

RECOMENDACIÓN UIT-R S.743-1*

Coordinación entre redes por satélite que utilizan órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas y entre dichas redes y las redes por satélite que utilizan la órbita de los satélites geoestacionarios no inclinada

(1992-1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que en la definición de satélite geoestacionario que figura en el número S1.189 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) no se indica el valor máximo del ángulo de inclinación de la órbita de satélite geoestacionario;
- b) que el combustible de mantenimiento en posición de las estaciones espaciales geoestacionarias constituye una parte apreciable de la masa en órbita y tiende a ser el factor limitativo de la vida de la estación espacial geoestacionaria;
- c) que el mantenimiento en posición Norte-Sur consume hasta el 90% del combustible total;
- d) que, en ausencia del mantenimiento en posición Norte-Sur, la órbita de satélite geoestacionario está sometida a no más de unos $0,9^\circ$ de variación orbital al año, y que la inclinación nunca excederá el límite natural de 15° ;
- e) que, por otro lado, la ausencia del mantenimiento en posición en la dirección N/S puede exigir equipos adicionales en las estaciones terrenas, tales como sistemas de seguimiento angular y de seguimiento de polarización y, en el caso de transmisiones digitales, memorias de almacenamiento adaptables de mayor capacidad y métodos de sincronización más complejos;
- f) que la Segunda reunión de la Conferencia Administrativa Mundial de Radiocomunicaciones sobre la utilización de la órbita de los satélites geoestacionarios y la planificación de los servicios espaciales que la utilizan (Ginebra, 1988) (CAMR ORB-88) examinó el tema de la coordinación de las redes por satélites geoestacionarios de órbita ligeramente inclinada y encargó actuaciones a la oficina de Radiocomunicaciones y al UIT-R;
- g) que la oficina de Radiocomunicaciones solicitó al UIT-R que estudiase los problemas asociados siguientes:
 - los aspectos técnicos de la coordinación entre los satélites geoestacionarios y los de órbitas geoestacionarias inclinadas;
 - los aspectos técnicos de la coordinación entre satélites en órbitas geoestacionarias inclinadas;

* 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).

- h) que no parece haber limitación intrínseca para la coordinación de redes por satélite que utilizan órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas;
- j) que los datos exigidos por el Apéndice S4 (CAMR ORB-88) al RR incluyen los efectos de la utilización de órbitas de satélite geoestacionario ligeramente inclinadas,

señalando que

- a) en condiciones de cobertura común, el aislamiento entre redes por satélite geoestacionario y las que usan órbitas ligeramente inclinadas será igual o mayor a la existente entre dos redes por satélite geoestacionario (cerca de 0° de inclinación);
- b) en condiciones de cobertura común, el aislamiento entre dos redes por satélite geoestacionario que utilicen una órbita ligeramente inclinada puede ser inferior o superior a la coordinación entre dos redes por satélite geoestacionario con inclinaciones próximas a 0°, dependiendo de la fase nodal relativa;
- c) en condiciones de cobertura común, el aislamiento entre dos redes por satélite geoestacionario próximas con reutilización de frecuencia mediante polarización ortogonal lineal doble, una de las cuales o ambas utilicen una órbita ligeramente inclinada, puede ser inferior que en el caso de dos redes por satélite geoestacionario, dependiendo de la fase nodal relativa;
- d) en condiciones de cobertura común, el aislamiento entre dos redes por satélite geoestacionario en la que una de ellas o ambas utilizan órbitas ligeramente inclinadas, puede ser inferior o superior al que se aplica entre dos redes por satélite geoestacionario, dependiendo de una serie de factores, además del de la fase nodal relativa,

recomienda

- 1** que la coordinación entre redes por satélite geoestacionario que utilizan órbitas de satélite geoestacionario ligeramente inclinadas se realice conforme a las disposiciones al RR aplicables a las redes por satélite geoestacionario, basándose en la separación mínima entre los satélites en cuestión;
- 2** que en las bandas compartidas con los servicios terrenales, el límite de inclinación para el caso considerado en el § 1 se determine por consideraciones de compartición entre servicios (véase la Nota 1); en otras bandas, el § 1 puede aplicarse al límite de inclinación natural, para el caso de satélites lanzados inicialmente en una órbita geoestacionaria, o casi geoestacionaria, cuando no se realizan maniobras de mantenimiento en posición N/S;
- 3** que para lo relativo a la interferencia inherente a la coordinación de las redes por satélite geoestacionario que utilizan órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas, se emplee la información del Anexo 1 a esta Recomendación;
- 4** que se ajuste, en caso de ser práctico, la fase nodal relativa entre las órbitas y/o que se realicen mediciones para minimizar todo tipo de efecto perjudicial (véase el § 5 del Anexo 1);
- 5** que la Nota se considere parte de la Recomendación:

NOTA 1 – La Recomendación UIT-R SF.1008 trata sobre la posibilidad de que las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite utilicen órbitas ligeramente inclinadas con respecto a la órbita de los satélites geoestacionarios en bandas compartidas con el servicio fijo por satélite.

ANEXO 1

1 Introducción

La información del presente Anexo debe utilizarse en la coordinación de redes por satélite que utilizan órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas y entre dichas redes y otras redes por satélite que utilizan la OSG no inclinada.

En el caso de explotación con órbita ligeramente inclinada, hay básicamente tres factores que influyen sobre la interferencia entre dos redes por satélite, que son:

- la separación angular exocéntrica entre las zonas de cobertura de las redes, vista desde cada satélite;
- la anchura angular exocéntrica de las zonas de cobertura vista desde cada satélite;
- la separación angular topocéntrica entre los satélites vista desde una estación terrena de cada red.

Estos factores producen una variación con el tiempo de la discriminación neta de antena (antena de satélite y de estación terrena) entre las dos redes. En el caso en que las redes por satélite tengan una zona de servicio común (redes de cobertura común), la antena de estación terrena es el elemento básico que proporciona la discriminación entre las redes. Cuando las redes por satélite tengan zonas de servicio separadas (redes sin cobertura común) tanto la antena del satélite como la de la estación terrena contribuyen a la discriminación entre las redes.

2 Consideraciones geométricas

El ángulo geocéntrico, φ_g , entre dos satélites geoestacionarios de órbita ligeramente inclinada de latitudes (γ_1 y γ_2) y longitudes (φ_1 y φ_2) puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$\cos \varphi_g = \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \cos (\varphi_1 - \varphi_2) + \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \quad (1)$$

Las excursiones de latitud γ y de longitud $\Delta\varphi$ de un satélite, en función del ángulo de inclinación de la órbita i y de la posición del ángulo de fase del satélite en la órbita $\Delta\gamma$ medidas desde el nodo ascendente, son:

$$\gamma = \sin^{-1} (\sin i \sin \Delta\gamma) \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \operatorname{tg}^{-1} (\cos i \operatorname{tg} \Delta\gamma) - \Delta\gamma \quad (3)$$

Utilizando las aproximaciones de ángulos pequeños para $\sin i$ y $\cos i$, las ecuaciones (2) y (3), se transforman en:

$$\gamma = i \sin \Delta\gamma \quad \text{radianes} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = -0,25 i^2 \sin 2 \Delta\gamma \quad \text{radianes} \quad (5)$$

Pueden determinarse las excursiones longitudinales de un satélite en una órbita circular geoestacionaria a partir de las ecuaciones anteriores. En la Fig. 1 se representan las excursiones máximas en función de la inclinación.

En el caso de dos satélites con inclinaciones i_1 e i_2 , denominando $\Delta\gamma_0$ a la diferencia del ángulo de fase entre las posiciones orbitales de los satélites ($0 \leq \Delta\gamma_0 \leq 2\pi$), y siendo φ_s el ángulo entre los nodos ascendentes, puede obtenerse el valor mínimo de la separación angular geocéntrica, φ_g , a partir de las ecuaciones anteriores y aproximarse con bastante precisión mediante la relación:

$$(\varphi_g)_{min} = 0,5 i_1 i_2 \text{ sen } \Delta\gamma_0 + \varphi_s \quad \text{radianes} \quad (6)$$

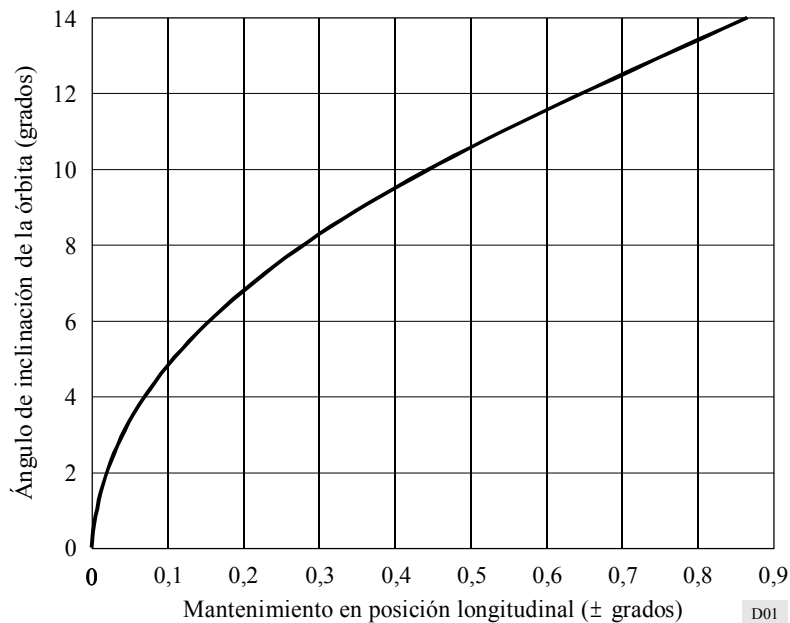
La ecuación (6) puede expresarse como la relación entre el ángulo geocéntrico mínimo y el ángulo geocéntrico de los nodos:

$$(\varphi_g)_{min}/\varphi_s = 1 + (i_1 i_2 \text{ sen } \Delta\gamma_0)/2 \varphi_s \quad (7)$$

donde i_1 , i_2 y φ_s son pequeños comparados con un radián.

FIGURA 1

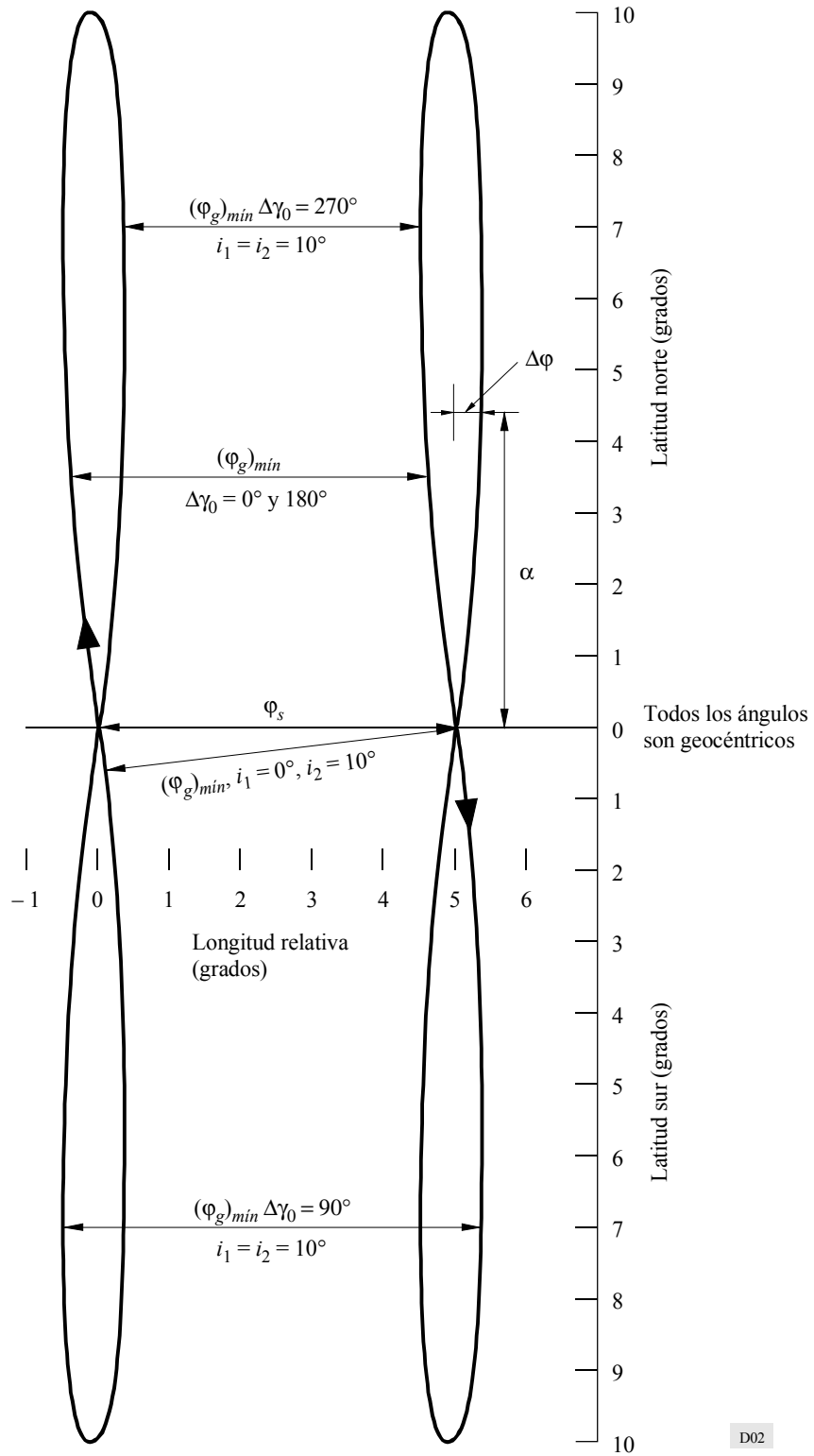
Inclinación de la órbita cuando la excursión de longitud es igual al mantenimiento en posición



Según la diferencia del ángulo de fase entre las posiciones orbitales del satélite, $(\varphi_g)_{min}$ puede ser menor o mayor que φ_s ; es decir cuando $\pi \leq \Delta\gamma_0 \leq 2\pi$ ó $0 \leq \Delta\gamma_0 \leq \pi$ respectivamente (véase la Fig. 2). Si i_1 o i_2 son cero, $(\varphi_g)_{min} = \varphi_s$. El valor más desfavorable de la diferencia del ángulo de fase es $3\pi/2$, y para ese valor la ecuación (7) se transforma en:

$$(\varphi_g)_{min}/\varphi_s = 1 - i_1 i_2 / 2 \varphi_s \quad (8)$$

FIGURA 2
Geometría de la órbita geostacionaria circular inclinada



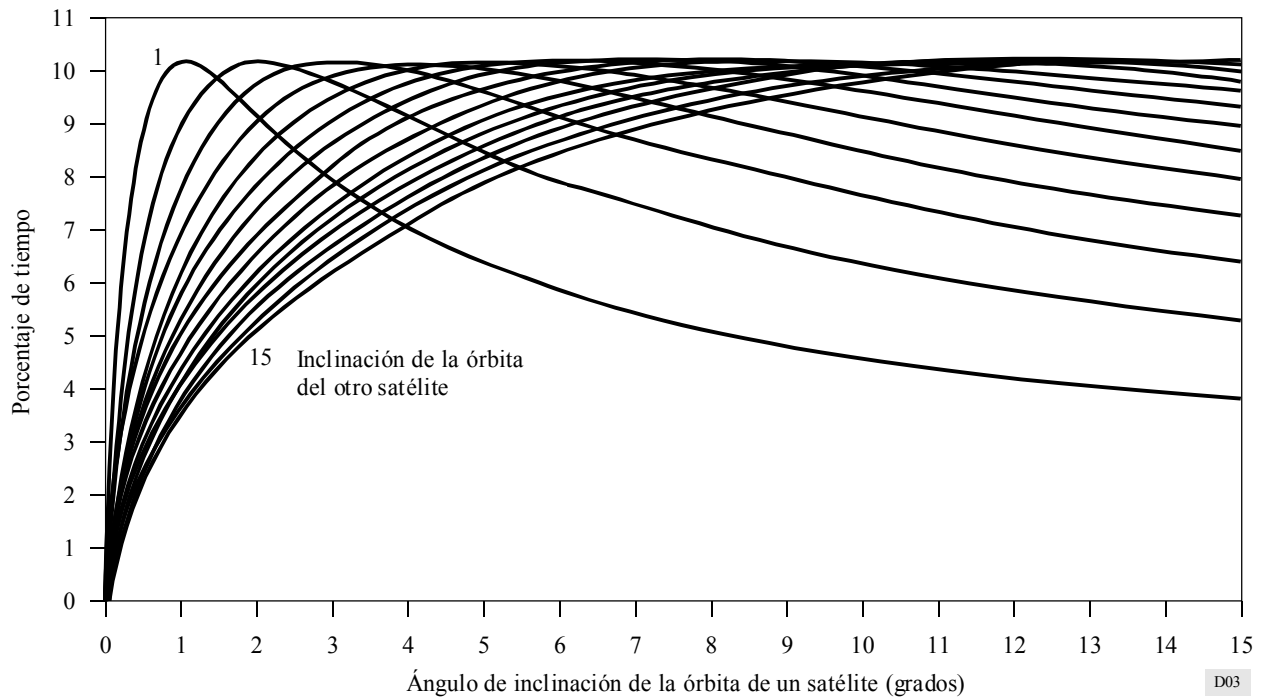
Cuando en un par de satélites se produzca una inclinación de la órbita de alguno de ellos, el valor, promediado en el tiempo, de la separación angular es siempre mayor que la separación nodal φ_s . El porcentaje de tiempo T_1 durante el cual φ_g es menor que φ_s en las condiciones más desfavorables del ángulo de fase es, aproximadamente:

$$T_1 = 0,64 \left[(i_1 i_2 \varphi_s) / (i^{2;1} + i^{2;2}) \right]_5^0 \quad (9)$$

Cuando $i_1 = i_2$, T_1 varía entre 1 h, dos veces al día para $\varphi_s = 2^\circ$, y alrededor de 2,25 h, dos veces al día para $\varphi_s = 10^\circ$ con inclinaciones iguales y el ángulo de fase más desfavorable. En la Fig. 3 se representa la ecuación (9) para φ_s igual a 3° .

FIGURA 3

Porcentaje de tiempo en que la separación del satélite es menor que la separación nodal



3 Redes con cobertura común

En condiciones de cobertura común, la discriminación de antena del satélite, si existe, es muy pequeña, de forma que la discriminación espacial sólo se consigue en las antenas de la estación terrena. Para estaciones terrenas de seguimiento, la discriminación es función de la separación angular entre los satélites. Suponiendo que la pendiente de la envolvente de lóbulos laterales sigue la ley $-25 \log(\varphi)$, la ecuación (7) puede escribirse como sigue:

$$\Delta d \leq 25 \log_{10} \left[1 + \frac{i_1 i_2 \sin \Delta \gamma_0}{2 \varphi_s} \right] \quad \text{dB} \quad (10)$$

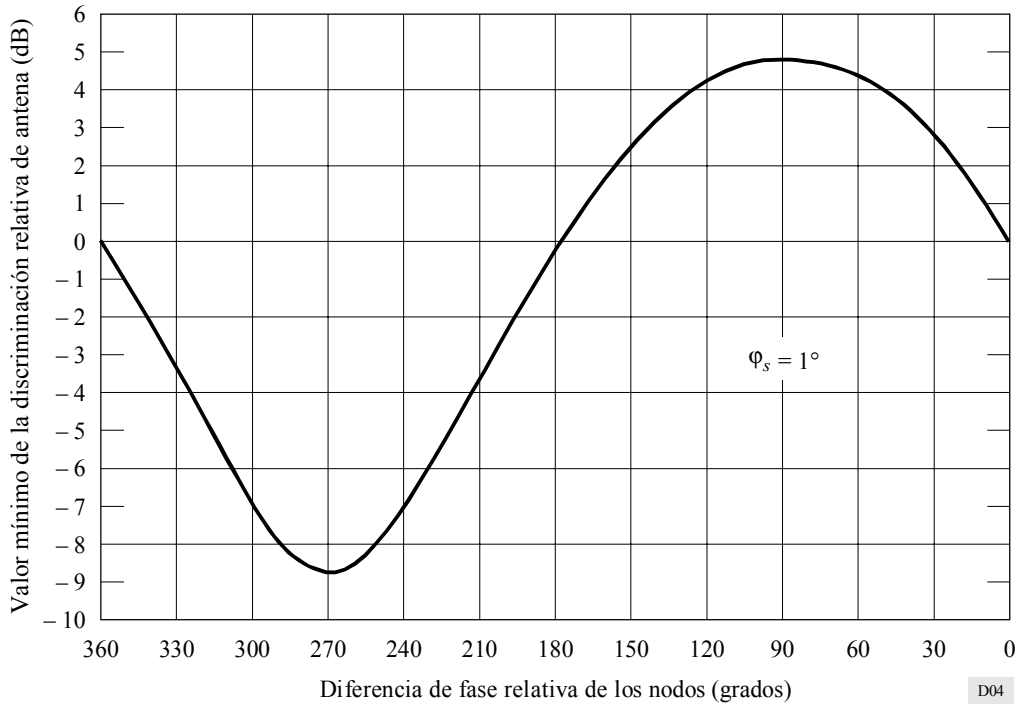
donde Δd es el cambio de discriminación (dB), con respecto a la discriminación de antena de estación terrena para la separación nominal φ_s .

En la Fig. 4 se representa la discriminación de antena para $i_1 = 7^\circ$ e $i_2 = 9^\circ$ y una separación nominal entre satélites, $\varphi_s = 1^\circ$.

Como se muestra en la Fig. 4, la diferencia de fase nodal parece ser un factor crítico en la determinación de la discriminación relativa de antena de estación terrena. En función de la diferencia de fase nodal, la discriminación relativa de antena de estación terrena puede ser mayor o menor que el valor nominal, y alcanza un mínimo con una diferencia de fase nodal de 270° .

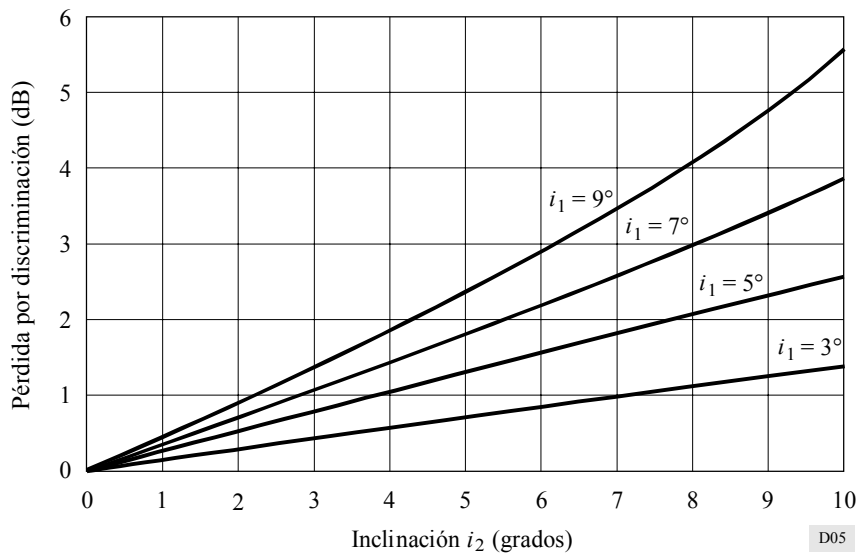
Es importante observar que cuando i_1 o i_2 son cero, la discriminación relativa mínima también es nula. Prácticamente, esto significa que la discriminación entre una red de satélite geostacionario y una red con órbita ligeramente inclinada será siempre mayor o igual a la discriminación nominal que se hubiera conseguido si ambas redes fueran geostacionarias.

FIGURA 4
 Valor mínimo de la discriminación relativa de la antena de estación terrena en función de las diferencias de fase nodal, para satélites en órbita geostacionaria con una inclinación de 9° y 7°



En la Fig. 5 se representa la pérdida de discriminación para el caso más desfavorable (que corresponde a la discriminación mínima para una diferencia de fase nodal de 270°) en función de las inclinaciones de los dos satélites, para una separación entre éstos de 2° .

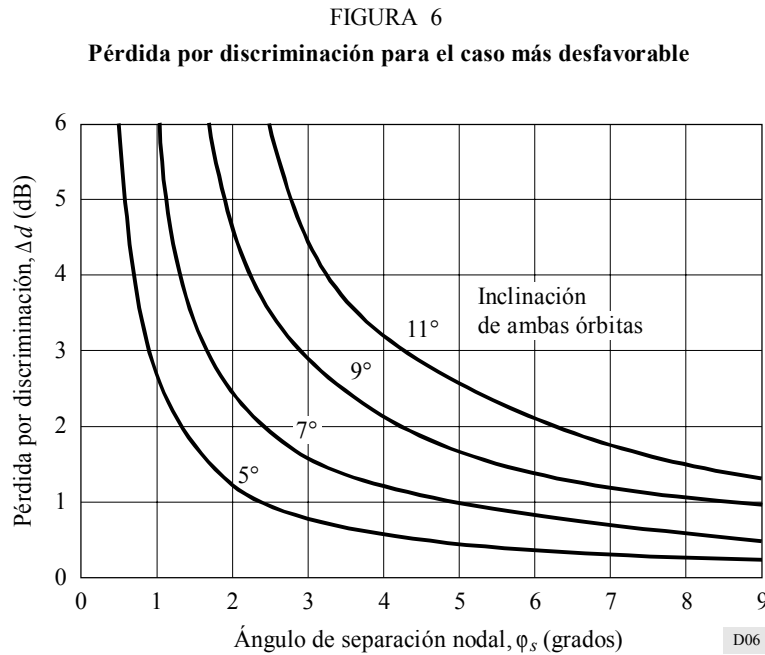
FIGURA 5
 Pérdida por discriminación en la estación terrena (caso más desfavorable) para dos satélites con órbita geostacionaria inclinada



Para el caso mucho más desfavorable, $i_1 = i_2 = i$ y $\Delta\gamma_0 = 270^\circ$, la ecuación (10) se transforma en:

$$\Delta d \leq 25 \log_{10} \left[\frac{1}{1 - i^2/2\phi_s} \right] \quad \text{dB} \quad (11)$$

En la Fig. 6 se representan gráficos de esta función, que demuestran los efectos de la separación nodal ϕ_s entre satélites.



La probabilidad de que las dos órbitas tengan inclinaciones iguales, y también el ángulo de fase más adverso, será muy pequeña. Debe observarse asimismo, que el valor de Δd de la ecuación (10) es un valor de cresta, que se alcanza únicamente en periodos de tiempo cortos. La fracción de tiempo en la cual la variación de la discriminación está comprendida entre 0 dB y Δd , viene dada por la ecuación (9).

Para que se produzca el caso más desfavorable de pérdida por discriminación es necesario que se cumplan las condiciones siguientes:

- ambos satélites (adyacentes) recorran órbitas sustancialmente inclinadas; y
- exista una diferencia de fase nodal de 270° , aproximadamente.

No parece probable que se produzca la combinación de ambos eventos en circunstancias normales cuando se deja de efectuar el mantenimiento en posición Norte-Sur en los satélites controlados, a fin de ampliar su vida útil.

Si se inicia la explotación con órbita inclinada de dos satélites aproximadamente al mismo tiempo (digamos en el mismo año), la diferencia de fase entre las líneas orbitales de sus nodos será despreciable ya que el movimiento cónico de las normales a la órbita producido por campos de fuerzas idénticos será, asimismo, idéntico. Únicamente en el caso en que se inicie la explotación con órbita inclinada en uno de los satélites algunos años antes que en el otro la diferencia de fase nodal será apreciable. No obstante, en este caso, el satélite para el cual se inició la explotación con

órbita inclinada más tarde no tendrá ninguna inclinación orbital importante hasta que transcurran algunos años de explotación combinada. La diferencia del ángulo de fase no cambia sustancialmente con el tiempo, por lo que la variación de la inclinación de dos satélites adyacentes será prácticamente la misma. En consecuencia, cuando se produzcan condiciones desfavorables, éstas no desaparecerán hasta que se efectúe una maniobra en el satélite para modificarlas. Si dos satélites adyacentes se sitúan inicialmente en órbitas inclinadas, las inclinaciones y diferencia de ángulos de fase pueden tomar cualquier valor. Por lo tanto, es importante la estimación de las probabilidades asociadas a Δd . Se supone que las inclinaciones y la diferencia de ángulo de fase son estadísticamente independientes, que las inclinaciones tienen una función de densidad de probabilidad constante entre 0 e i_0 , y que la función de densidad de probabilidad de la diferencia de ángulo de fase es constante entre 0 y 2π . Con estas hipótesis, la ecuación (10) puede escribirse como sigue:

$$\Delta d; \overline{\quad} \leq 25 \log_{10} \left[(1 + Ki^2; 0) / 2\phi_s \right] \quad \text{dB} \quad (12)$$

donde $\Delta d; \overline{\quad}$ es el valor de Δd que no se rebasará con una probabilidad P , y K , el valor normalizado obtenido a partir de las funciones de densidad de probabilidad supuestas anteriormente para un valor de P determinado. Para $P = 90\%$, el valor de K es $-0,3$, aproximadamente. Para valores de P del 95% y 99%, los valores de K son $-0,44$ y $-0,78$, aproximadamente. Para $P = 50\%$, el valor de K es cero.

Suponiendo una separación nodal entre satélites de 2° y que ambos satélites tienen inclinaciones de 5° , la pérdida por discriminación, para el caso más desfavorable es 1,25 dB, como se indica en la Fig. 5. De la ecuación (12) se deduce que el valor máximo de la pérdida por discriminación $\Delta d; \overline{\quad}$ es 0,36 dB, con una probabilidad del 90%. Para una inclinación de 9° , la pérdida por discriminación correspondiente es 4,73 dB y la pérdida por discriminación que no se rebasará con una probabilidad del 90% es 1,25 dB.

A partir de las ecuaciones precedentes pueden igualarse los valores de $\Delta d; \overline{\quad}$ a las variaciones de la separación entre los satélites, de forma que la interferencia pueda hacerse igual o menor que la correspondiente a la inclinación de 0° (1 dB es equivalente a $0,1 \phi_s$, aproximadamente). Es decir, puede ajustarse la separación. Se observa también que $\Delta d; \overline{\quad}$ puede ser positiva, o sea que aumenta la discriminación. Si se supone que el ángulo de fase $\Delta\gamma$, es una variable aleatoria para un conjunto de satélites (los valores positivos y negativos de $\Delta d; \overline{\quad}$ son igualmente probables) y que se realizan cambios en la separación nodal para igualar las separaciones mínimas, el efecto neto sería que un conjunto de satélites ocuparía el mismo arco orbital que resultaría ocupado si todas las inclinaciones fuesen 0° .

Por consiguiente, no es evidente que el número de posiciones nodales sobre un arco orbital dado sea influenciado adversamente por la inclinación de las órbitas.

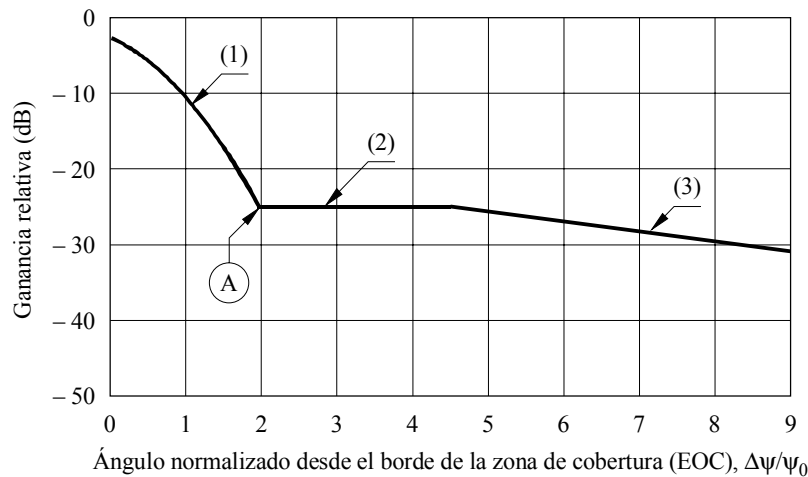
4 Redes por satélite que no tienen cobertura común

En este caso, el análisis es considerablemente más complejo que en el de cobertura común, por lo que el método matemático utilizado anteriormente resulta difícil de aplicar. Por ello, se ha analizado la discriminación total que puede lograrse entre los dos sistemas por satélite mediante las discriminaciones de las antenas del satélite y de la estación terrena con el modelo que exponemos a continuación.

Se supone que un satélite en órbita geostacionaria inclinada tiene un haz circular de cierto diámetro. El haz está dirigido hacia diferentes puntos de la Tierra, y el movimiento de un punto en el borde del haz como consecuencia del desplazamiento del satélite por la órbita inclinada, está representado por el cambio en las coordenadas del satélite. Se evaluó la influencia del movimiento del satélite como una modificación de la ganancia de la antena del satélite en un punto próximo a la zona de cobertura. Se eligió este punto de manera que correspondiera al punto A del diagrama de referencia de la antena del satélite de la Fig. 7. Nominalmente, si no hubiera movimiento de la antena del satélite debido a la inclinación de la órbita, la discriminación de la antena del satélite correspondiente a este punto, sería de 22 dB con referencia al borde de la zona de cobertura (EOC, *Edge of Coverage*). Se eligió este punto para analizar la situación de caso más desfavorable. Se expresó la variación de la ganancia con relación a esta ganancia nominal. Se calculó, asimismo, la discriminación entre este sistema de satélite y un sistema de satélite geostacionario próximo debida a la antena de la estación terrena que funciona con el satélite de órbita inclinada, expresándose con relación a la discriminación que se obtendría si ambos sistemas fueran geostacionarios. Se calculó la discriminación neta relativa total debida a las antenas de estación terrena y del satélite, en función del tiempo, para anchuras del haz del satélite de 1,5° y 3° y para inclinaciones de 3° y 9°. Como se indica en la Fig. 8, el haz del satélite se dirigió hacia tres zonas distintas de la Tierra.

FIGURA 7

Diagrama de referencia de la antena del satélite



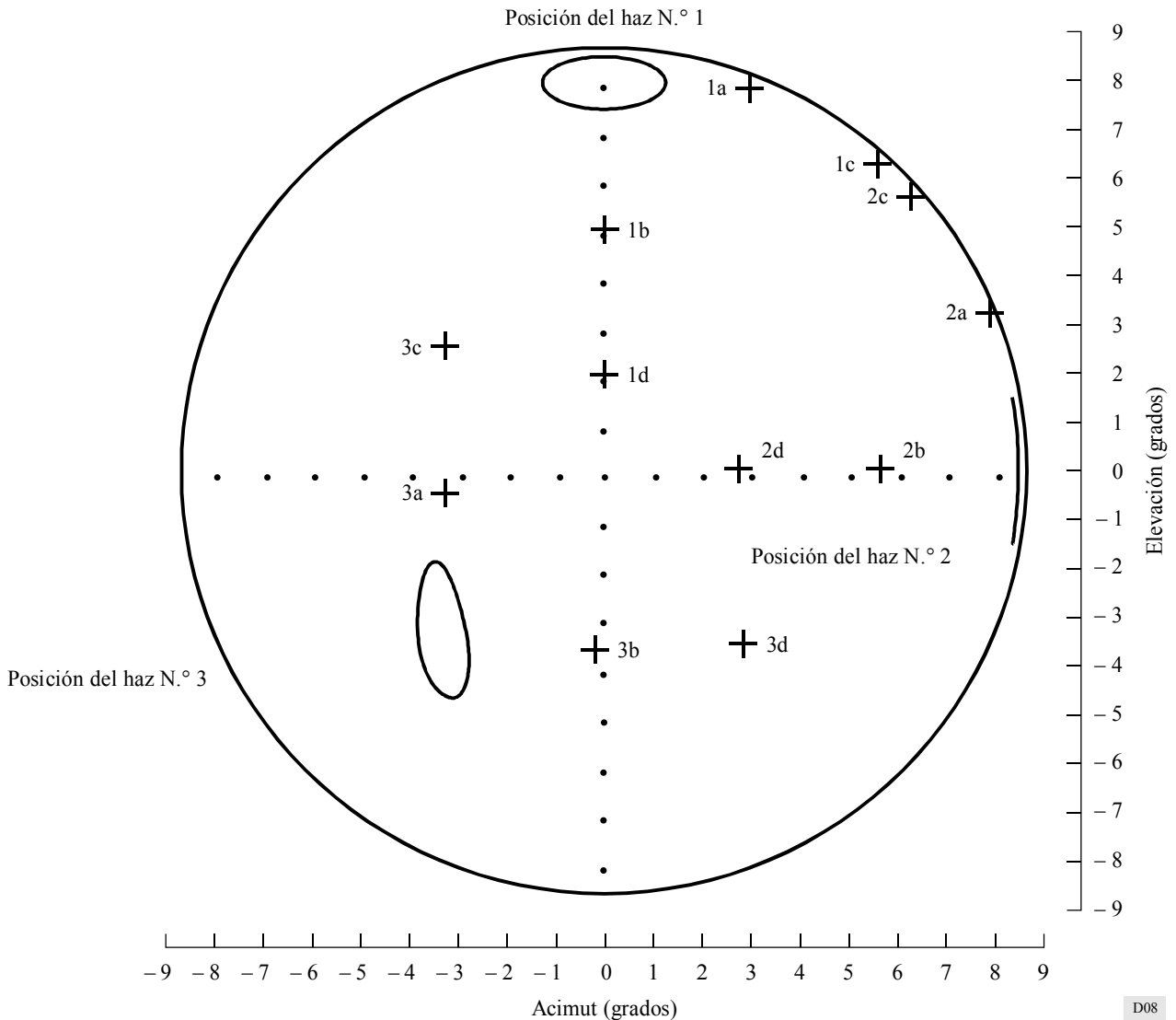
$$(1) \quad \left. \begin{aligned} G(\Delta\psi) &= G_{EOC} - 2,79 [(1 + \Delta\psi/\psi_0)^2 - 1]; \quad 0 < \Delta\psi/\psi_0 < 1,98 \\ G(\Delta\psi) &= G_{EOC} - 3,266 [(0,9(\Delta\psi/\psi_0) + 1)^2 - 1] \end{aligned} \right\} 0 \leq (\Delta\psi/\psi_0) \leq 1,98$$

$$(2) \quad G(\Delta\psi) = G_{EOC} - 22 \text{ dB}; \quad 1,98 < (\Delta\psi/\psi_0) < 4,5$$

$$(3) \quad G(\Delta\psi) = G_{EOC} - 22 - K(\Delta\psi/\psi_0 - 4,5); \quad K = 1,2$$

... hasta $G(\Delta\psi) = 0$ dBi; equivalente a -6 dB/octava

FIGURA 8
Desplazamiento de los haces del satélite en la Tierra
(inclinación 9°) y puntos de control

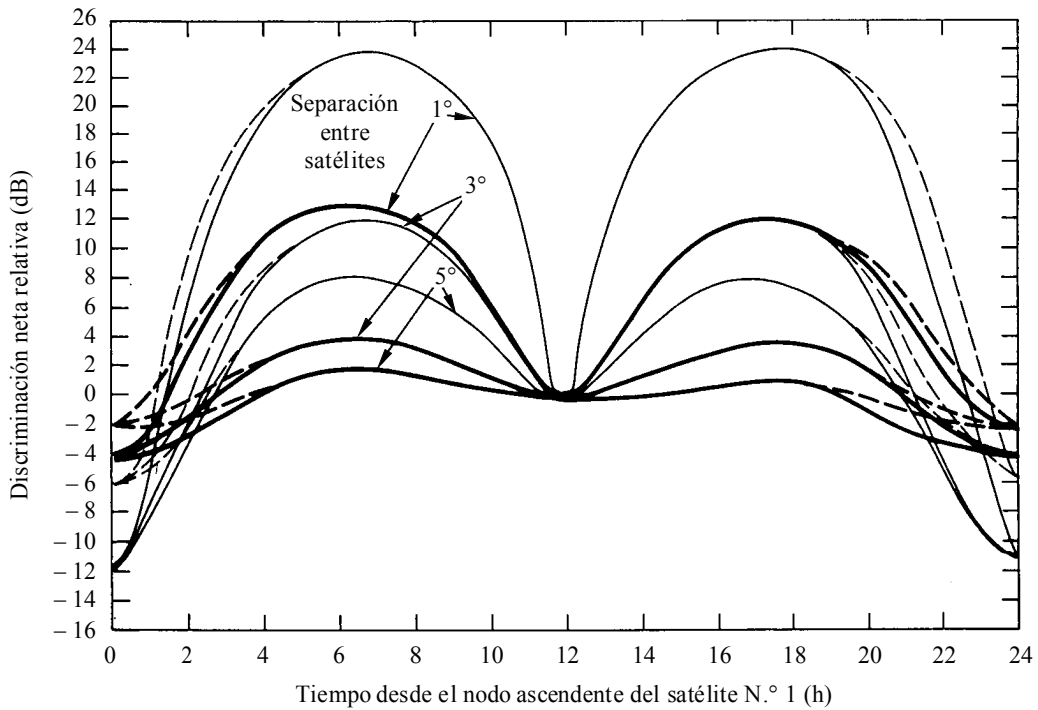


D08

Los resultados de las Figs. 9 a 12, muestran que la discriminación neta entre una red por satélite con órbita ligeramente inclinada y una red por satélite geoestacionario resulta muy influida por las posiciones relativas de las zonas de cobertura de las dos redes. En algunos casos (véase la Fig. 12) la discriminación neta es prácticamente siempre mayor que el valor nominal que se obtendría si ambas redes fueran geoestacionarias. En estos casos, la influencia de la discriminación de la antena del satélite es despreciable. En algunos otros casos en los que la influencia de la antena del satélite es importante, hay una pérdida de la discriminación neta (en comparación con el valor nominal) para un cierto periodo de tiempo durante el día. La magnitud de la pérdida y su duración son funciones de la inclinación, la separación entre satélites y la anchura de la zona de cobertura. Sin embargo, debe subrayarse que, debido a la elección del punto A en el diagrama de antena del satélite (véase la Fig. 7), los resultados anteriores representan el «caso más desfavorable». En muchos casos, las posiciones relativas de las zonas de cobertura de la red por satélite serán de tal naturaleza que el movimiento de la zona de cobertura debido a la explotación con órbita ligeramente inclinada, tendrá un efecto despreciable sobre la discriminación neta entre las dos redes. En esos casos, la variación de la discriminación global vendrá determinada por la discriminación de la antena de la estación terrena, que para este caso (una red con órbita geoestacionaria ligeramente inclinada y una red con órbita geoestacionaria) es siempre igual o mayor que el valor nominal.

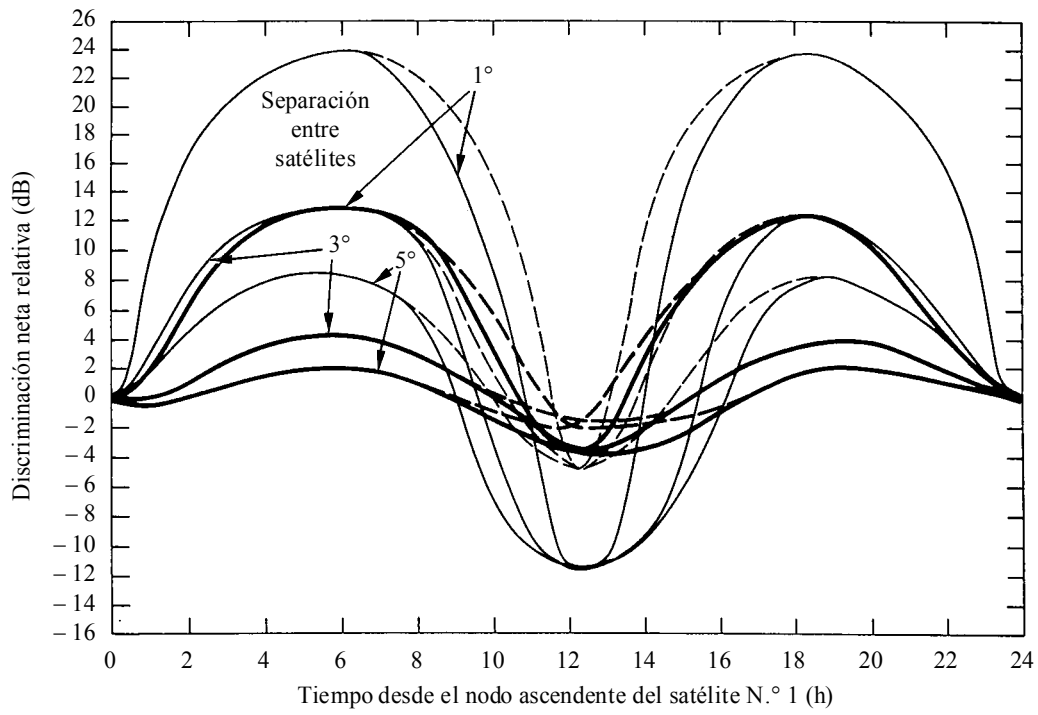
Es necesario realizar más estudios para los casos correspondientes a dos redes de satélites con órbita ligeramente inclinada.

FIGURA 9
Discriminación neta relativa en función del tiempo



Inclinación:	3° (———);	9° (———)
Posición del haz:	1	
Punto de control:	1a } (———);	1c } (———)
Diámetro del haz del satélite:	1,5° } (———);	3,0° } (———)

FIGURA 10
Discriminación neta relativa en función del tiempo



Inclinación: 3° (————); 9° (————)
 Posición del haz: 2
 Punto de control: 2a } (————); 2c } (-----)
 Diámetro del haz del satélite: 1,5° } (————); 3,0° } (-----)

FIGURA 11
Discriminación neta relativa en función del tiempo

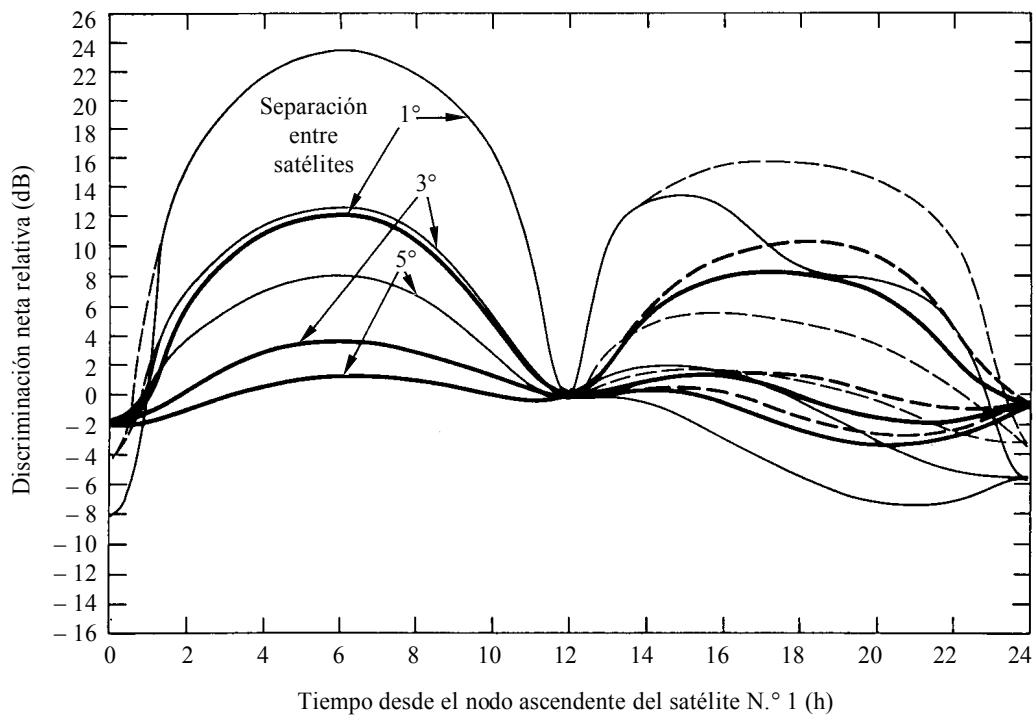
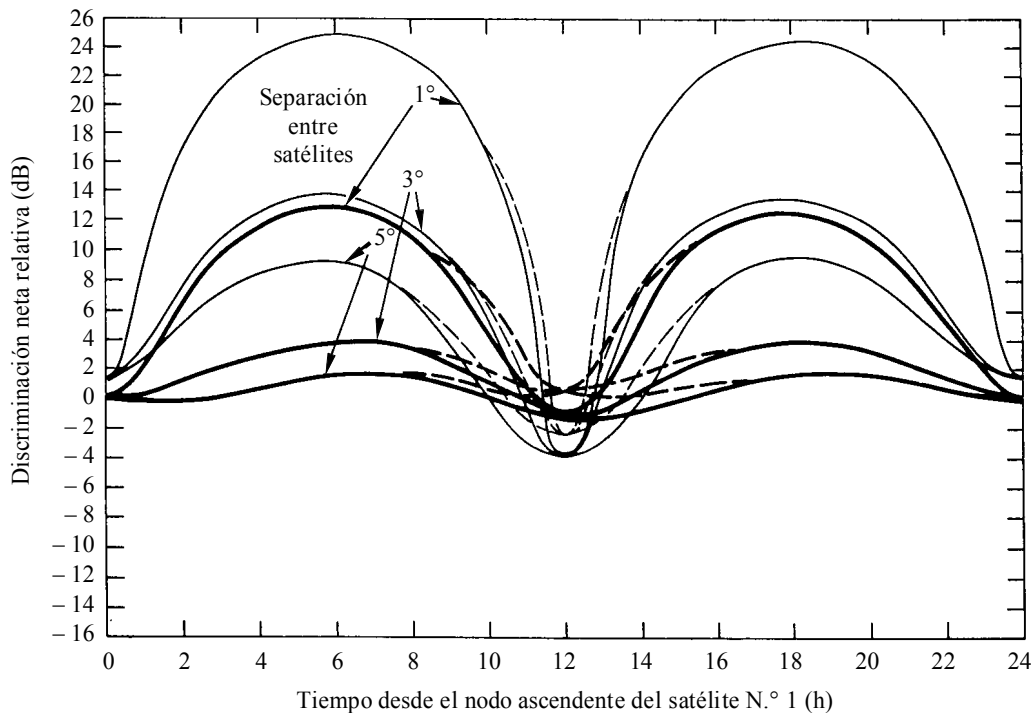


FIGURA 12
Discriminación neta relativa en función del tiempo



Inclinación: 3° (————); 9° (————)
 Posición del haz: 3
 Punto de control: 3a } (————); 3c } (-----)
 Diámetro del haz del satélite: 1,5° } (————); 3,0° } (-----)

D12

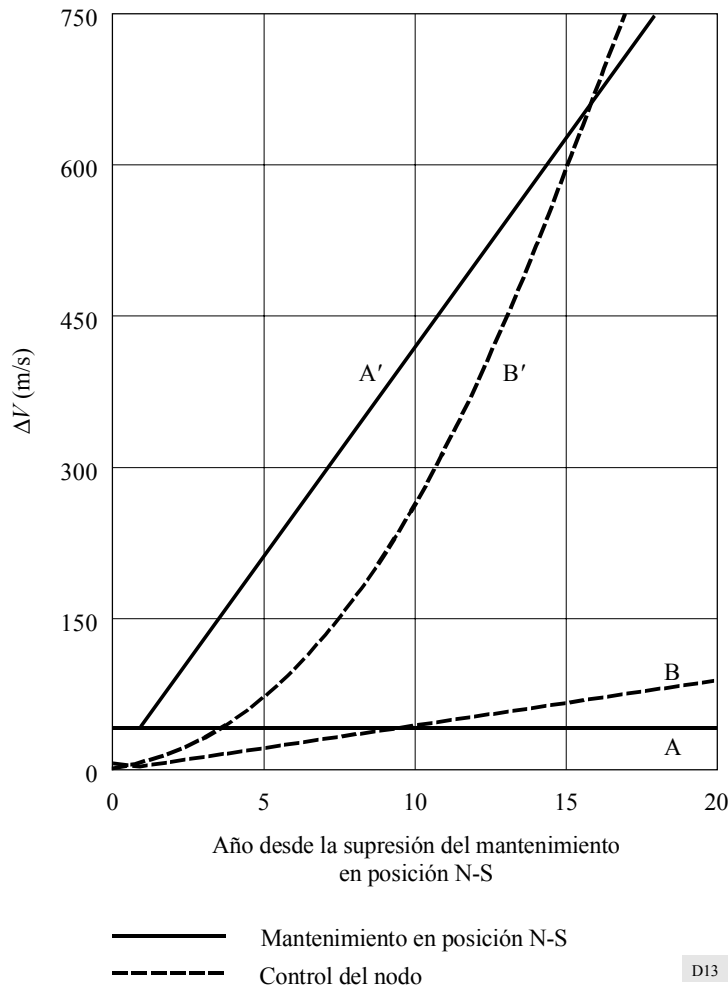
5 Control de la puesta en fase nodal

En los puntos anteriores se ha mostrado que la pérdida por discriminación de la antena de estación terrena es importante cuando la diferencia de fase nodal entre los dos satélites vecinos se aproxima a 270°. Sin embargo, es posible, con un gasto moderado de combustible de mantenimiento en posición, evitar que se produzca el desfase orbital más desfavorable de dos satélites vecinos controlando los nodos orbitales, lo que constituye una modalidad de mantenimiento en posición de segundo orden.

En las dos curvas inferiores de la Fig. 13, se muestran los requisitos anuales en términos de las variaciones de velocidad orbital ΔV para un satélite sometido a un mantenimiento en posición estricto en sentido Norte-Sur (curva A) y para otro satélite sujeto al mantenimiento de su nodo orbital para una ascensión recta de 90° (curva B). Las variaciones de velocidad, que son proporcionales a la cantidad de combustible de mantenimiento en posición necesario para producirlas, se hicieron iguales al cabo de unos 9 años. Considerando las necesidades totales acumuladas de combustible para las dos modalidades de operación, la puesta en fase nodal requeriría la misma cantidad de combustible que el mantenimiento en posición Norte-Sur sólo después de 16 años (par de curvas superiores). En el caso de una explotación por satélite con una duración de 7 años en la que no se efectúe mantenimiento en posición Norte-Sur, el mantenimiento de un nodo con una ascensión recta de 90° gastaría solamente la mitad de combustible que el mantenimiento completo en posición Norte-Sur.

En la práctica, no será necesario mantener el nodo con una ascensión recta de 90° : lo que se requiere es una corrección de nodo que evite la aparición de la geometría de interferencia para el caso más desfavorable. La cantidad necesaria de combustible dependerá, entre otras cosas, de la diferencia de inclinación de los satélites; en situaciones favorables no será necesario el control del nodo aun cuando los satélites de las dos redes potencialmente interferentes recorran, ambos, órbitas ligeramente inclinadas.

FIGURA 13
Requerimientos anuales (par de curvas inferiores)
y acumulados de ΔV



6 Consideraciones sobre la coordinación

A partir de los análisis previos parece que no hay una limitación intrínseca a la coordinación de redes que utilizan satélites en órbitas geostacionarias circulares ligeramente inclinadas.

En el caso de una red geostacionaria y una red que utilice una órbita geostacionaria ligeramente inclinada, el aislamiento entre ambas será igual o mayor que el que correspondería a dos redes por satélites geostacionarios en condiciones de cobertura común. Por tanto, la coordinación será la misma que la que se establecería si ambas redes fueran geostacionarias.

Si las dos redes de satélite utilizan órbitas geoestacionarias ligeramente inclinadas, el aislamiento podría reducirse algo en comparación con el que habría entre redes de satélite geoestacionario, en el caso más desfavorable de puesta en fase nodal de los satélites, así como en condiciones de cobertura común. No obstante, esto se puede determinar y tener en cuenta en la coordinación.

En condiciones de cobertura no común, entra en juego la discriminación de la antena de los satélites, lo que hace más compleja la estimación de los efectos de interferencia. Es posible, también, determinar tales efectos y tomarlos en consideración en el proceso de coordinación.

Sin embargo, se plantea el caso en que se efectúe la coordinación sobre la base de una inclinación de 0°, esencialmente, admitiéndose más tarde una inclinación diferente. Parecería que, en la mayoría de los casos, el aumento de interferencia no sería importante, es decir, que la probabilidad de que presentasen simultáneamente todas las condiciones necesarias para la interferencia de caso más desfavorable es muy pequeña. Por tanto, en la mayoría de los casos no será necesario efectuar una nueva coordinación de una red ya coordinada previamente como geoestacionaria y prevista para suspender el mantenimiento en posición Norte-Sur, con otras redes geoestacionarias.

Si bien, en general, la explotación con órbita inclinada de una red por satélite es admisible sobre la base de acuerdos de coordinación entre redes, que asumen que la red por satélite es geoestacionaria, puede haber algunas circunstancias para las que los acuerdos de coordinación entre redes geoestacionarias proporcionen una protección insuficiente, en el caso de explotación con órbitas inclinadas. Por ello, es necesario determinar las condiciones según las cuales los acuerdos de coordinación entre redes geoestacionarias serán insuficientes para evitar la aparición de interferencia inaceptable entre redes cuando en una o más redes se inicie la explotación con órbita inclinada.
