

RECOMENDACIÓN UIT-R BO.1506

Metodología para evaluar la repercusión de la interferencia solar en la calidad de funcionamiento de los enlaces del servicio de radiodifusión por satélite (SRS) geostacionarios (OSG)

(Cuestión UIT-R 220/11)

(2000)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los enlaces OSG pueden optimizarse para regiones áridas con márgenes de enlace muy pequeños, y por lo tanto, sensibles a la interferencia;
- b) que tales enlaces OSG sensibles a la interferencia presentan niveles de calidad de funcionamiento que vienen determinados por otras fuentes de desvanecimiento y degradación distintas a la lluvia;
- c) que una de estas degradaciones está provocada por los tránsitos solares a través del haz principal de las antenas de recepción y que estas degradaciones pueden ser muy intensas en enlaces con pequeños márgenes o antenas de gran diámetro;
- d) que la calidad de funcionamiento de los enlaces OSG se utiliza en algunas metodologías para determinar los niveles de interferencia aceptable entre sistemas,

recomienda

1 que al diseñar los enlaces del SRS OSG, se utilice la metodología adjunta indicada en el Anexo 1 a esta Recomendación para evaluar el nivel de degradación de la calidad de funcionamiento de los enlaces del SRS OSG causada por el tránsito solar.

NOTA 1 – Cabe señalar que algunos sistemas OSG pueden incorporar medidas operativas (tales como diversidad de emplazamiento o de satélites) para disminuir la influencia del tránsito solar sobre el comportamiento del sistema.

ANEXO 1

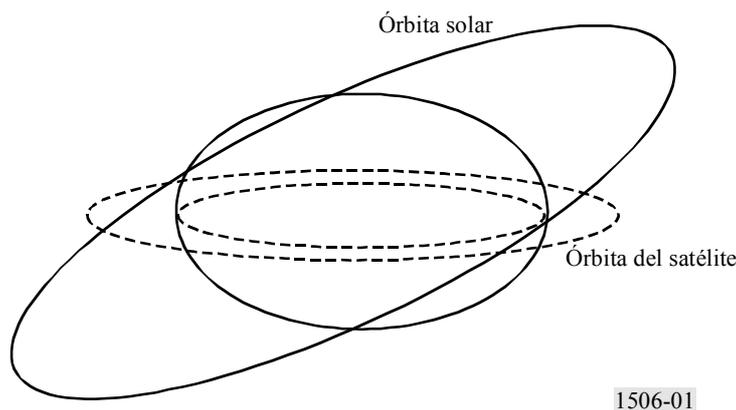
Metodología para evaluar la repercusión de la interferencia solar en la calidad de funcionamiento de los enlaces del SRS OSG**1 Método general**

El tránsito solar en el receptor OSG es un fenómeno que puede evaluarse fácilmente puesto que se conoce muy bien su geometría. Se propone utilizar el siguiente método para describir completamente el efecto del tránsito solar sobre los balances de los enlaces OSG permitiendo de esa forma la evaluación adecuada de la calidad de funcionamiento de algunos enlaces que no necesitan márgenes para compensar los desvanecimientos debidos a la lluvia. La influencia del tránsito solar no se traduce en un desvanecimiento sino en un aumento de la temperatura de ruido del sistema que puede ser muy significativo en algunos enlaces OSG de margen reducido y bajo nivel de ruido.

El método propuesto se basa en la geometría bien conocida de la posición del Sol con respecto a un punto especificado sobre la superficie de la Tierra: el Sol ocupa aproximadamente un disco de $0,53^\circ$ de diámetro visto desde un punto de la Tierra. El efecto del tránsito solar es significativo cuando el disco corta el haz principal de la antena receptora del SRS. Puede calibrarse la repercusión de este efecto utilizando un método detallado o un método simplificado. El método detallado hace variar la ganancia de la antena a lo largo del disco óptico del Sol de acuerdo con un diagrama de ganancia de antena supuesto. El método simplificado supone una ganancia de antena constante a lo largo del disco óptico del Sol correspondiente a la ganancia dirigida hacia el centro del disco solar.

En la Fig. 1 se describe la geometría. El Sol puede considerarse como una fuente de ruido que se desplaza a lo largo de una trayectoria perfectamente definida a través del cielo. Durante los equinoccios de primavera y de otoño, el Sol está situado en la intersección de los planos ecuatorial y eclíptico o próximo a dicho punto. Durante estos instantes, el Sol se encuentra en línea con la antena receptora del SRS y el satélite del SRS OSG. Ello supone un aumento de la temperatura de ruido de la antena que afecta al factor de calidad (G/T) del receptor del SRS en el enlace y, por consiguiente, degrada la relación portadora/ruido (C/N). Dependiendo del margen de cielo despejado del enlace esta degradación puede dar lugar a una interrupción del enlace durante un breve periodo de tiempo.

FIGURA 1



1506-01

2 Metodología

La metodología se basa en el cálculo de la posición relativa del Sol con respecto al eje de puntería de la antena receptora y, por consiguiente, en la estimación del incremento de la temperatura de ruido de la antena debido a la interferencia solar.

Paso 1: Se selecciona el periodo de tiempo a lo largo del cual se van a realizar los cálculos basándose en las fechas de inicio y fin. Se selecciona el intervalo de tiempo en función del tamaño de la antena para la que se realizan los cálculos.

Paso 2: Para cada intervalo de tiempo considerado, se determinan los parámetros orbitales del Sol:

$$w = 282,9404$$

$$e = 0,016709$$

$$M = 356,0470 + 0,98560 T$$

siendo:

w : argumento del perihelio (grados)

e : excentricidad

M : anomalía media (grados)

T : periodo de tiempo (días).

Paso 3: Se convierten estos elementos orbitales en coordenadas ecuatoriales, rectangulares y geocéntricas (X_{Sol} , Y_{Sol} , Z_{Sol}). La anomalía excéntrica E se define de la forma siguiente:

$$E = M + e \operatorname{sen}(M) (1,0 + e \cos(M))$$

por lo tanto:

$$X1 = D_{Sol} (\cos(E) - e)$$

$$Y1 = D_{Sol} \left(\sqrt{1 - e^2} \right) \operatorname{sen}(E)$$

y

$$V = A \operatorname{tg} 2 (Y1, X1)$$

$$R = \sqrt{X1^2 + Y1^2}$$

siendo:

D_{Sol} : distancia entre los centros de la Tierra y del Sol

$A \operatorname{tg} 2()$: función que relaciona un par de coordenadas x , y con el ángulo correcto.

La longitud del Sol, lonSol , viene determinada por:

$$\operatorname{lonSol} = V + w$$

y por último:

$$X_{Sol} = R \cos(\operatorname{lonSol})$$

$$Y_{Sol} = R \operatorname{sen}(\operatorname{lonSol}) \cos(\operatorname{ecl})$$

$$Z_{Sol} = R \operatorname{sen}(\operatorname{lonSol}) \operatorname{sen}(\operatorname{ecl})$$

siendo ecl la oblicuidad de la eclíptica con un valor estimado de $\operatorname{ecl} = 23,4393^\circ$.

Paso 4: Se determinan las coordenadas ecuatoriales, rectangulares y geocéntricas (X_{ET} , Y_{ET} , Z_{ET}) para la estación terrena (ET) y el satélite geoestacionario (SAT):

$$X_{ET} = R_{Tierra} \cos(\operatorname{lat}_{ET}) \cos(\operatorname{lon}_{ET} + (\omega_{Tierra} T))$$

$$Y_{ET} = R_{Tierra} \cos(\operatorname{lat}_{ET}) \operatorname{sen}(\operatorname{lon}_{ET} + (\omega_{Tierra} T))$$

$$Z_{ET} = R_{Tierra} \operatorname{sen}(\operatorname{lat}_{ET})$$

siendo:

R_{Tierra} : radio de la Tierra (6 378 km)

lat_{ET} , lon_{ET} : latitud y longitud de la estación terrena

ω_{Tierra} : velocidad angular de la Tierra (rad/días) ($2\pi = 6,2831$)

T : intervalo de tiempo considerado (días)

y para el satélite geoestacionario:

$$X_{SAT} = (R_{Tierra} + H) \cos(lat_{SAT}) \cos(lon_{SAT} + (\omega_{Tierra} T)) = (R_{Tierra} + H) \cos(lon_{SAT} + (\omega_{Tierra} T))$$

$$Y_{SAT} = (R_{Tierra} + H) \cos(lat_{SAT}) \sin(lon_{SAT} + (\omega_{Tierra} T)) = (R_{Tierra} + H) \sin(lon_{SAT} + (\omega_{Tierra} T))$$

$$Z_{SAT} = (R_{Tierra} + H) \sin(lat_{SAT}) = 0$$

siendo:

$$lat_{SAT} = 0$$

H : altitud del satélite OSG (35 786 km).

Paso 5: El ángulo α entre el Sol, S , la estación terrena, E , y el satélite OSG, G , puede obtenerse mediante la expresión:

$$\vec{ES} \cdot \vec{EG} = \left| \vec{ES} \right| \left| \vec{EG} \right| \cos(\alpha)$$

de forma que:

$$\alpha = A \cos \left\{ \frac{(X_{Sol} - X_{ET})(X_{SAT} - X_{ET}) + (Y_{Sol} - Y_{ET})(Y_{SAT} - Y_{ET}) + (Z_{Sol} - Z_{ET})(Z_{SAT} - Z_{ET})}{\sqrt{[(X_{Sol} - X_{ET})^2 + (Y_{Sol} - Y_{ET})^2 + (Z_{Sol} - Z_{ET})^2] [(X_{SAT} - X_{ET})^2 + (Y_{SAT} - Y_{ET})^2 + (Z_{SAT} - Z_{ET})^2]}} \right\}$$

Este ángulo es el ángulo con respecto al eje del Sol observado desde la antena.

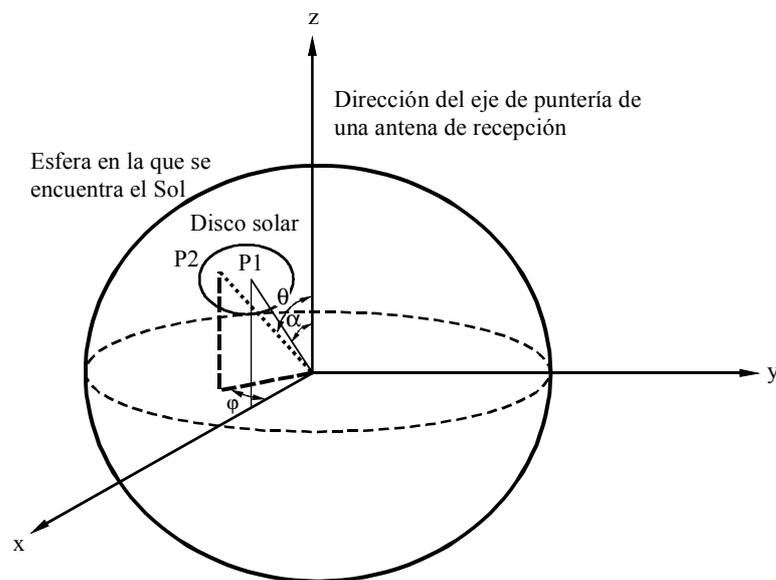
Paso 6: Se determina el valor de la ganancia de antena a lo largo del disco solar: $\iint_{Sol} G(\theta, \phi) d\Omega$

siendo θ el ángulo con respecto al eje y ϕ el ángulo acimutal.

a) Método detallado

El Sol se simula mediante un disco situado en una esfera centrada en la estación terrena receptora. La esfera representa el espacio observado por la antena utilizando los ángulos esféricos θ y φ .

FIGURA 2



- φ : ángulo del azimut
 θ : ángulo fuera del eje de puntería (el eje de puntería está definido por el eje z)
 α : ángulo de elevación entre el centro del Sol y el eje z
 eje z: dirección del eje de puntería de una estación receptora
 P1: centro del Sol
 P2: cualquier punto del disco solar

1506-02

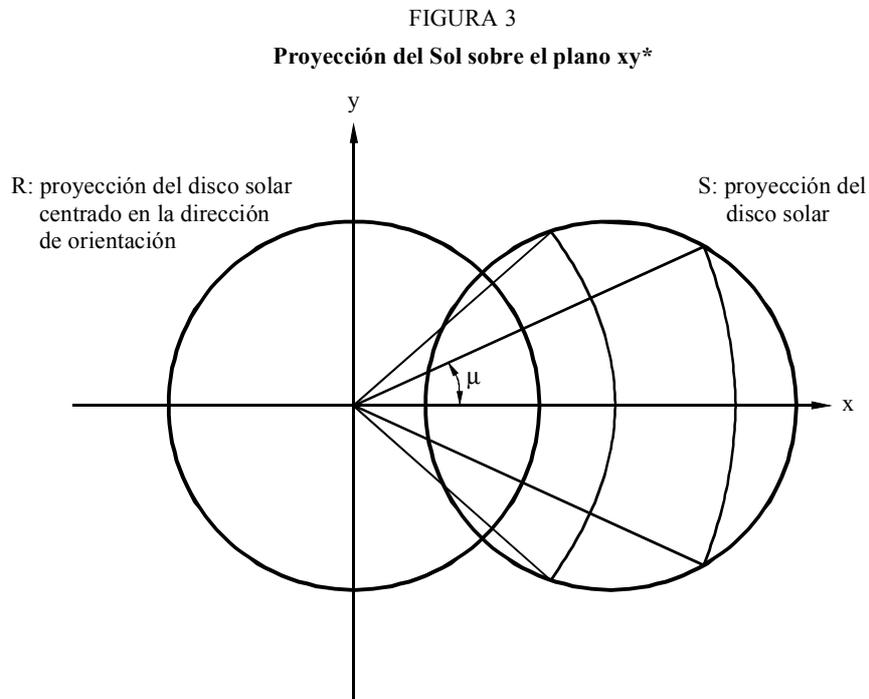
El eje z es el eje de orientación de la antena receptora.

El cálculo puede aprovechar la simetría axial de la geometría: los puntos con la misma ganancia forman arcos. Ello se deriva de la intersección de un plano perpendicular al eje de antena z con la parte de esfera que contiene el Sol.

El valor de la integral se determina mediante la adición de las diferentes longitudes de los arcos de isogancia, multiplicadas por el valor de la ganancia para el arco.

Si β es el ángulo mitad de observación del Sol ($0,266^\circ$), se presentan dos casos:

Caso 1: Si $\alpha > \beta$:



* A efectos de simplificación, la Figura muestra una proyección del disco solar circular, aunque en realidad no es así.

1506-03

El disco R es la proyección del Sol cuando está centrado en el eje z. Cuando el Sol no se encuentra en dicho eje, los cálculos de la ganancia de la antena receptora en dirección del Sol se realizan mediante la integración a lo largo de los arcos de isogancia que tiene una apertura mitad μ que puede variar de 0 a π . Para determinar la ganancia total en dirección del disco solar, $\iint_{Sol} G(\theta, \varphi) d\Omega$, se utiliza la siguiente fórmula cuando μ es más pequeño que π .

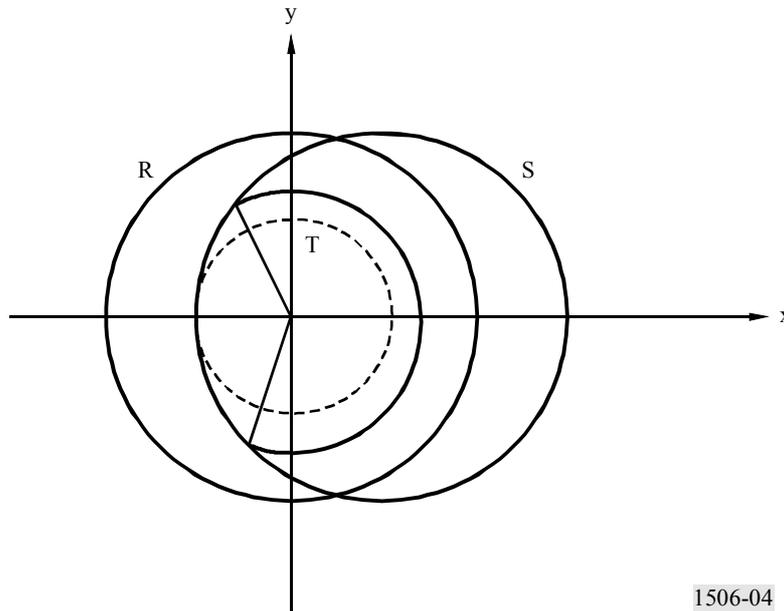
$$\iint_{Sol} G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=\alpha-\beta}^{\theta=\alpha+\beta} 2 \mu \operatorname{sen}(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

donde:

$$\mu = A \cos \left\{ \frac{[\cos(\beta) - \cos(\theta) \cos(\alpha)]}{\operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\alpha)} \right\}$$

Caso 2: Si $\alpha < \beta$:

FIGURA 4



El cálculo anterior es válido para todos los arcos que corresponden a las líneas iso- θ de menos de $(\beta - \alpha)$ (representadas por el círculo de puntos, T, de la Fig. 4). Para valores más bajos de θ , el cálculo de la ganancia a lo largo de la porción del disco solar se simplifica aprovechando la simetría axial de la geometría con respecto al eje z:

$$\iint G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=0}^{\theta=\beta-\alpha} 2\pi \text{sen}(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

siendo:

$G(\theta)$: ganancia de la antena isótropa lineal (función del ángulo θ con respecto al eje)

$\Delta\theta$: incremento angular.

b) Método simplificado

El Sol únicamente subtende un ángulo de aproximadamente $0,53^\circ$ (θ_{Sol}) visto desde la Tierra y si se supone que fuera de θ_{Sol} la ganancia de antena normalizada (G_n) se promediará para que sea G_n dirigida hacia el centro del Sol ($G_{n,Sol}$), la integral $\iint_{Sol} G(\theta, \varphi) d\Omega$: puede aproximarse de la forma siguiente:

$$\iint_{Sol} G(\theta, \varphi) d\Omega = 2\pi G_{n,Sol} \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_{Sol}}{2}\right) \right]$$

Paso 7: Se determina el valor de la ganancia a lo largo de todo el espacio: $\iint_{Espacio} G(\theta, \varphi) d\Omega$

Debido al eje z de los diagramas de antena de las Recomendaciones UIT-R, los cálculos son directos:

$$\iint_{\text{Espacio}} G(\theta, \varphi) d\Omega = \sum_{\theta=0}^{\theta=\pi} 2\pi \sin(\theta) G(\theta) \Delta\theta$$

siendo:

$G(\theta)$: ganancia de la antena isotrópica lineal que depende únicamente del ángulo θ con respecto al eje

$\Delta\theta$: incremento angular.

Paso 8: Se determina la temperatura del Sol: $T_{Sol} = 120\,000 \times \gamma \times f^{-0,75}$

siendo f la frecuencia y γ el factor de polarización, fijado en este caso a un valor de 0,5, debido a la polarización fija de la antena y la polarización aleatoria del sol.

Paso 9: Se determina el incremento de temperatura en la antena de recepción:

$$\Delta T = \frac{\iint_{\text{Sol}} T_{Sol} \times G(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{\text{Espacio}} G(\theta, \varphi) d\Omega} = \frac{T_{Sol} \times \iint_{\text{Sol}} G(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{\text{Espacio}} G(\theta, \varphi) d\Omega}$$

Paso 10: Se determina la degradación de la relación C/N del receptor de la forma siguiente:

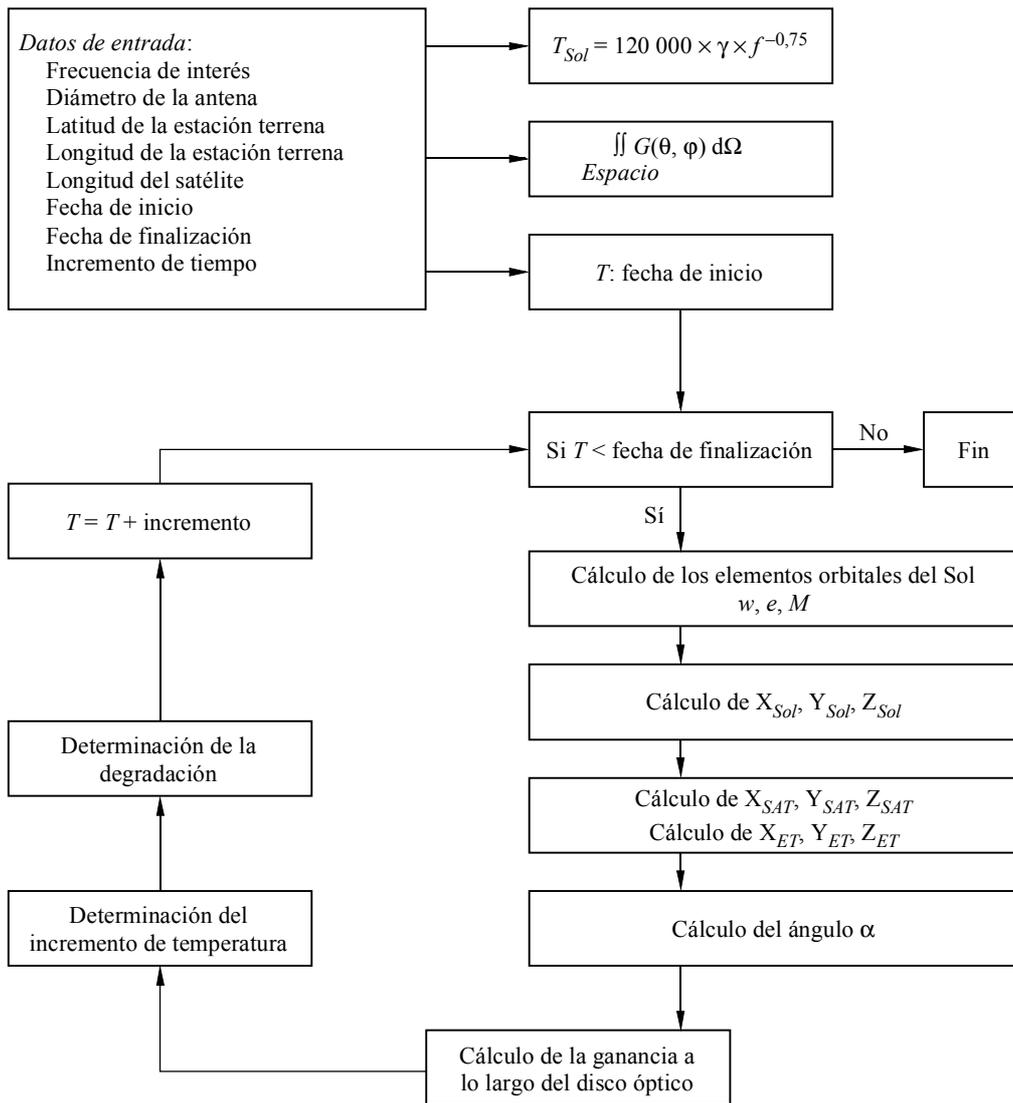
$$\Delta(C/N) = 10 \log \left(\frac{T_0 + \Delta T}{T_0} \right)$$

siendo T_0 la temperatura de ruido del sistema inicial.

3 Algoritmo para tener en cuenta los tránsitos solares en los balances del enlace

En el análisis que utiliza balances del enlace dinámico para el análisis de interferencia tales como los casos no OSG/OSG, puede insertarse la interferencia solar en los balances del enlace de acuerdo con el siguiente algoritmo, a partir del cual puede determinarse la influencia solar sobre la calidad de funcionamiento (porcentaje de tiempo durante el cual se satisface un valor determinado del nivel C/N) de los enlaces analizados. También puede utilizarse para calcular la duración de las degradaciones así como su frecuencia de aparición.

FIGURA 5

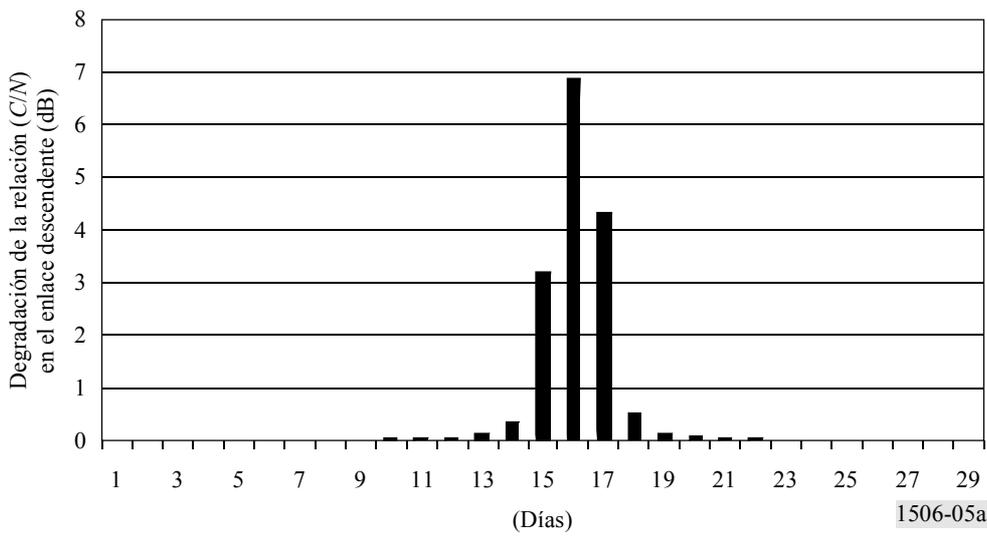
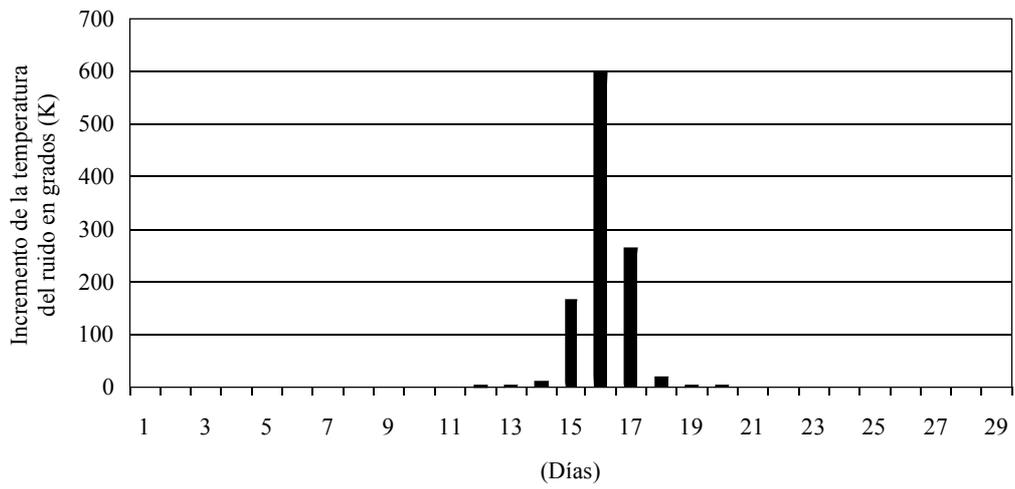


1506-05

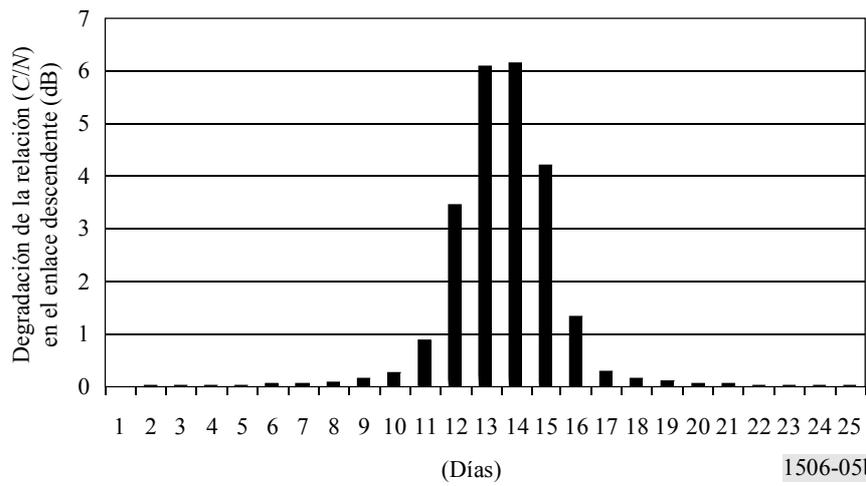
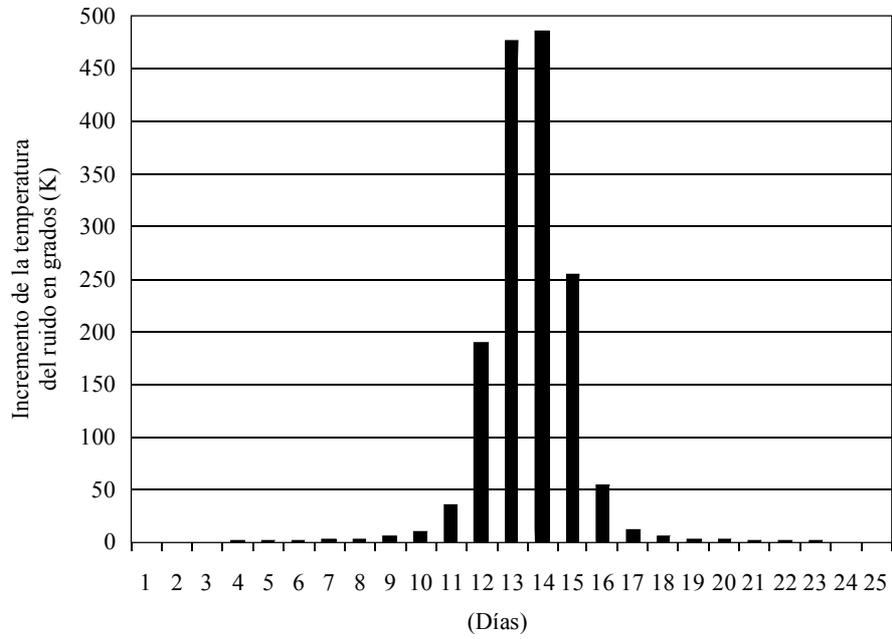
4 Aplicación de la metodología para diferentes tamaños de antena

El método detallado descrito en los puntos anteriores se ha aplicado para distintos tamaños de antena. En todos los casos la temperatura de ruido inicial utilizada fue de 155 K a 12,5 GHz y los diagramas de antena empleados son los que aparecen en la Fig. 8 del Anexo 5 al Apéndice S30 del RR.

Para antenas de 3 m de diámetro:

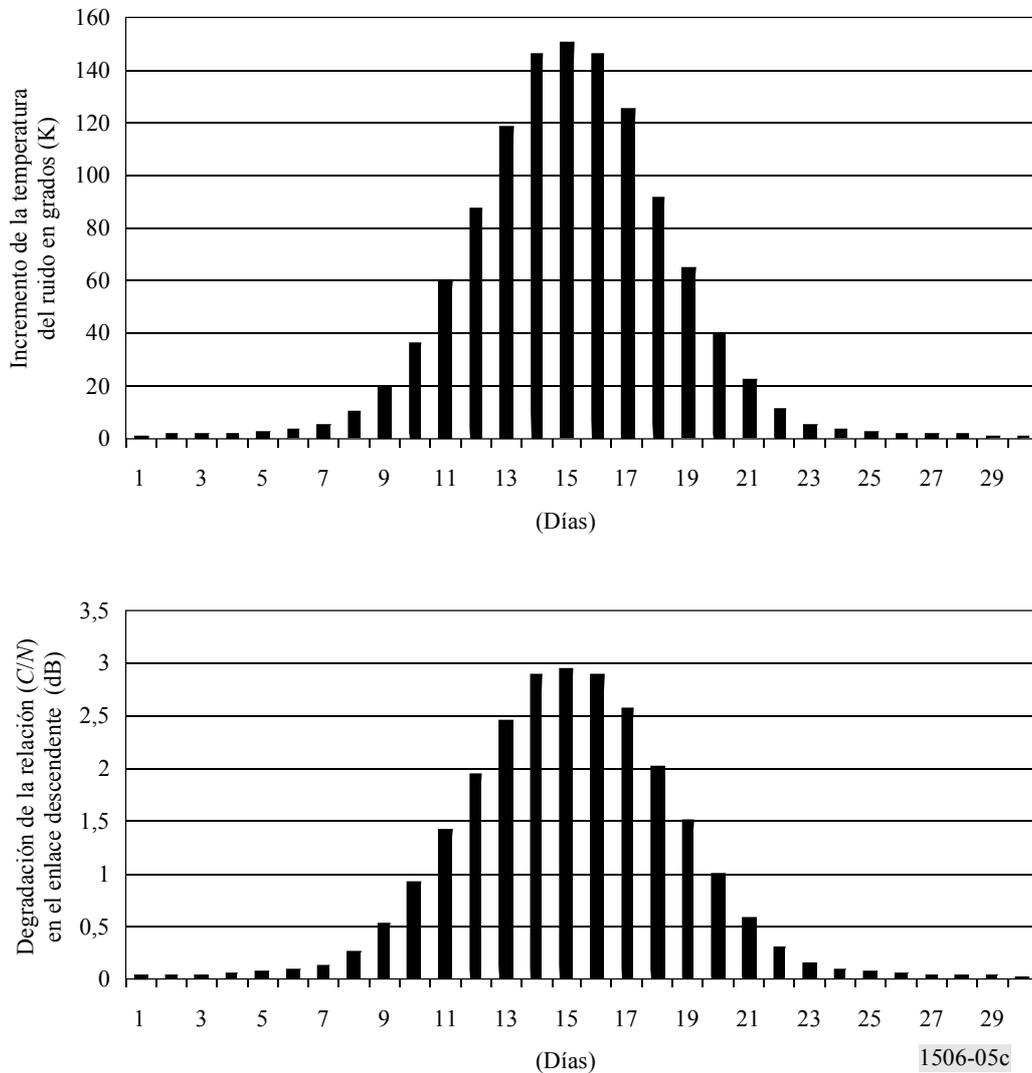


Para antenas de 1,8 m de diámetro:



1506-05b

Para antenas de 0,6 m de diámetro:

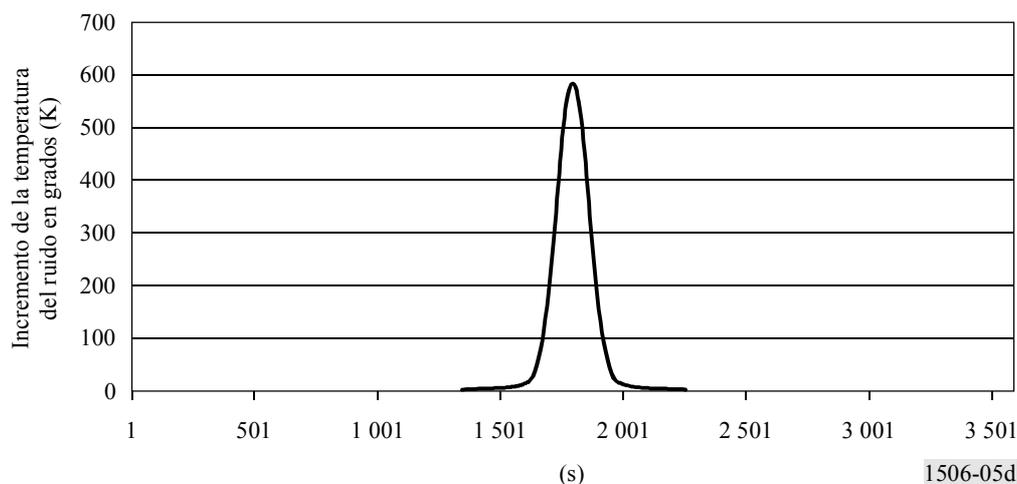


Como cabía esperar, los resultados demuestran que la profundidad de la degradación de la relación C/N es función del tamaño de la antena y que la duración del tránsito solar aumenta a medida que disminuye el diámetro de la antena.

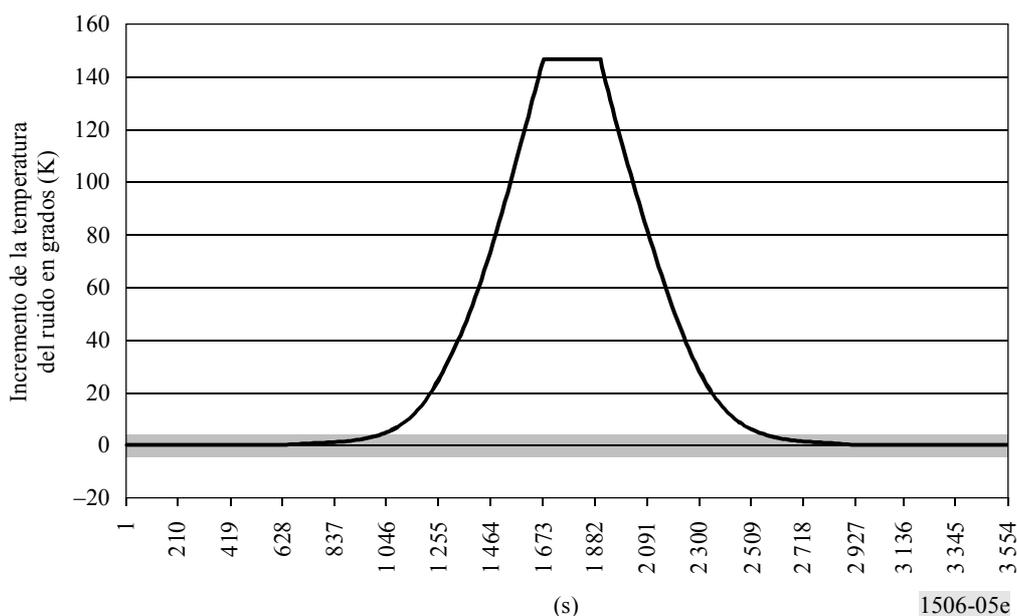
5 Variación durante un día

Se han realizado cálculos basándose en el método detallado para mostrar un perfil de tiempo de la degradación de la relación C/N en función de la hora de un día próximo al periodo equinoccial. El incremento de tiempo se ha fijado a 1 s.

Para antenas de 3 m de diámetro:



Para antenas de 0,6 m de diámetro:



6 Comparación de los dos métodos para distintos tamaños de antena

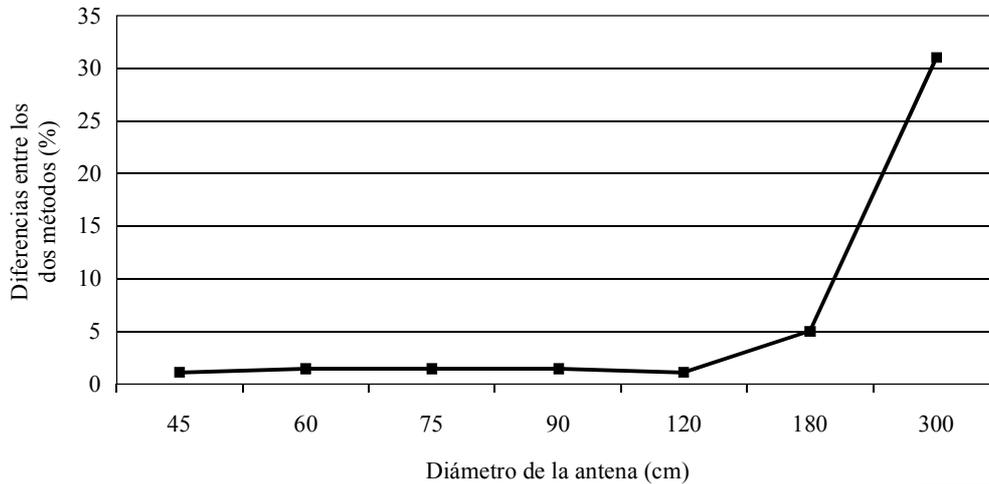
Los ejemplos que aparecen a continuación muestran los resultados obtenidos utilizando los dos métodos para evaluar la interferencia del Sol en los enlaces del SRS OSG. El Cuadro 1 muestra los incrementos estimados en la temperatura de ruido de la antena obtenidos utilizando los dos métodos. En el método simplificado, la ganancia de la antena a lo largo del disco óptico del Sol se ha supuesto constante y corresponde a la ganancia dirigida hacia el centro del disco solar. Ello se traduce generalmente en que la temperatura máxima estimada aumenta y es superior a la obtenida utilizando el método detallado. Como se observa en la Fig. 6, para aperturas de antena más pequeñas que las utilizadas normalmente en los sistemas del SRS, por ejemplo $\leq 1,8$ m, existe una máxima diferencia de aproximadamente el 5%. Sin embargo, esta diferencia rápidamente aumenta hasta el 30% para una antena de 3 m de diámetro.

CUADRO 1

Máximo incremento de la temperatura de ruido según los distintos diámetros de antena

Diámetro de antena	Máximo incremento de la temperatura de ruido (método detallado) (K)	Máximo incremento de la temperatura de ruido (método simplificado) (K)
45 cm	91,8	93,0
60 cm	146,6	148,8
75 cm	200,1	202,9
90 cm	254,2	257,6
1,8 m	529,0	557,1
3,0 m	594,6	780,5

FIGURA 6

Diferencias de la temperatura de ruido (en porcentaje) entre los dos métodos

1506-06

7 Conclusiones

El tránsito solar puede provocar una degradación muy significativa en los enlaces del SRS OSG durante el periodo de los equinoccios de primavera y de otoño, durante los cuales el Sol aparece de vez en cuando en alineamiento casi perfecto con la dirección de orientación de las antenas receptoras de la estación terrena OSG.

La influencia sobre la calidad de funcionamiento del enlace depende del tamaño de la antena y de la temperatura de ruido inicial del enlace. Para antenas de gran tamaño con elevada ganancia, la degradación de la relación C/N puede ser de hasta unos 7 dB (para un enlace con una temperatura de ruido inicial de 155 K) pero se produce con menos frecuencia que en el caso de antenas pequeñas con haces más amplios.

Con el método detallado se obtiene más detalle y precisión pero la complejidad del análisis es mayor. El método simplificado es menos complejo de aplicar. Para las antenas de apertura pequeña normalmente utilizadas en los sistemas del SRS (es decir, $\leq 1,8$ m), pueden utilizarse ambos métodos para evaluar la interferencia del Sol en los enlaces del SRS OSG con un error inferior a 0,1 dB.