbulo principal (borde de cobertura con respecto al ángulo de discriminación límite)

Se supone que esta región abarca lo que se considera las regiones de cobertura adyacentes. El aislamiento requerido entre redes de satélites se obtendría mediante una combinación de discriminación de antena de satélite y separación orbital.

Una función sencilla para representar esta región podría revestir una forma análoga a la indicada en la ecuación (I) de la Fig. 1.

Región b: Región de cobertura no adyacente

Esta región comienza donde el diagrama de radiación produce suficiente discriminación para permitir a satélites que ocupan casi la misma posición dar servicio a zonas no adyacentes ($\Delta \psi_L$ en la Fig. 2). La discriminación límite (L_s) puede hallarse entre -20 y -30 dB.

Región c: Región de lóbulos laterales lejanos

Región d: Región del lóbulo posterior

Cada una de estas regiones cubre los lóbulos laterales de orden más elevado y se aplica a zonas de servicio muy espaciadas y, en aquellas bandas de frecuencia utilizadas de forma bidireccional, a partes de la órbita. En este último caso hay que tener cuidado cuando se consideren ángulos muy alejados del eje, puesto que las reflexiones imprevistas en el «bus» del satélite y los desbordamientos provocados por el reflector principal pueden producir efectos significativos. Hasta obtener más información al respecto se sugiere utilizar una envolvente de la ganancia mínima de 0 dBi (Región d de la Fig. 2).

2 Modelos de diagrama de radiación de haz conformado

A efectos de establecer un modelo de haz conformado previo al diseño práctico de la antena, podría utilizarse un diagrama de referencia simplificado. Se presentan a continuación dos modelos que pueden generar diagramas de ese tipo y sus parámetros asociados. Los dos modelos pueden utilizarse para realizar estudios de interferencia con ayuda de computador y, si se utilizan conjuntamente con mapas coordenados con respecto a un satélite, para aplicaciones manuales. En una última fase, esos modelos podrían servir de base para establecer un diagrama o diagramas que son objeto de la presente Recomendación. Sin embargo, sería aconsejable aplicar los «perfiles» de diagrama resultantes sólo en la dirección de un sistema sensible a la interferencia. En otras palabras, no deben aplicarse en direcciones en que no haya posibilidad de interferir a otras redes (es decir, fuera del contorno de la Tierra, en regiones oceánicas inhabitadas, etc.).

2.1 Representación de la zona de cobertura

Son varios los métodos que se han propuesto anteriormente para la representación de la zona de servicio de las antenas del SFS. Uno de ellos consiste en medir la distancia angular externa a la zona de cobertura en una dirección normal a la superficie de la zona de servicio (contorno de ganancia constante), tal como ésta se ve desde el satélite. En la práctica, el contorno de ganancia se diseña de modo que se ajuste lo mejor posible a la zona de servicio, por lo que es de prever que entre la medición sobre la zona de servicio y la medición sobre el contorno de ganancia constante haya muy poca diferencia. Sin embargo, en ciertos casos en que hay partes de los contornos de ganancia cóncavas, como en los diagramas con forma de media luna, este método plantea dificultades. En tales diagramas, la dirección ortogonal hacia el exterior del contorno puede cortar una segunda vez la zona de cobertura, creando así ambigüedades (Fig. 3a)). Otra dificultad que se plantea en este caso radica en que en una determinada ubicación situada fuera de la zona de cobertura puede haber más de un punto de la zona de servicio en que la línea que une al observador con el punto de dicha zona sea normal al contorno de ésta en dicho punto (Fig. 3a)).

Sin embargo, se ha elaborado un método que soslaya las dificultades precedentemente mencionadas utilizando mediciones angulares normales a la zona de cobertura y diagramas de radiación que comprenden concavidades. Este método consta de varias construcciones gráficas y se expone paso por paso en el Anexo 2.

Además este procedimiento paso por paso se puede simplificar utilizando un contorno de cobertura sólo convexo. Para producir este contorno se sigue el procedimiento descrito en el Anexo 2, con la excepción de que sólo se consideran los ángulos convexos, es decir, aquéllos en los que el círculo está dentro del contorno de cobertura. El contorno de cobertura resultante se representa en la Fig. 3b).

Otra forma de representar los diagramas de haz conformado consiste en circunscribir la zona de cobertura real por una elipse de área mínima. La distancia angular se mide desde el borde de la elipse en dirección perpendicular a la periferia de la elipse. La ventaja del procedimiento consiste en la facilidad relativa de escribir programas de computador de alta eficiencia para definir este procedimiento de medición angular. Sin embargo, esta representación tiende a sobrestimar considerablemente la zona definida por la zona de servicio real.

Otro método de carácter mixto, proporciona una definición unívoca que permite representar la zona de cobertura de un haz conformado. El método consiste en inscribir la cobertura geográfica en una elipse de superficie mínima para definir el centro de la zona de cobertura. Éste no representa necesariamente el centro del haz, y sólo se utiliza para definir el eje de los cortes del diagrama. Una vez que se ha definido el centro de la zona de cobertura, la elipse de área mínima queda desprovista de aplicación.

Se utiliza entonces un polígono convexo para definir los límites de la zona de cobertura. El número de lados del polígono se determina basándose en que debe circunscribir la zona de cobertura de la forma más precisa posible y que debe ser de forma convexa. En la Fig. 3c) se muestra un ejemplo típico para la zona de servicio representada. Las direcciones angulares son radiales desde el centro de la zona de cobertura.

Para un lugar de observación externo a la zona de cobertura, la dirección de aplicación de la plantilla y las distancias angulares están definidas inequívocamente con respecto al centro de la zona de cobertura. Sin embargo, este método tiende a subestimar la separación angular entre los contornos de ganancia fuera de la zona de cobertura, cuando el ángulo del contorno radial con respecto al contorno de cobertura deja de ser normal de manera importante.

En resumen, el método más aceptable, tanto por lo que se refiere a exactitud como a facilidad de construcción, parece ser el empleo del contorno de cobertura sólo convexo, midiéndose la distancia angular según una dirección normal a los lados del contorno, tal como se muestra en la Fig. 3b).

2.2 Ganancia máxima equivalente

En las situaciones en que no es preciso ajustar el haz para compensar la variación de las condiciones de propagación a lo largo de toda la zona de servicio, la mínima ganancia en la zona de cobertura obtenida en el contorno de dicha zona se considera de un valor 3 dB inferior que la ganancia máxima equivalente (G_{ep}). En la práctica, la ganancia máxima real puede ser superior o inferior a la ganancia máxima equivalente y no tiene por qué producirse necesariamente en el eje.

En algunas situaciones puede existir una gran variación de las condiciones de propagación sobre la zona de servicio o puede que las características del servicio exijan un ajuste especial del haz a la forma de la zona de servicio. En estos casos, se calcula la mínima ganancia relativa que se precisa (con respecto a la ganancia media sobre el contorno de la zona de cobertura) en cada vértice del polígono y se utiliza una interpolación lineal para determinar la ganancia relativa en los acimutes intermedios partiendo del acimut del eje del haz. En estas condiciones, la ganancia en el contorno de la zona de cobertura depende de la dirección.

Obsérvese que si se trata de un haz conformado, la variación de la ganancia dentro de la zona de cobertura no se relaciona con la reducción de la ganancia en zonas más allá del borde de cobertura. El rendimiento de la antena dentro de la zona de cobertura, incluida la ganancia, no se relaciona con la interferencia introducida en sistemas adyacentes. La variación de la ganancia dentro de la zona de cobertura, por lo tanto no necesita caracterizarse en diagramas de referencia de haces conformados.







c)

0672-03

2.3 Tamaño del haz elemental

Los niveles de los lóbulos laterales se determinan a partir de la función iluminación de la apertura. Si se considera esta función de la forma:

$$f(x) = \cos^{N}\left(\frac{\pi}{2} \cdot x\right) \qquad |x| \le 1$$
(5)

esta función toma el valor de cero en el borde de la apertura para N > 0. El radio del pequeño haz elemental, en función del nivel de los lóbulos laterales (dB) y de la relación D/λ , viene dado, en el margen que interesa, aproximadamente por la fórmula:

$$\psi_b = (16,56 - 0,775 L_s) \lambda/D$$
 grados (6)

donde L_s es el nivel relativo (dB) de los dos primeros lóbulos laterales.

Esta expresión pone de manifiesto el compromiso existente entre el diámetro de la antena, el nivel de los lóbulos laterales y la inclinación de las regiones de caída del lóbulo principal. Se ha obtenido ajustando los resultados obtenidos mediante cálculos para diferentes niveles de lóbulos laterales. Esta relación se ha utilizado como punto de partida en los modelos descritos más abajo.

2.4 Desarrollo de modelos de diagrama copolar de referencia

En este punto se presentan varios diagramas copolares generalizados, para futuras antenas de haz conformado, basados en medidas realizadas sobre varias antenas de haz conformado (satélites Brazilsat, Anik-C, Anik-E, TDRSS, Intelsat-V, G-Star, Intelsat-VI, Intelsat-VII y Cobra) y en consideraciones teóricas.

Algunos modelos precedentes no permitían cuantificar los efectos de ensanchamiento del haz. Los modelos que se indican a continuación abordan desde dos puntos de vista distintos estos efectos, que son esenciales para predecir con exactitud el comportamiento de las antenas de haz conformado.

2.4.1 Primer modelo

El diagrama de haz conformado que se expone a continuación está basado en parámetros primarios y secundarios. Los parámetros primarios son: el tamaño del haz elemental, la anchura de la zona de cobertura en la dirección pertinente, y el nivel de cresta de los lóbulos laterales. Los parámetros secundarios son: el parámetro de bloqueo, la desviación de la superficie y el número de anchuras de haz exploradas. El efecto de los parámetros secundarios en la radiación de la antena es el ensanchamiento del haz principal y el aumento del nivel de los lóbulos laterales. Aunque el parámetro que más influye en el ensanchamiento del haz es el número de anchuras de haz exploradas, se indica también el efecto de los otros dos parámetros, para mayor detalle. Sin embargo, no debe pasarse por alto el efecto producido por el bloqueo sobre el nivel de los lóbulos laterales. Es cierto que, por limitaciones de orden práctico, incluso cuando el diseño de una antena de satélite requiere que se mantenga el criterio de ausencia de bloqueo, por lo general, hay un cierto nivel de bloqueo en el borde. En particular, el bloqueo en el borde es muy probable que ocurra en el caso de antenas de polarización lineal doble que utilizan una apertura común; así por ejemplo, los reflectores de rejilla doble utilizados en los satélites Anik-E, G-Star, Anik-C, Brazilsat, etc. Esto se debe a la separación requerida entre los focos de los dos reflectores solapados, para cumplir los requisitos de aislamiento y debido al volumen necesario para dar cabida a dos conjuntos de bocinas.

En las regiones de los lóbulos laterales alejados hay muy poca información medida en la cual basar un modelo. Las reflexiones producidas en la estructura del satélite, los desbordamientos producidos por los elementos del sistema de alimentación y la radiación directa procedente del agrupamiento de la alimentación pueden provocar incertidumbres, en los valores de los parámetros en direcciones angulares que se apartan bastante del eje, que invalidan las estimaciones teóricas realizadas. La medida en esta región es muy difícil y en consecuencia se precisan más estudios para ganar confianza en el modelo en esta región. Mientras tanto se recomienda una ganancia mínima de meseta de 0 dBi.

Hay que señalar que el diagrama que se sugiere sólo debe aplicarse en las direcciones en las que deba considerarse el nivel de los lóbulos laterales. En direcciones no críticas, por ejemplo regiones oceánicas o más allá del limbo de la Tierra o en cualquier otra dirección en la que no interesa conocer el valor de la interferencia, no es preciso que este diagrama sea un modelo representativo.

Modelo copolar general 1

Se propone el siguiente modelo de tres segmentos que representa la envolvente de un diagrama de radiación de la antena de un satélite de haz conformado fuera de la zona de cobertura:

Región del borde de caída del lóbulo principal:

$$G_{\rm dBi}(\Delta \psi) = G_{ep} + U - 4V \left(\frac{\Delta \psi}{Q \psi_0} + 0.5\right)^2 \qquad \text{para} \qquad 0 \le \Delta \psi \le W \cdot Q \cdot \psi_0$$

Región de lóbulos laterales adyacentes al principal:

$$G_{\text{dBi}}(\Delta \psi) = G_{ep} + SL$$
 para $W \cdot Q \cdot \psi_0 \le \Delta \psi \le Z \cdot Q \cdot \psi_0$

ángulo con respecto al borde de la zona de cobertura (grados)

Región de lóbulos laterales lejanos:

 $\Delta \Psi$:

 $G_{\text{dBi}}(\Delta \psi) = G_{ep} + SL + 20 \log (Z \cdot Q \cdot \psi_0 / \Delta \psi)$ para $Z \le \Delta \psi \le 18$ donde:

 $G_{\rm dBi}(\Delta \psi)$: ganancia (dBi) para $\Delta \psi$ ganancia máxima equivalente G_{en} : $G_{ep} = G_e + 3.0 \,(\text{dBi})$ diámetro para potencia mitad del haz principal (grados) Ψ_0 : $\Psi_0 \approx (33, 12 - 1, 55 SL) \lambda/D$ λ : longitud de onda (m) D: diámetro del reflector (m) nivel de lóbulos laterales con respecto al valor máximo (dB) SL: $U = 10 \log A$, V = 4,3429 B son los parámetros del haz principal $B = \left[\ln \left(0.5/10^{0.1SL} \right) \right] / \left[\left[(16,30 - 3,345 SL) / (16,56 - 0,775 SL) \right]^2 - 1 \right]$ $A = 0.5 \exp(B)$ W = (-0.26 - 2.57 SL) / (33.12 - 1.55 SL)Z = (77,18 - 2,445 SL) / (33,12 - 1,55 SL)*Q*: factor de ensanchamiento del haz debido a los efectos secundarios: $\left(0.000075 (\delta - 1/2)^2\right)$

$$Q = \exp\left[\left(8\,\pi^2\,\left(\epsilon/\lambda\right)^2\right] \cdot \left[\eta_i\,\left(\Delta\right)\right]^{-0.5} \cdot 10^{\left(\frac{f}{\left[\left(F/D_p\right)^2 + 0.02\right]^2}\right)}$$
(7)

Las variables de la ecuación (7) se definen como sigue:

- ε: error cuadrático medio (r.m.s.) de la superficie
- Δ : parámetro de bloqueo (raíz cuadrada de la relación entre la zona bloqueada y la zona de apertura)

 δ : número de anchuras de haz a partir de la dirección del eje

 $= \theta_0/\psi_0$

- θ_0 : separación angular entre el centro de la zona de cobertura (centro de la elipse de mínima área) y el borde de dicha zona de cobertura
 - $\eta_i(\Delta) = 1 \Delta^2$ para el caso de bloqueo central

= $[1 - [1 - A(1 - \Delta)^2]\Delta^2]^2$ para el caso de bloqueo en el borde (8)

A en la ecuación (8) es la altura del pedestal en la función de iluminación primaria $(1 - Ar^2)$ sobre el reflector y *r* es la distancia normalizada desde el centro en el plano de apertura del reflector (*r* = 1 en el borde). En la ecuación (7), *F*/*D*_{*p*} es el cociente entre la distancia focal y el diámetro de la parábola matriz. En la práctica, para un diseño de antena de satélite este cociente varía entre 0,35 y 0,45.

La ganancia en dirección de lóbulos laterales lejanos depende del desbordamiento del sistema de alimentación, y de los efectos de reflexión y refracción en la estructura del vehículo espacial. Estos efectos dependen de los diseños individuales y son, por tanto, de difícil generalización.

Como puede verse en la ecuación (7), el factor de ensanchamiento de haz, Q, depende del error cuadrático medio de superficie ε del parámetro de bloqueo Δ , del número de haces explorados δ y del cociente F/D_p . En la práctica, sin embargo, el efecto de ε y de Δ en el ensanchamiento del haz suele ser pequeño y puede despreciarse. De este modo, la ecuación (7) puede simplificarse así:

$$Q = 10^{\left(\frac{0,00075(\delta - 1/2)^2}{\left[(F/D_p)^2 + 0,02\right]^2}\right)}$$
(9)

donde:

 $D_p = 2(d + h)$ d: diámetro de la apertura proyectada del paraboloide descentrado

h: altura descentrada al borde del reflector.

La ecuación (9) pone claramente de manifiesto la dependencia del ensanchamiento de haz con respecto al número de haces explorados y al cociente F/D_p de la antena del satélite. Esta expresión es válida para un δ de hasta nueve anchuras de haz, valor más que suficiente para una cobertura global incluso en las bandas de 14/11 GHz, en la aplicación de otro modelo, para zonas de servicio del tamaño de Canadá, Estados Unidos de América o China, el valor de δ suele ser de uno o dos haces en la banda de 6/4 GHz y de unos cuatro haces en las bandas de 14/11 GHz. Así, para la mayoría de los sistemas el valor de Q suele estar por debajo de 1,1. En otras palabras, el efecto de ensanchamiento del haz es, por lo general, de aproximadamente el 10% de la anchura de banda del haz elemental de la antena de haz conformado.

Despreciando el ensanchamiento del haz principal debido al bloqueo y a los errores de superficie del reflector, y suponiendo un valor de caso más desfavorable de 0,35 para la relación F/D_p del reflector, el factor de ensanchamiento Q puede reducirse a:

$$Q = 10^{0,0037 (\delta - 1/2)^2}$$

En las bandas de 6/4 GHz puede obtenerse un nivel de lóbulos laterales de -25 dB sin gran dificultad utilizando una antena de bocina múltiple y reflector sólido, de aproximadamente 2 m de diámetro, cuya puesta en órbita sea posible mediante un lanzador del tipo PAM-D. Para lograr una discriminación de 30 dB se precisa una antena de mayor diámetro si hay que controlar o proteger un

margen angular apreciable. En las bandas de 14/11 GHz del SFS, la discriminación de 30 dB puede lograrse generalmente con la antena de 2 m de diámetro y el empleo de un alimentador de diseño más sofisticado.

Las ecuaciones anteriores para el diagrama de referencia dependen del ángulo de exploración del haz componente en el borde de cobertura en la dirección de cada corte particular para el que debe aplicarse el diagrama. Para un diagrama de referencia que se utilice como objetivo de diseño, es deseable un diagrama sencillo que dependa de un mínimo de parámetros. Por lo tanto, hay que seleccionar e incorporar en las ecuaciones anteriores un valor o valores de Q que sirvan para las coberturas típicas de satélite.

Se puede conseguir una pendiente de caída del haz principal más pronunciada en zonas de servicio de un satélite nacional típico en cooperación con zonas de cobertura regionales muy amplias; a la inversa, un diagrama de referencia que satisfaga una cobertura regional será demasiado holgado para coberturas de satélites nacionales.

Por lo tanto se propone simplificar el modelo 1 en los dos casos que se incluyen a continuación para las antenas de SFS. En tales casos, se supone un nivel uniforme del lóbulo lateral de -25 dB.

a) Zonas de cobertura pequeñas ($\delta < 3,5$)

La mayoría de las zonas de cobertura de los satélites nacionales se encuentran en esta categoría. Se toma el factor de ensanchamiento del haz Q como 1,10 para representar los diagramas de referencia de degradaciones de cuantía modesta en zonas de cobertura pequeña como:

$$G_{\rm dBi} (\Delta \psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0.256 - \frac{10.797}{\psi_0^2} (\Delta \psi + 0.55 \ \psi_0)^2 & \text{para} & 0 \le \Delta \psi \le 0.9794 \ \psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{para} & 0.9794 \ \psi_0 < \Delta \psi \le 2.1168 \ \psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log (2.1168 \ \psi_0 / \Delta \psi) & \text{para} & 2.1168 \ \psi_0 < \Delta \psi \le 18 \end{cases}$$

b) Zonas de cobertura grandes $(\delta > 3,5)$

Las coberturas de semi-haz y globales de INTELSAT e INMARSAT constituyen ejemplos de zonas de cobertura grandes. Para representar la degradación del diagrama debido a una exploración grande, se toma un valor de 1,3 para el factor Q. Los diagramas de referencia aplicables para estas coberturas ($\delta > 3,5$) se definen como:

$$G_{\rm dBi} (\Delta \psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0.256 - \frac{7.73}{\psi_0^2} (\Delta \psi + 0.65 \psi_0)^2 & \text{para} & 0 \le \Delta \psi \le 1.1575 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 & \text{para} & 1.1575 \psi_0 < \Delta \psi \le 2.5017 \psi_0 \\ G_{ep} - 25 + 20 \log (2.5017 \psi_0 / \Delta \psi) & \text{para} & 2.5017 \psi_0 < \Delta \psi \le 18 \end{cases}$$

2.4.2 Segundo modelo

Resultará muy difícil proporcionar un diagrama relativamente sencillo que se pueda aplicar a toda una gama de antenas de satélite diferentes sin perjudicar a ningún diseño o sistema particular. Así pues, la plantilla aquí presentada en el modelo 2 no pretende describir una envolvente única sino una forma general. La plantilla se puede considerar no sólo para una aplicación única sino como una representación general de una familia de plantillas que describen antenas idóneas para muchas aplicaciones diferentes.

En el desarrollo de este modelo se ha intentado tomar plenamente en cuenta el ensanchamiento del haz producido a partir de los haces componentes explorados fuera de la referencia de puntería de una antena de haz conformado. Se ha puesto buen cuidado en abarcar los efectos de la interferencia

y del acoplamiento mutuo entre haces elementales adyacentes situados en torno al haz elemental componente que se considera. Para evitar una formulación compleja, se han considerado sólo dos haces elementales adyacentes adicionales en la dirección de exploración de los haces elementales componentes. Se ha tenido también en cuenta la variación del ensanchamiento de haz en función de la relación F/D; los resultados se han verificado en el intervalo de valores $0,70 \le F/D \le 1,3$ y mediante un modelo para un plano de exploración medio entre el plano de elevación y el plano acimutal. Si el modelo se hubiese aplicado para el plano acimutal sólo, cabría esperar unas características más acusadas de lo previsto. Otros presupuestos en que se basa el modelo son los siguientes:

- el límite entre haces componentes que corresponden a los elementos individuales del conjunto se supone definido por el contorno ideal de -3 dB del haz conformado de cobertura;
- el radio del haz elemental componente, ψ_b , viene dado por la ecuación (6) y corresponde a un decrecimiento de -4 dB en el borde de la abertura;
- el valor de B que controla la región del haz principal se representa en el modelo directamente en función del ángulo de exploración del haz componente del diámetro de la antena D y de la relación F/D del reflector de la antena.

El valor de la relación F/D utilizado en este modelo es el cociente entre la distancia focal y el diámetro físico del reflector. El modelo es válido para diámetros de reflector de hasta 120 λ y exploraciones de haz de hasta 13 anchuras de haz y ha mostrado una buena correlación con unos 34 cortes de diagrama tomados en 4 antenas diferentes.

Como en el futuro quizás resulte conveniente imponer un control más estricto al funcionamiento de la antena, este modelo proporciona dos sencillos factores de mejora, K_1 y K_2 para modificar el diagrama general generado en este momento.

Modelo copolar general 2

Se exponen a continuación las ecuaciones correspondientes a las diversas regiones y a los valores de ganancia fuera del eje correspondiente. Dichos valores de ganancia se miden perpendicularmente a la zona de cobertura en cada punto, y esta técnica está relacionada con la definición de zona de cobertura que figura en el Anexo 2.

Por el momento los valores de K_1 y K_2 son iguales a la unidad: $K_1 = K_2 = 1$.

Las ecuaciones utilizadas en este modelo se pueden normalizar para el primer lóbulo lateral (L_s) de -20 dB. En última instancia se sustituirá el valor particular del primer lóbulo lateral escogido para la aplicación determinada.

a) Región del borde de caída del lóbulo principal: $(0^\circ \le \Delta \psi < C \psi_b)$

En esta región la función de ganancia viene dada por:

$$G(\Delta \psi) = G_e - K_1 B \left[\left(1 + \frac{\Delta \psi}{\psi_b} \right)^2 - 1 \right]$$
 dBi (10)

donde:

 $G(\Delta \psi)$: ganancia del diagrama de referencia (dBi)

- G_e : ganancia en el borde de la zona de cobertura (dBi)
- $\Delta \psi$: ángulo (grados) respecto al contorno de cobertura (convexo) en una dirección perpendicular a los lados del contorno
 - $\psi_b = 32 \lambda/D$ es el radio del haz elemental (grados) (correspondiente a $L_s = -20$ dB en la ecuación (6))

$$B = B_0 - (S - 1,25) \Delta B$$
 para $S \ge 1,25$ y

$$B = B_0 \qquad \text{para } S < 1,25$$

$$B_0 = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda$$

$$\Delta B = 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}.$$

Se dan a continuación ecuaciones para el plano de elevación y el plano acimutal a fin de mantener la generalidad:

Plano acimutal:	$B_0 = 2,15 + T$
Plano de elevación:	$B_0 = 1,95 + T$
	donde $T = 0.5 (F/D - 1) + 0.0025 D/7$
Plano acimutal:	$\Delta B = 1,3 \ (D/\lambda)^{-0.55}$
Plano de elevación:	$\Delta B = 2,0 \ (D/\lambda)^{-0.55}$
	D: diámetro de la antena (m)

- λ : longitud de onda (m)
- S: desplazamiento angular, A, entre el eje de puntería de la antena y el punto en el borde de la zona de cobertura, expresado en aberturas de haz entre puntos de potencia mitad, como indica la Fig. 4, es decir: $S_1 = A_1 / 2\psi_b y S_2 = A_2 / 2\psi_b$

$$C = \sqrt{1 + \frac{(20 K_2 - 3)}{K_1 B}} - 1$$

y corresponde al límite en el que $G(\Delta \psi)$ corresponde a un nivel de $-20 K_2$ (dB) con respecto a la ganancia máxima equivalente G_{ep} ; es decir $G(\Delta \psi) = G_e + 3 - 20 K_2$.

b) Región de lóbulos laterales cercanos: $C\psi_b \le \Delta \psi < (C+0,5) \psi_b$

Esta región se ha mantenido muy estrecha deliberadamente por varias razones. En efecto, los primeros lóbulos laterales altos, del orden de -20 dB, se producen solamente en algunos planos y van seguidos de lóbulos laterales uniformemente decrecientes. En las regiones donde se ensancha el haz, el primer lóbulo lateral se confunde con el lóbulo principal, el cual ha sido ya modelado por *B* en cuanto al límite del haz. Por todo esto es necesario mantener esta región muy estrecha con objeto de no sobrestimar el nivel de radiación (en cuanto a las antenas de clase B, esta región se ha ensanchado ligeramente y la función de ganancia se ha modificado). La función de ganancia en esta región es constante y viene dada por:

$$G(\Delta \psi) = G_e + 3 - 20 K_2 \tag{11}$$

c) Región de lóbulos laterales intermedios: $(C + 0,5) \psi_b \le \Delta \psi < (C + 4,5) \psi_b$

Esta región se caracteriza por lóbulos laterales en disminución persistente. Habitualmente la envolvente disminuye alrededor de 10 dB a través de una abertura angular de $4 \psi_b$. En consecuencia, esta región viene dada por:

$$G(\Delta \psi) = G_e + 3 - 20 K_2 + 2,5 \left[(C + 0,5) - \frac{\Delta \psi}{\psi_b} \right]$$
dBi (12)

La anterior expresión disminuye desde $G_e + 3 - 20 K_2$ para $(C + 0,5) \psi_b$ hasta $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$ para $(C + 4,5) \psi_b$.

d) Región de lóbulos laterales de gran amplitud angular:

 $(C+4,5) \psi_b \le \Delta \psi < (C+4,5) \psi_b D,$ donde $D = 10^{[(G_e - 27)/20]}$ Esto corresponde a la región dominada por la difracción del borde procedente del reflector y disminuye a razón de 6 dB por octava, aproximadamente. En esta región se verifica:

$$G(\Delta \psi) = G_e + 3 - 10 - 20 K_2 + 20 \log \left[\frac{(C + 4,5) \psi_b}{\Delta \psi} \right]$$
 dBi (13)

En esta región, $G(\Delta \psi)$ disminuye desde $G_e + 3 - 10 - 20 K_2$ para $(C + 4,5) \psi_b$ hasta $G_e + 3 - 16 - 20 K_2$ para 2 $(C + 4,5) \psi_b$. El límite superior está situado donde $G(\Delta \psi) = 3$ dBi.

FIGURA 4



a) Eje de puntería fuera de la zona de cobertura



b) Eje de puntería dentro de la zona de cobertura

A₁, A₂: Desviaciones angulares (grados) de los dos puntos en el borde de la zona de cobertura respecto al eje de puntería de la antena 0672-04

e) Región de lóbulos laterales alejados:
$$(C + 4,5) \psi_b D \le \Delta \psi \le 90$$
,
donde $D = 10^{[(G_e - 27)/20]}$
 $G(\Delta \psi) = 3$ dBi (14)

Estas regiones se describen en la Fig. 5.





El modelo se puede también ampliar al caso de haces simples circulares, haces elípticos y antenas de reflector conformado. Estos casos se tratan ajustando el valor de *B* en el modelo general anterior:

- En los casos de haces circulares simples y elípticos, *B* pasa a tener el valor de 3,25.
- En los casos de reflector conformado se modifican los parámetros siguientes:

$$B = \begin{cases} 1,3 & \text{para} & 0,5 \le S \le 0,75 \\ 1,56 - 0,34 S & \text{para} & 0,75 < S \le 2,75 \\ 0,62 & \text{para} & S > 2,75 \end{cases}$$

siendo:

S : (desplazamiento angular desde el centro de cobertura) / $2\psi_b$

$$\psi_b = 40 \ \lambda/D$$
$$K_2 = 1,25$$

Conviene advertir que los valores propuestos para las antenas de reflector conformado corresponden a la información disponible sobre configuraciones sencillas de la antena. Esta nueva tecnología se desarrolla con rapidez, por lo que los valores se deben considerar únicamente provisionales. Además, se necesitan nuevos estudios para verificar los niveles «meseta» de lóbulos laterales que se pueden conseguir.

Empleo de factores de mejora K_1 y K_2

Con los factores de mejora K_1 y K_2 no se pretende expresar ningún proceso físico en el modelo, pues se trata de nuevas constantes para reajustar la configuración general del diagrama de antena sin alterar su carácter.

Un aumento del valor de K_1 sobre el valor actual de 1 hará más abrupta la pendiente de caída del haz principal.

El parámetro K_2 puede utilizarse para ajustar los niveles de la región de valor meseta de los lóbulos laterales aumentando K_2 su valor por encima de la unidad.

2.5 Características de caída de diagrama de haz conformado

La característica de caída del haz principal de antenas de haz conformado depende básicamente del tamaño de la antena. La distancia angular, $\Delta \psi_L$, desde el borde de la zona de cobertura hasta el punto en que la ganancia ha disminuido 22 dB (con relación a la ganancia en el borde) es un parámetro útil para fines de planificación de la órbita. Se relaciona con el tamaño de la antena mediante:

$$\Delta \psi_L = C \left(\lambda / D \right)$$

Para haces centrales con poca o ninguna conformación, el valor de C es 64 para un nivel máximo de lóbulos laterales de -25 dB. Sin embargo, para haces conformados, C está comprendida típicamente entre 64 y 80, dependiendo del grado de ensanchamiento del haz principal.

2.6 Diagramas de referencia para las relaciones de exploración intermedias

Los § 2.1 y 2.2 del *recomienda* presentan dos diagramas de referencia para las antenas de satélite en el SFS, uno para zonas de cobertura pequeñas con relaciones de exploración inferiores a 3,5 y el otro para zonas de cobertura grandes con relaciones de exploración superiores a 5,0. Sin embargo, no se han definido los diagramas de radiación para las relaciones de exploración intermedias $(3,5 < \delta < 5,0)$ de las antenas de satélite.

A fin de asegurar la plena aplicación de la presente Recomendación, debe definirse el diagrama de radiación para las antenas con relaciones de exploración intermedias comprendidas entre 3,5 y 5,0. Evidentemente, un método consistiría en redefinir cualquiera de los dos modelos para dar cobertura a la otra región. No obstante, como solución provisional se propone conectar los dos modelos con un diagrama de referencia definido por parámetros similares a los que se utilizan en los § 2.1 y 2.2 del *recomienda*.

Sobre la base de este método, se está desarrollando un nuevo diagrama de referencia, aplicable únicamente a las antenas de clase A, que satisface las condiciones de los diagramas existentes para las zonas de cobertura pequeñas, así como para las zonas de cobertura grandes a $\delta = 3,5$ y $\delta = 5,0$ respectivamente. Dicho diagrama se define como una función del factor de ensanchamiento de haz, Q_i , que es la relación entre los límites superiores de las regiones de caída del haz principal del haz

conformado ($\delta > 1/2$) y las del haz concentrado ($\delta = 1/2$). Para las relaciones de exploración intermedias comprendidas en la gama 3,5 < δ < 5,0, el valor de Q_i se interpola como figura a continuación:

$$Q_i = Q + \left(\frac{C}{1,7808} - Q\right) \left(\frac{\delta - 3,5}{1,5}\right)$$

donde:

$$Q = 10^{\left(\frac{0,000075 (\delta - 1/2)^2}{[(F/D_p)^2 + 0.02]^2}\right)}$$

$$C = \sqrt{1 + \frac{22}{B}} - 1$$

$$B = 2,05 + 0,5 (F/D - 1) + 0,0025 D/\lambda - (\delta - 1,25) 1,65 (D/\lambda)^{-0,55}$$

El diagrama de referencia para las relaciones de exploración intermedias en la gama $(3,5 < \delta < 5,0)$ se define como sigue:

$$G_{dBi} (\Delta \psi) = \begin{cases} G_{ep} + 0.256 - 13.065 \left(\frac{\Delta \psi}{Q_i \psi_0} + 0.5\right)^2 & \text{para} & 0 \le \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le 0.8904 \, Q_i \\ G_{ep} - 25 & \text{para} & 0.8904 \, Q_i < \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le 1.9244 \, Q_i \\ G_{ep} - 25 + 20 \log\left(\frac{1.9244 \, Q_i}{\Delta \psi}\right) & \text{para} & 1.9244 \, Q_i < \frac{\Delta \psi}{\psi_0} \le \frac{18}{\psi_0} \end{cases}$$

Las variables de las ecuaciones indicadas supra se han definido en los § 2.1 y 2.2 del recomienda.

La Fig. 6 ilustra un ejemplo del nuevo diagrama de referencia para $\delta = 4,25$ y para dos valores distintos de D/λ .





Es preciso validar este modelo para la región de la relación de exploración intermedia mediante estudios adicionales.

ANEXO 2

1 Definición del contorno de la zona de cobertura y de los contornos de ganancia en torno a la zona de cobertura

1.1 Definición del contorno de la zona de cobertura

Una zona de cobertura puede definirse por una serie de puntos geográficos vistos desde el satélite. El número de puntos necesarios para definir razonablemente la zona de cobertura depende de la complejidad de la superficie. Estos puntos pueden desplazarse para tomar en cuenta las tolerancias de puntería de la antena y las variaciones debidas a consideraciones sobre el arco de servicio. Se forma un polígono conectando los puntos adyacentes y se establece el contorno de la zona de cobertura alrededor de ese polígono observando dos criterios:

- El radio de curvatura del contorno de la zona de cobertura debe ser $\geq \psi_b$.
- La separación entre los segmentos rectos del contorno de la zona de cobertura debe ser $> 2\psi_b$ (véase la Fig. 7).

Si el polígono de cobertura puede incluirse en un círculo de radio ψ_b , este círculo es el contorno de la zona de cobertura. El centro de este círculo es el centro de un círculo de radio mínimo que estrictamente encierre el contorno de la zona de cobertura. Si el polígono de cobertura no puede incluirse en un círculo de radio ψ_b , entonces se procede del siguiente modo:

- *Etapa 1*: Para todos los ángulos internos del polígono de cobertura < 180° , se construye un círculo de radio ψ_b cuyo centro está a una distancia ψ_b en la bisectriz interna del ángulo. Si todos los ángulos son inferiores a 180° (sin concavidades) se suprimen las etapas 2 y 4 siguientes.
- *Etapa 2*: a) Para todos los ángulos internos > 180° se construye un círculo de radio ψ_b que es tangente a las líneas conectadas al punto de la zona de cobertura cuyo centro está en la bisectriz externa del ángulo.
 - b) Si este círculo no se halla totalmente fuera del polígono de cobertura, entonces se construye un círculo de radio ψ_b que es tangente al polígono de cobertura en sus dos puntos más próximos y que se halla totalmente fuera del polígono de cobertura.
- *Etapa 3*: Establecer segmentos de línea recta que sean tangentes a las porciones de los círculos de las etapas 1 y 2 que están próximas al polígono de cobertura, pero fuera del mismo.
- *Etapa 4*: Si la distancia interna entre cualesquiera dos segmentos de línea recta de la etapa 3 es inferior a $2\psi_b$, los puntos de control del polígono de cobertura deben ajustarse de modo que la reaplicación de las etapas 1 a 3 dé una distancia interna entre los dos segmentos de línea recta igual a $2\psi_b$.

En la Fig. 7 aparece un ejemplo de esta técnica de construcción.





1.2 Contornos de ganancia en relación con el contorno de la zona de cobertura

Como también se indica en el Anexo 1, surgen problemas cuando el contorno de la zona de cobertura presenta concavidades. Si se utiliza un $\Delta \psi$ medido perpendicularmente al contorno de la zona de cobertura se producirán intersecciones de las perpendiculares y podría dar lugar a intersecciones con el contorno de la zona de cobertura.

Para evitar ese y otros problemas se propone un proceso en dos etapas. Si no hay concavidades en los contornos de cobertura, puede suprimirse la etapa 2 siguiente.

Etapa 1: Para cada $\Delta \psi$, construir un contorno tal que la distancia angular entre ese contorno y el contorno de la zona de cobertura nunca sea inferior a $\Delta \psi$.

Esto puede hacerse estableciendo arcos de $\Delta \psi$ de dimensión a partir de los puntos del contorno de la zona de cobertura. La envolvente externa de esos arcos es el contorno de ganancia resultante.

Si el contorno de la zona de cobertura es recto o convexo, esa condición queda satisfecha midiendo perpendicularmente al contorno de la zona de cobertura. En este caso no habrá intersecciones de las perpendiculares.

El empleo del proceso descrito en la etapa 1 evita esos problemas de construcción en las zonas de concavidad. Sin embargo, desde un punto de vista realista quedan ciertas zonas problemáticas. Como se ha indicado en el Anexo 1, el control de los lóbulos laterales en las zonas de concavidad, puede resultar más difícil a medida que aumenta el grado de concavidad, pues la sección transversal del diagrama tiende a ensancharse; si se emplea el proceso de la etapa 1 puede haber discontinuidades en la pendiente del contorno de ganancia.

Parece razonable suponer que los contornos de ganancia tienen radios de cobertura que nunca son inferiores a $(\psi_b + \Delta \psi)$ vistos desde dentro y desde fuera del contorno de ganancia. Esta condición queda satisfecha por el proceso de la etapa 1 en donde el contorno de la zona de cobertura es recto o convexo, pero no en las partes cóncavas del contorno de la zona de cobertura. Los puntos focales de los radios de curvatura en donde el contorno de la zona de cobertura es recto o convexo se hallan dentro del contorno de ganancia. En las partes cóncavas, el empleo de la etapa 1 puede dar radios de curvatura vistos desde fuera del contorno de ganancia que sean inferiores a $(\psi_b + \Delta \psi)$.

La Fig. 8 muestra un ejemplo del proceso de la etapa 1 en una parte cóncava. Se utilizan segmentos semicirculares para el contorno de la zona de cobertura a fin de facilitar la construcción. Obsérvese la discontinuidad de la pendiente.

Para tener en cuenta los problemas antes enunciados y eliminar cualquier discontinuidad de la pendiente, se propone una etapa 2 en donde existan concavidades.



FIGURA 8 Contornos de ganancia obtenidos en la etapa 1 para un contorno de zona de cobertura con concavidades

Etapa 2: En las partes del contorno de ganancia determinado por la etapa 1 en donde el radio de curvatura, visto desde fuera de ese contorno, es inferior a $(\psi_b + \Delta \psi)$, esta parte del contorno de ganancia debe ser sustituida por un contorno que tenga un radio igual a $(\psi_b + \Delta \psi)$.

La Fig. 9 presenta un ejemplo del proceso de la etapa 2 aplicado a la concavidad de la Fig. 8. Para ilustrar el problema se indican los valores de los contornos de ganancia relativa, suponiendo que ψ_b es igual a lo indicado y que *B* tiene un valor de 3 dB.

Este método de construcción no tiene ambigüedades y da los contornos de las partes cóncavas que podían razonablemente esperarse. Aparecen, sin embargo, dificultades en la generación de soporte lógico para llevarlo a la práctica, y además no es enteramente apropiado para zonas de cobertura pequeñas. Los trabajos ulteriores continuarán perfeccionando el método en cuestión.

Con objeto de determinar los valores de la ganancia en puntos concretos sin elaborar los contornos se utiliza el siguiente proceso:

Los valores de la ganancia en puntos que no están cerca de una parte cóncava pueden hallarse determinando el ángulo $\Delta \psi$ medido perpendicularmente al contorno de la zona de cobertura y calculando la ganancia mediante la ecuación apropiada (10), (11), (12), (13) ó (14). La ganancia en un punto de concavidad puede determinarse como se indica a continuación.

En primer lugar, se aplica una prueba sencilla. Se traza una línea recta a través de la concavidad de la cobertura de modo que toque el borde de la zona de cobertura en dos puntos sin cruzarlos en ninguna parte. Se trazan perpendiculares al contorno de cobertura en los puntos tangenciales. Si el punto en consideración queda fuera de la zona de cobertura entre dos perpendiculares, la discriminación de antena en ese punto puede verse afectada por la concavidad de la cobertura. Entonces es preciso proceder del siguiente modo:

Se determina el menor ángulo $\Delta \psi$ entre el punto en consideración y el contorno de la zona de cobertura. Se construye un círculo de radio ($\psi_b + \Delta \psi$) cuya circunferencia contenga el punto, de modo que su distancia angular desde cualquier punto del contorno de la zona de cobertura alcance el valor máximo cuando el círculo quede enteramente fuera de la zona de cobertura; se llama a ese valor distancia angular máxima $\Delta \psi'$. El valor de $\Delta \psi'$ puede hallarse en cualquier ángulo entre 0 y $\Delta \psi$; no puede ser mayor que $\Delta \psi$; pero puede ser igual. Entonces se obtiene la discriminación de antena para el punto considerado a partir de las ecuaciones (10), (11), (12), (13) ó (14), según corresponda utilizando $\Delta \psi'$ en lugar de $\Delta \psi$.

Se han elaborado dos programas de computador para generar los contornos de la zona de cobertura sobre la base del método descrito anteriormente; dichos programas se encuentran disponibles en la Oficina de Radiocomunicaciones.

FIGURA 9

Construcción de los contornos de ganancia para un contorno de zona de cobertura con concavidades – etapas 1 y 2



 $r_0 = 1.9 \, \psi_b$

 r_0 : Radio de curvatura de la concavidad del contorno de cobertura

r: Radio de curvatura

0672-09