

## RECOMENDACIÓN UIT-R BO.794\*,\*\*

**Técnicas para reducir al mínimo el efecto de la influencia de la lluvia sobre el enlace de conexión respecto a las características generales de los sistemas del servicio de radiodifusión por satélite\*\*\***

(Cuestión UIT-R 86/11)

(1992)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

*considerando*

- a) que cualquier degradación de los enlaces de conexión afectará a la calidad de funcionamiento del servicio de radiodifusión por satélite (SRS) en toda la zona de servicio;
- b) que el transpondedor del satélite del SRS debe mantenerse en el nivel nominal de salida para minimizar la influencia del desvanecimiento en el enlace de conexión sobre la p.i.r.e. del enlace descendente;
- c) que, si bien un uso excesivo de control automático de ganancia a bordo del vehículo espacial puede entrañar un aumento de la interferencia dentro del propio sistema y entre sistemas, el mismo permite mantener la salida del transpondedor en su nivel nominal o próxima a ese valor, aunque no mejorará la relación portadora/ruido del enlace de conexión;
- d) que, aunque el control de potencia del enlace de conexión podría hacer aumentar la interferencia entre sistemas, su aplicación permite mantener la salida del transpondedor en su nivel nominal o próxima a ese valor sin que se degrade la relación  $C/N$  del enlace de conexión;
- e) que, aunque la diversidad de espacio puede plantear complejos problemas de explotación, es una técnica eficaz para reducir el desvanecimiento del enlace de conexión, especialmente en las zonas de elevada precipitación,

*recomienda*

que, en la medida de lo posible, se empleen las técnicas que se mencionan a continuación a fin de reducir la degradación que sufren los sistemas del SRS debido a la atenuación causada por la lluvia en los enlaces de conexión:

- control automático de ganancia a bordo del satélite (véase el Anexo 1);
- control de potencia del enlace ascendente (véase el Anexo 2);
- diversidad de espacio (véase el Anexo 3).

---

\* La presente Recomendación debe señalarse a la atención de la Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones.

\*\* La Comisión de Estudio 6 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2001 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

\*\*\* Nota – Para preparar esta Recomendación se utilizó el Informe UIT-R BO. 952-2 (§ 5.4.1, 5.4.2 y 7).

## ANEXO 1

**Control automático de ganancia a bordo del satélite (CAG)**

El control automático de ganancia a bordo del vehículo espacial hace mínimo el efecto de los desvanecimientos causados por la lluvia en la estación del enlace de conexión sobre la relación  $C/N$  del enlace descendente porque mantiene el amplificador de tubo de ondas progresivas TOP en saturación. El CAG electrónico opera en distintos canales y aumenta la ganancia del transpondedor de la señal deseada y de toda parte de una señal interferente que caiga dentro de la anchura de banda del filtro de canal deseado. Por tanto, durante la lluvia en la estación o estaciones del enlace de conexión, el empleo del CAG permite el funcionamiento del transpondedor cerca del punto de saturación, pero la relación «portadora deseada/porción de la portadora contrapolar adyacente interferente» que cae dentro de la anchura de banda del filtro del canal deseado permanece constante. Así pues, el empleo del CAG no tiene ningún efecto sobre la  $C/I_u$  contrapolar en los dos enlaces de conexión.

Sin embargo, el satélite que emplea CAG radia en el enlace descendente un nivel constante de la señal deseada, que había sido atenuada en el enlace de conexión, pero rerradia en el enlace descendente un nivel más alto de la señal contrapolar interferente en el canal adyacente, señal que no había resultado atenuada en ausencia de lluvia en el enlace de conexión interferente. Esta situación puede ocasionar un aumento de la interferencia en enlace descendente a otros sistemas que reciben esa rerradiación como interferencia cocanal. Este problema podría tener importancia sólo para satélites coubicados que cubren zonas de servicio comunes o adyacentes.

Para evitar este problema de rerradiación en el enlace descendente, puede ser necesario limitar a menos de 10 a 15 dB la gama del CAG en satélites coubicados con canales contrapolarizados. Puede reducirse este problema con una separación mínima de  $0,3^\circ$  en la órbita de los satélites geoestacionarios con canales contrapolarizados que cubren la misma zona de servicio o zonas de servicio adyacentes. No es necesario observar ese límite de la gama del CAG para satélites con canales contrapolarizados no coubicados. Para ciertos ángulos de elevación y en algunas zonas hidrometeorológicas, podría ser insuficiente el límite de 10 dB de la gama del CAG para mantener constante la salida del amplificador TOP. En tales circunstancias, podría ser necesario utilizar algún otro mecanismo (control de potencia, diversidad de emplazamientos) para mantener un nivel de señal constante en el enlace descendente.

El Plan de la Región 2 para los enlaces de conexión se funda en la limitación a 15 dB de la gama dinámica del CAG a bordo de ciertos vehículos espaciales con polarización cruzada, como protección contra la rerradiación sobre el enlace descendente.

## ANEXO 2

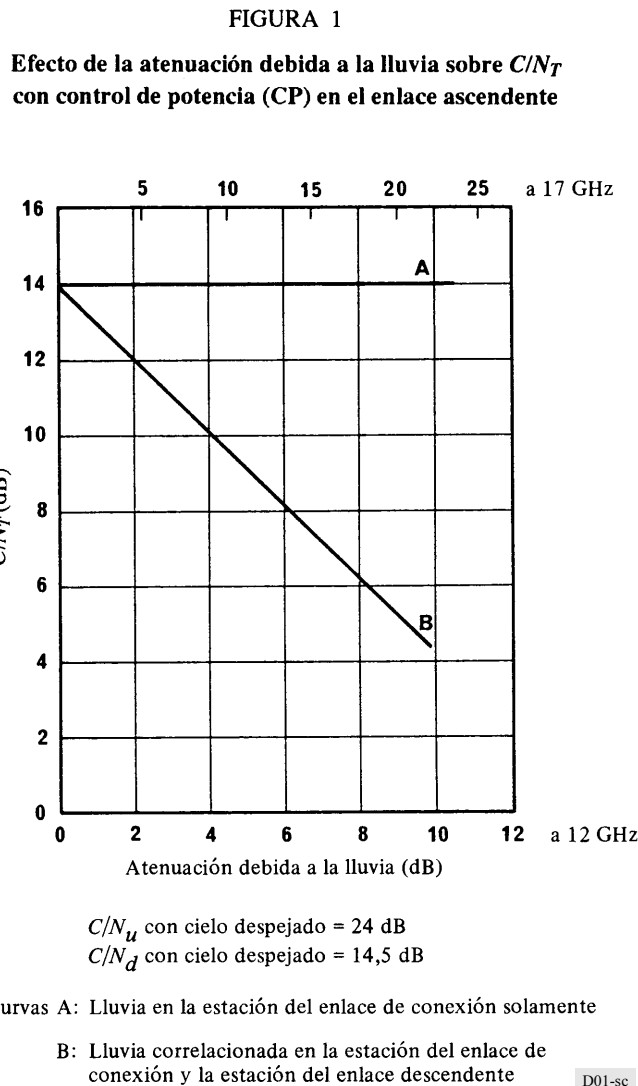
**Control de potencia en el enlace de conexión**

El control de potencia en los enlaces de conexión es el ajuste rápido y automático de la potencia del transmisor de la estación terrena para compensar la atenuación debida a la lluvia en el trayecto de la señal deseada al satélite.

# 1 Aplicación del control de potencia

Cuando se utiliza control de potencia (CP) en el enlace de conexión, el nivel de entrada de la señal en el transpondedor del satélite se mantiene aproximadamente constante y la atenuación causada por la lluvia a lo largo del trayecto del enlace de conexión queda efectivamente compensada.

Como consecuencia, cuando solamente llueve en la estación del enlace de conexión, el empleo de control de potencia en el enlace de conexión mantiene constante el valor de  $C/N_T$  según se puede ver en la Fig. 1.



Experimentos realizados en Japón con un satélite experimental de radiodifusión (BSE) han demostrado que el control de potencia es útil para mantener un nivel casi constante de la portadora deseada durante periodos de lluvia. En este experimento, llevado a cabo en 14 GHz, una variación de la potencia recibida en el satélite de 6 dB (cresta a cresta) y de 1,5 dB (valor cuadrático medio) sin control de potencia, se redujo, con la aplicación del control de potencia a 1,5 dB (cresta a cresta) y a 0,5 dB (valor cuadrático medio), respectivamente.

## 2 Condiciones de utilización del control de potencia sin aumentar la interferencia

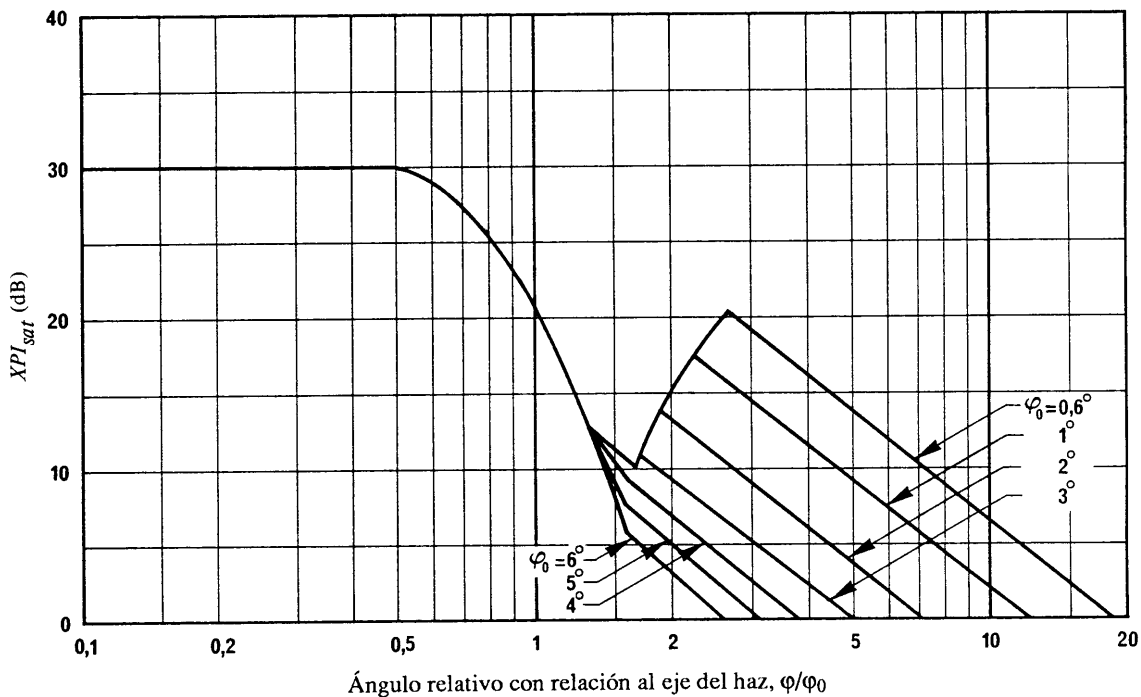
En este punto se analiza la utilización del control de potencia para aumentar la disponibilidad de los enlaces de conexión más allá de los valores utilizados para la planificación.

En el estudio de los problemas de interferencia en los enlaces de conexión los emplazamientos geográficos de las estaciones terrenas interferentes y de las zonas de cobertura de los enlaces de conexión deseados son factores importantes que influyen en la relación portadora/interferencia del enlace de conexión. Estos factores influyen en la discriminación por polarización cruzada ( $XPI_{sat}$ ) de la antena del satélite deseado, porque  $XPI_{sat}$  está en función de la relación del ángulo fuera del eje,  $\varphi$ , y la anchura del haz a potencia mitad,  $\varphi_0$ .

Para el diagrama de radiación de referencia de antenas receptoras de satélite mostrado en la Fig. 10 de la Recomendación UIT-R BO.652,  $XPI_{sat}$  puede expresarse gráficamente en la Fig. 2.

FIGURA 2

**Discriminación por polarización cruzada ( $XPI_{sat}$ ) de la antena receptora del satélite**  
(se supone que los diagramas de radiación de referencia son los de la Fig.10 de la Recomendación UIT-R BO.652)



$\varphi_0$ : Anchura del haz a potencia mitad

$$XPI_{sat} \text{ (dB)} = G_{rcwi} \text{ (dB)} - G_{rxwi} \text{ (dB)}$$

794-02

A fin de analizar el efecto de la  $XPI_{sat}$  sobre la  $C/I_u$  seguidamente figura la ecuación (1) de  $C/I_u$  que incluye explícitamente el parámetro  $XPI_{sat}$ :

$$\frac{C}{I_u} = \frac{P_w}{P_i} \cdot \frac{L_i}{L_w} \cdot \frac{R_i}{R_w} \cdot \frac{G_{rcww}}{G_{rcwi}} \cdot \frac{1}{A + \frac{1}{XPI_{sat}} + \frac{1}{XPI_{es}}} \quad (1)$$

donde:

- $P_w$ : potencia del transmisor en la estación terrena deseada  
 $P_i$ : potencia del transmisor en la estación terrena interferente  
 $L_w$ : pérdida por dispersión (en el espacio libre) para el trayecto deseado  
 $L_i$ : pérdida por dispersión (en el espacio libre) para el trayecto interferente  
 $R_w$ : atenuación debida a la lluvia sobre el trayecto deseado  
 $R_i$ : atenuación debida a la lluvia sobre el trayecto interferente  
 $G_{rcww}$ : ganancia copolar de la antena de recepción del satélite deseado en la dirección de la estación terrena deseada  
 $G_{rcwi}$ : ganancia copolar de la antena del receptor del satélite deseado en la dirección de la estación terrena interferente  
 $A$ : coeficiente de despolarización debida a la lluvia; se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$A = 10^{-(XPD/10)}$$

donde

$XPD$ : despolarización debida a la lluvia, que viene dada por:

$$XPD = 30 \log f - 40 \log (\cos \theta) - V \log A_p \quad \text{dB} \quad \text{para } 5^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$$

donde:

$V = 20$  (por debajo de 15 GHz) y

$V = 23$  (por encima de 15 GHz)

$A_p$ : atenuación copolar debida a la lluvia rebasada durante el 1% del mes más desfavorable

$f$ : frecuencia (GHz)

$\theta$ : ángulo de elevación (grados).

Para los valores de  $\theta$  superiores a  $60^\circ$  utilícase  $\theta = 60^\circ$  en la ecuación anterior.

$XPI_{sat}$ : relación entre las ganancias copolar ( $G_{rcwi}$ ) y de la polarización cruzada ( $G_{rxwi}$ ) de la antena receptora del satélite deseado en la dirección de la estación terrena interferente, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$XPI_{sat} = G_{rcwi}/G_{rxwi}$$

$XPI_{et}$ : relación entre las ganancias copolar ( $G_{tci}$ ) y de polarización cruzada ( $G_{txi}$ ) de la antena transmisora de la estación terrena interferente en dirección del satélite deseado, expresada mediante la siguiente ecuación:

$$XPI_{et} = G_{tci}/G_{txi}$$

De esta forma  $XPI_{sat}$  y  $XPI_{et}$  indican la capacidad de la antena del satélite y de la antena del transmisor de la estación terrena respectivamente para discriminar la polarización cruzada.

Cuando se utiliza control de potencia en un enlace interferente, la modificación de la relación  $C/I_u$  en un enlace interferente  $\Delta M$ , se puede expresar como sigue:

$$\Delta M = \frac{C/I_{u, lluvia}}{C/I_{u, cielo despejado}} = \frac{R_i}{\Delta P_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{A}{\frac{1}{XPI_{sat}} + \frac{1}{XPI_{et}}}} \quad (2)$$

donde:

$C/I_{u, lluvia}$ :  $C/I_u$  cuando llueve en la ubicación de la señal interferente con la consiguiente atenuación debida a la lluvia de  $R_i$

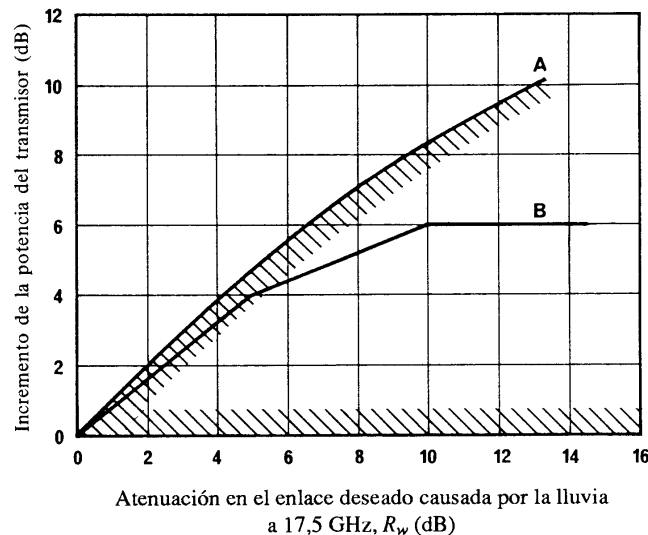
$C/I_{u, cielo despejado}$ :  $C/I_u$  cuando el cielo está despejado en la ubicación de la señal interferente ( $C/I_{u, cielo despejado}$  se considera como una  $C/I_u$  de referencia)

$\Delta P_i$ : aumento de potencia del transmisor terreno por control de potencia.

En la Fig. 3 se indican, en función de la atenuación causada por la lluvia, los límites del aumento de la potencia del transmisor de la estación terrena que permiten mantener el valor  $\Delta M$  (dB) no negativo, es decir, sin degradación de la relación  $C/I$  en el trayecto donde se produce la interferencia respecto al valor de  $C/I$  Cuando la ubicación de la señal interferente está con cielo despejado: la Curva A corresponde al caso en que  $XPI_{sat} = 20$  dB y  $XPI_{et} = 30$  dB. Dentro de la zona sombreada, la potencia del transmisor se puede aumentar del modo que se desee. En la Curva B de la Fig. 3 se presenta un ejemplo de posible algoritmo para aumentar la potencia del transmisor a medida que aumenta la atenuación causada por la lluvia.

FIGURA 3

Possible incremento de la potencia del transmisor debido al control de potencia



Curvas A: Límite superior para el control de potencia

B: Ejemplo de un control de potencia como el que se indica en el Cuadro 1

$XPI_{sat} = 20$  dB

$XPI_{et} = 30$  dB

Ángulo de elevación:  $50^\circ$

0794-03

El control de potencia representado en la Curva B de la Fig. 3 tiene como resultado un valor  $\Delta M$  (dB) positivo según se puede ver en la Curva B de la Fig. 4 es decir, que la relación  $C/I_u$  en el enlace interferido es más elevada, en la cantidad que se indica, con lluvia que con cielo despejado. La Curva A de la Fig. 4 representa  $\Delta M$  sin utilización de control de potencia y la Curva C representa  $\Delta M$  con control de potencia, según se indica en la Curva A de la Fig. 3.

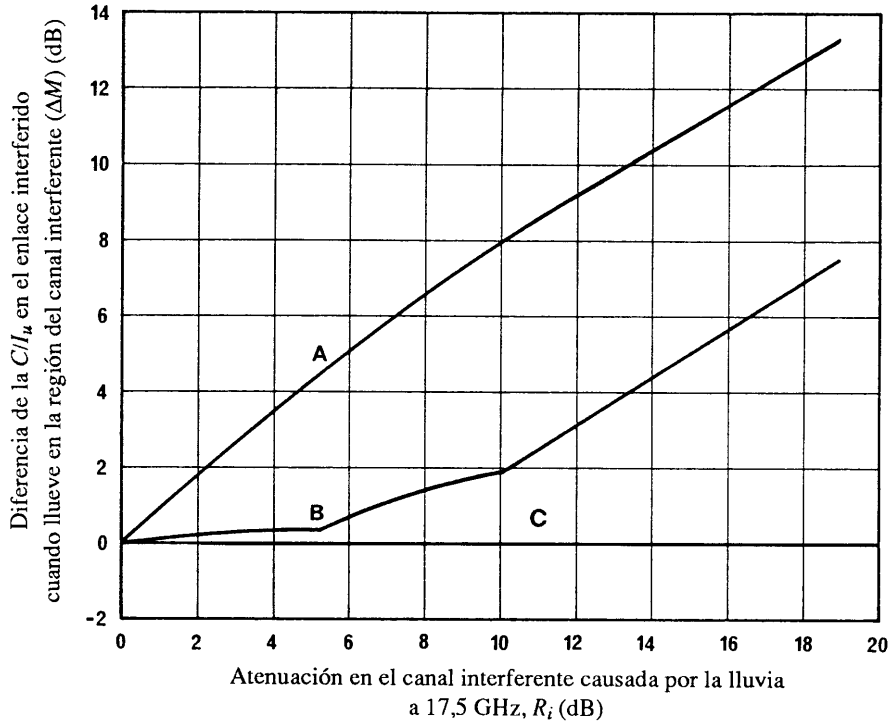
En el Cuadro 1 se resumen otros ejemplos de combinaciones posibles entre el aumento de la potencia del transmisor y la atenuación causada por la lluvia con distintos  $XPI_{sat}$  y ángulos de elevación.

CUADRO 1

**Posible incremento de la potencia del transmisor en la estación terrena debido al control de potencia para varios valores de  $XPI_{sat}$  y del ángulo de elevación del satélite**

$XPI_{sat}$ (dB)	Ángulo de elevación del satélite (grados)	Incremento de la potencia del transmisor de la estación terrena (dB)	
		Para una atenuación debida a la lluvia entre 0 y 5 dB	Para una atenuación debida a la lluvia entre 5 y 10 dB y mayor
10 a 15	0 a 10	0	0
	10 a 30	0 a 4	4 a 7
	30 a 50	0 a 4	4 a 8
	50 a 60	0 a 5	5 a 9
	60 a 90	0 a 5	5 a 10
15 a 20	0 a 10	0	0
	10 a 30	0 a 2	2 a 4
	30 a 40	0 a 3	3 a 4
	40 a 50	0 a 3	3 a 6
	50 a 60	0 a 4	4 a 8
20 a 25	60 a 90	0 a 5	5 a 9
	0 a 30	0	0
	30 a 40	0 a 2	2
	40 a 50	0 a 3	3 a 4
	50 a 60	0 a 4	4 a 6
25 a 30	60 a 90	0 a 5	5 a 8
	0 a 40	0	0
	40 a 50	0 a 2	2
	50 a 60	0 a 3	3
	60 a 90	0 a 5	5

FIGURA 4  
Ejemplo de un control efectivo de potencia



Curvas A: Sin control de potencia

B: Con control de potencia, correspondiente a la Curva B de la Fig. 3

C: Límite superior para control de potencia sin degradación de la relación  $C/I_u$  en un enlace interferido, correspondiente a la Curva A de la Fig. 3

0794-04

### 3 Aplicaciones de control de potencia que pueden hacer aumentar la interferencia

Ciertas utilizaciones del control de potencia pueden empeorar la situación de interferencia. Ciertos estudios han demostrado que la diferencia entre niveles de interferencia cuando se utiliza el control de potencia en todas las estaciones para mantener  $C/N$  en el valor mínimo requerido, y cuando, en vez de utilizarlo, todas las estaciones emplean un margen,  $M$ , lo bastante elevado para tener en cuenta la atenuación experimentada sólo durante un porcentaje de tiempo muy pequeño viene dada por:

$$I_{pc} - I_{npc} = M_w - M_i + (CPA)_{i \text{ inst.}} - (CPA)_{w \text{ inst.}} \quad (3)$$



donde:

$I_{pc}$ :	interferencia con control de potencia
$I_{npc}$ :	interferencia sin control de potencia
$(CPA)_{i\ inst}$ y $(CPA)_{w\ inst}$ :	valores instantáneos de la atenuación de la señal copolar en los enlaces interferente y deseado respectivamente
$M_w$ y $M_i$ :	márgenes de los enlaces deseado e interferente, respectivamente.

La diferencia de niveles de interferencia (ecuación (3)) no depende del valor instantáneo de la despolarización en el trayecto donde se produce la interferencia.

Para la mayoría de las situaciones de interferencia y durante la mayor parte del tiempo, los efectos de la interferencia en  $C/I_u$  son iguales con y sin control de potencia si las condiciones climáticas son estadísticamente similares en los enlaces deseado e interferente. Sin embargo, existe una clara diferencia según se utilice o no control de potencia, cuando un enlace de conexión sufre interferencia causada por lluvia en su propio trayecto o causada por lluvia en el trayecto del enlace de conexión interferente.

Para la interferencia cocanal copolar, que sólo será importante para una separación grande de los satélites en la órbita y/o de las zonas de servicio de los enlaces de conexión, el control de potencia parece que ofrece algunas posibles ventajas. Permitirá una reducción considerable de la potencia de transmisión durante grandes porcentajes de tiempo, de la que pueden seguirse economías a largo plazo de la energía primaria de la estación terrena y una mejor fiabilidad del transmisor. En los casos examinados, la utilización del control de potencia aumenta los porcentajes de tiempo en que pueden mantenerse los niveles de diseño de la relación portadora/interferencia.

En el caso de los satélites coubicados que tienen zonas de servicio de enlaces de conexión comunes o adyacentes y funcionan en canales adyacentes en contrapolarización, debe tenerse en cuenta la despolarización al analizar los efectos de control de potencia sobre la relación  $C/I$ .

El efecto del control de potencia sobre la  $C/I$  contrapolar se calcula utilizando dos transmisores de estaciones terrenas idénticos, situados ambos cerca del borde de  $-3$  dB de la zona de cobertura del enlace de conexión, y orientados hacia satélites coubicados. Suponemos una capacidad de discriminación por polarización cruzada de 27 dB y 30 dB para una antena receptora de satélite y una antena transmisora de estación terrena con polarización circular, respectivamente. Esto da una  $C/I_u$  contrapolar de una sola fuente de 21,2 dB, con cielo despejado, en condiciones en que se da por supuesta la adición de voltaje. Suponemos además un ángulo de elevación de  $40^\circ$  y calculamos la  $C/I_u$  contrapolar en función de la atenuación causada por la lluvia sobre el enlace de conexión para tres situaciones:

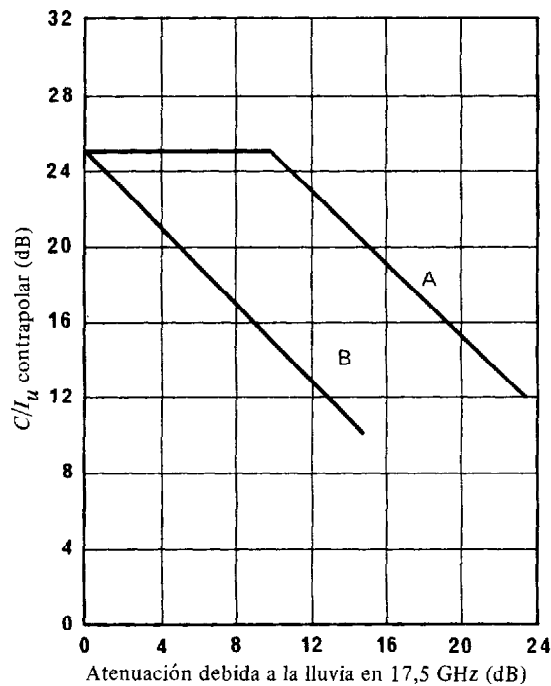
- lluvia en el emplazamiento deseado solamente,
- lluvia en los emplazamientos deseado e interferente simultáneamente,
- lluvia en el emplazamiento interferente solamente.

Se da por supuesto asimismo el control de potencia que funciona en ambos emplazamientos.

En las Figs. 5, 6 y 7 se indican, respectivamente, los resultados de las situaciones a), b) y c). Aunque la CARR SAT-83 adoptó la suma de tensiones para los cálculos de  $C/I_u$ , esas cifras se han calculado sobre la base de la suma de potencias. Las Figuras muestran que el empleo del control de potencia en el enlace de conexión aumenta la  $C/I_u$  cuando llueve en el emplazamiento deseado, pero la disminuye cuando llueve en el emplazamiento interferente. La utilización del control de potencia en el enlace de conexión no tiene ningún efecto sobre la  $C/I_u$  contrapolar cuando llueve simultáneamente en los emplazamientos deseado e interferente.

FIGURA 5

**Efecto del control automático de ganancia (CAG) o control de potencia (CP) de 10 dB sobre la  $C/I_u$  contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en el emplazamiento deseado solamente (situación a))**



Atenuación debida a la lluvia en 17,5 GHz (dB)

$$XPI_{sat} = 27 \text{ dB}$$

$$XPI_{et} = 30 \text{ dB}$$

Curvas A: Con control de potencia de 10 dB

B: Con CAG o sin él

Sin control de potencia

FIGURA 6

Efecto del control automático de ganancia (CAG) o del control de potencia sobre la  $C/I_u$  contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en los emplazamientos del transmisor deseado e interferente (situación b))

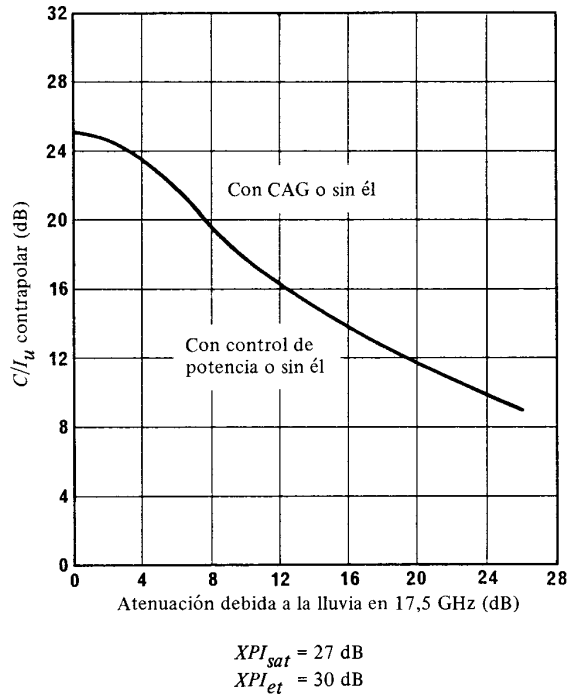
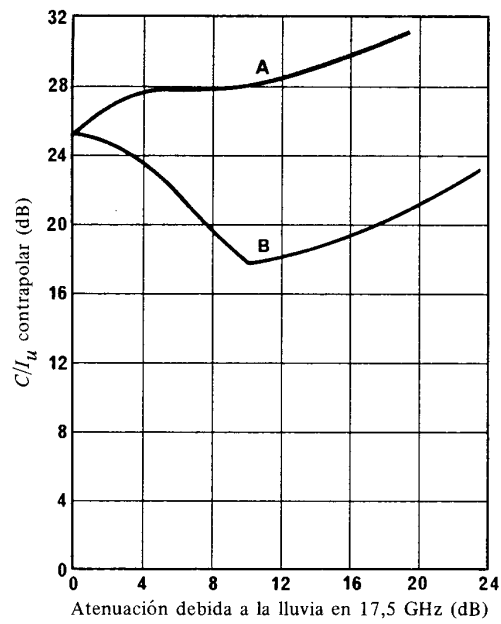


FIGURA 7

Efecto del control de potencia (CP) sobre la  $C/I_u$  contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en el emplazamiento interferente solamente (situación c))



Situación c): lluvia en el emplazamiento interferente solamente

$XPI_{sat} = 27$  dB  
 $XPI_{et} = 30$  dB

Curvas A: Sin control de potencia

B: Con control de potencia de 10 dB

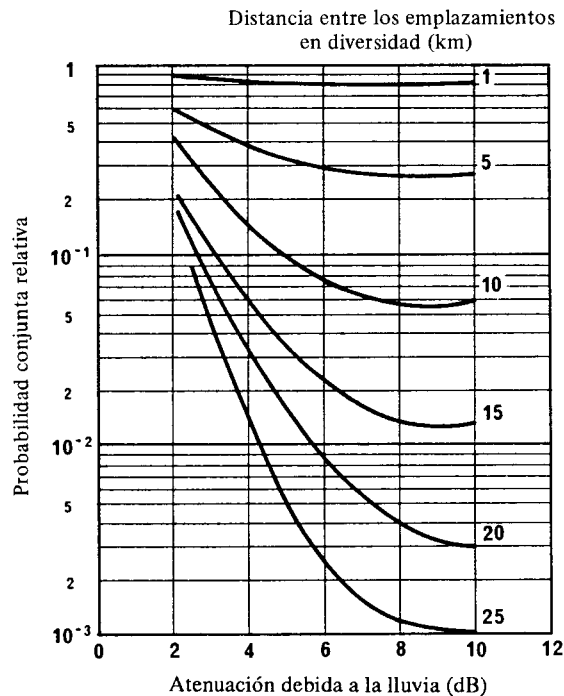
## ANEXO 3

**Explotación con diversidad de espacio de los enlaces de conexión**

La técnica de diversidad de espacio para lograr mayor disponibilidad de los enlaces de satélite está bien documentada. En la Recomendación UIT-R P.618 se indica que la probabilidad de rebasar la atenuación simultáneamente en ambos espacios es inferior a la probabilidad de rebasar la misma atenuación en uno de los espacios por un factor que disminuye al aumentar la distancia entre espacios y al incrementarse la atenuación. La probabilidad relativa conjunta se define como la relación entre la primera probabilidad y la segunda, y se representa gráficamente en la Fig. 8 para atenuaciones de hasta 10 dB y una separación de espacio de hasta 25 km, sobre la base de una distribución logarítmica normal de células de lluvia. Debe señalarse que, para cualquier distancia dada entre diversos espacios, la probabilidad conjunta relativa disminuye rápidamente con la atenuación y permanece casi constante para una atenuación superior a unos 10 dB. Esta probabilidad conjunta se utiliza para ilustrar el efecto de la diversidad de espacio sobre  $C/N_u$  y  $C/I_u$  contrapolar.

FIGURA 8

**Probabilidad conjunta relativa de la diversidad de espacio en función de la atenuación debida a la lluvia y de la distancia entre los emplazamientos en diversidad**



D07-sc

La disponibilidad de altos valores de  $C/N_u$  y  $C/I_u$  durante la lluvia está gobernada principalmente por la atenuación causada por la lluvia en los casos en que solamente llueve en el espacio deseado del enlace de conexión. Esta situación se considera el caso más desfavorable porque tanto  $C/N_u$  como  $C/I_u$  disminuyen, dB por dB, durante la lluvia. La Fig. 8 indica que, en estas condiciones de caso más desfavorable, la utilización de diversidad de espacio con diversas estaciones separadas por una distancia mínima de 10 km proporcionaría como mínimo un factor de mejora de 10 en la disponibilidad de altos valores de  $C/N_u$  y  $C/I_u$  para valores de atenuación superiores a unos 5 dB. En otras palabras, las relaciones  $C/N_u$  y/o  $C/I_u$  excedidas durante el 99% del mes más desfavorable sin diversidad de espacio (suponiendo una atenuación de 5 dB por lo menos) se pueden correlacionar con una disponibilidad excedidas durante el 99,9% del mes más desfavorable utilizando diversidad de espacio con diversas estaciones separadas por una distancia mínima de 10 km. Es posible mejorar todavía la disponibilidad en un factor adicional de 10 utilizando estaciones de diversidad separadas por una distancia mínima de 20 km. Evidentemente, la utilización de la diversidad de espacio es más ventajosa cuando la combinación de la intensidad de lluvia y del ángulo de elevación da un valor elevado de la atenuación de la señal debido a que la probabilidad relativa conjunta disminuye hasta el mínimo a medida que aumenta la atenuación, con una separación dada entre cualquiera de las estaciones.

La utilización de la diversidad de espacio sólo puede aumentar la disponibilidad de valores elevados de  $C/N_u$  y  $C/I_u$  en relación con los valores calculados en un plan que se funde en una sola estación de enlace de conexión. Por lo tanto, el Plan de la Región 2 permite utilizar diversidad de espacio en la realización de los enlaces de conexión.

Si bien el uso de la diversidad de espacio puede compensar eficazmente los efectos de la lluvia y de la despolarización, los costos y la complejidad de las estaciones con diversidad de espacio pueden ser importantes. El uso de diversidad para estaciones transportables, es particularmente problemático desde el punto de vista de los costos y de la complejidad de explotación.

---