INFORME 952-2*

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ENLACES DE CONEXIÓN CON SATÉLITES DE RADIODIFUSIÓN

Elementos requeridos para el establecimiento de planes de asignaciones de frecuencias y posiciones orbitales para el servicio de radiodifusión por satélite y los enlaces de conexión asociados – Compartición en las bandas atribuidas a los enlaces de conexión

(Cuestión 1/10 y 11; Programas de Estudios 1B/10 y 11, 2J/10 y 11)

(1982-1986-1990)

1. Introducción

Este Informe tiene por objeto examinar las características técnicas y las limitaciones operacionales de los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión.

En este Informe se examinan exclusivamente los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión que funcionan en 12 GHz, ya que han sido establecidos los planes del enlace de alimentación para los satélites de radiodifusión a 12 GHz (véase el § 2), y dado que se sabe muy poco de los problemas referentes a los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión que funcionan en frecuencias distintas de 12 GHz.

2. Atribuciones de bandas de frecuencias

La CAMR-79 examinó el problema de las atribuciones de bandas de frecuencias a los enlaces de conexión de los satélites de radiodifusión que funcionen en la banda de 12 GHz. Se atribuyeron ciertas bandas de frecuencias a este fin al servicio fijo por satélite (Tierra-espacio), pero limitado para los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión. Estas bandas son las siguientes:

- 10,7-11,7 GHz : en la Región 1 únicamente, compartida con el servicio fijo, el servicio fijo por satélite (espacio-Tierra) y el servicio móvil (excepto el móvil aeronáutico);
- 14,5-14,8 GHz : compartida con los servicios fijo y móvil. Esta utilización se reserva a los países de fuera de Europa y a Malta;
- 17,3-18,1 GHz : la mitad superior de esta banda está compartida con los servicios fijo y móvil y el servicio fijo por satélite (espacio-Tierra).

La CAMR ORB-85 seleccionó las bandas de frecuencias 17,3-18,1 GHz y 14,5-14,8 GHz (a los países fuera de Europa y Malta) para la planificación de las asignaciones de los enlaces de conexión en las Regiones 1 y 3. Decidió no utilizar la banda de frecuencias 10,7-11,7 GHz para el Plan de asignaciones de enlaces de conexión.

En la CARR SAT-83 se elaboró un Plan para los enlaces de conexión de los satélites de radiodifusión de la Región 2 en la banda 17,3-17,8 GHz.

Durante la CAMR-ORB(88) se desarrolló un Plan para enlaces de conexión de los satélites de radiodifusión en las Regiones 1 y 3 en las bandas de frecuencias 14,5 - 14,8 GHz y 17,3 - 18,1 GHz. La banda de 14,5 - 14,8 GHz se utilizó para algunos países fuera de Europa.

---

* Este Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 4 y 9.

3. Diseño y características técnicas del sistema

3.1 *Consideraciones generales*

Un enlace de conexión con satélites de radiodifusión consta de los elementos siguientes:

- la estación terrena transmisora, que se distingue por las características de radiación de la antena y la potencia transmitida;
- el enlace desde la estación terrena al satélite, que se caracteriza principalmente por las condiciones de propagación a través de la atmósfera;
- la antena receptora del satélite, que tiene ciertas características de radiación, y el receptor del satélite, que posee determinada sensibilidad (factor de ruido).

En los § 5 a 9 se examinan las características y, en su caso, las limitaciones de esos elementos, en tanto que a continuación se resumen algunas otras consideraciones generales del sistema.

En algunos casos, los satélites de radiodifusión dispondrán de una sola estación terrena primaria para el enlace de conexión para cada serie de enlaces descendentes en una sola zona de servicio. En otros casos, puede ser conveniente disponer el emplazamiento de las estaciones terrenas para el enlace de conexión en cualquier punto situado dentro de una zona de servicio predeterminada de enlace de conexión. Estos enlaces de conexión utilizarán normalmente una estación terrena primaria con una antena relativamente grande y elevada potencia de transmisión. Esta especificidad en cuanto a la «estación terrena primaria» no se consideró en la planificación de los enlaces de conexión en la Región 2. Se han utilizado ya pequeñas estaciones terrenas fijas y transportables que suministran una conexión directa con un satélite experimental [CCIR, 1978-82a] y cabe esperar que su número aumente a medida que se desarrolla el servicio de radiodifusión por satélite.

Admitiendo que los objetivos de calidad de servicio de estas pequeñas estaciones terrenas podrían ser inferiores a los de las estaciones primarias, su utilización deberá tenerse en cuenta en la máxima medida.

Los enlaces de conexión pueden afectar la planificación del servicio de radiodifusión por satélite por los siguientes motivos:

- El ruido y las interferencias presentes en el enlace de conexión se retransmitirán en el enlace descendente y pueden constituir una parte no despreciable del ruido y de las interferencias totales del enlace descendente; en este contexto, puede convenir planificar las asignaciones de canales del enlace de conexión y del enlace descendente al mismo tiempo de forma que se obtengan las relaciones de protección para una calidad de servicio deseada. Esto puede realizarse planificando los enlaces de conexión y los enlaces descendentes secuencial o simultáneamente, como se describe en el Informe 633.
- El enlace de conexión puede necesitar cierta coordinación con los sistemas por satélite que funcionan en una banda de frecuencias de un enlace de conexión, y pueden por lo tanto imponer limitaciones adicionales respecto de las posiciones orbitales de los satélites de radiodifusión.
- Es posible que los enlaces de conexión requieran coordinación con sistemas terrenales.
- Las zonas de servicio del enlace de conexión y del enlace descendente pueden no coincidir en algunos casos. Por ejemplo, una administración cuyo territorio incluye varias zonas horarias puede juzgar conveniente dar servicio a cada una de estas zonas desde una posición orbital diferente para obtener una mejor protección contra los eclipses, y al mismo tiempo poder acceder a cada satélite desde cualquier punto de su territorio cuyo ángulo de elevación sea adecuado.
- Puede ser conveniente que los enlaces de conexión funcionen desde un número considerable de pequeñas estaciones terrenas fijas o transportables instaladas en cualquier punto dentro de la zona de servicio, o en algunos casos, incluso desde fuera de la zona de servicio.

Podría reducirse la anchura de banda total de los enlaces de conexión utilizando mayor directividad en la antena transmisora de la estación terrena, empleando discriminación por polarización y utilizando tal vez métodos de modulación más ventajosos. Ahora bien, las estaciones terrenas fijas o transportables para enlaces de conexión tienen una directividad limitada en sus antenas.

Es posible que para lograr la máxima flexibilidad en la ubicación de los satélites, sea preciso asignar a los enlaces de conexión una anchura de banda igual o mayor que a los enlaces descendentes. Pero como la anchura de la banda es limitada, quizá no se pueda lograr este grado máximo de flexibilidad.

Durante el periodo de introducción de los satélites de radiodifusión, la viabilidad del servicio de radiodifusión por satélite será particularmente vulnerable a los costos elevados. Por consiguiente, es necesario que todo método destinado a reducir la anchura de banda de los enlaces de conexión o a economizar espacio orbital no imponga costos tan elevados que imposibiliten la viabilidad del servicio de radiodifusión por satélite. Los costos deben ser aceptables y constituyen, por consiguiente, otra limitación. Teniendo en cuenta este aspecto deben considerarse las técnicas de reducción de anchura de banda enumeradas en el Informe 561.

3.2 *Distribución del ruido entre enlaces de conexión y enlaces descendentes*

En la CAMR-RS-77 se adoptó para la planificación una reducción máxima de 0,5 dB de la relación «portadora/ruido» total como contribución del enlace de conexión a esta relación durante el 99% del mes más desfavorable. Ello corresponde a una diferencia entre las relaciones portadora/ruido (C/N) de los enlaces descendente y de conexión de unos 10 dB (véase el Informe 215).

Según un estudio efectuado por la UER [CCIR, 1978-82b], la contribución del ruido debido al enlace de conexión puede hacerse despreciable adoptando un margen relativamente pequeño en la relación C/N del enlace descedente. Este estudio consideró el caso en que existía un control automático de ganancia en el satélite y se basó en un análisis estadístico de las atenuaciones en el enlace de conexión y en el enlace descendente. La probabilidad de que la relación «portadora/ruido» total sea menor que un valor T determinado, puede expresarse mediante la fórmula general dada en [CCIR, 1978-82b].

Se han efectuado aplicaciones numéricas suponiendo que las atenuaciones (en dB) siguen una ley log-normal, para la cual los parámetros son coherentes con las mediciones europeas. Se ha comprobado inicialmente que los resultados obtenidos con las hipótesis de correlación total o de independencia total entre los desvanecimientos de los enlaces de conexión y descendente, son aproximadamente idénticos. Sin embargo, la influencia de un margen de 0,5 dB en el enlace descendente es decisiva. La mejora debida a este margen es mayor que la obtenida dimensionando la relación C/N en el enlace de conexión durante el 99,9% del mes más desfavorable en lugar de 99%. Por tanto, si tomamos una relación C/N en el enlace descendente de 14 dB durante el 99% del mes más desfavorable, la contribución de ruido debida al enlace de conexión en el circuito total es tal que hace que la relación C/N del enlace completo caiga por debajo de 14 dB del 50% al 10% más a menudo (dependiendo de que el dimensionado del enlace de conexión corresponda a una relación C/N de 24 dB durante el 99% o el 99,9% del mes más desfavorable). Si se tiene en cuenta el margen de 0,5 dB en el enlace descendente, el porcentaje de tiempo durante el que la relación C/N total cae por debajo de 14 dB, incluyendo la contribución de ruido debida al enlace de conexión, es todavía menor que el valor especificado del 1% del mes más desfavorable en ambos casos.

Este resultado confirma que la decisión de la CAMR-RS-77 de tener en cuenta el efecto del enlace de conexión mediante el citado margen, incluso en frecuencias del orden de 18 GHz, fue correcta.

Se realizaron estudios análogos en Canadá sobre los efectos de la atenuación debida a la lluvia y de las características de los transpondedores de satélite en la distribución de las contribuciones de ruido en los enlaces de conexión y descendentes del servicio de radiodifusión por satélite [CCIR, 1978-82c].

Algunos de los resultados pueden hallarse en la fig. 1, en la que se han hecho los mismos supuestos que en el estudio antes mencionado. Las curvas de esa figura representan la degradación de la relación C/N del enlace descendente debida al ruido procedente del enlace de conexión ($C/N_d - C/N_t$) en función de la diferencia entre la relación C/N en el enlace de conexión y la relación C/N en el enlace descendente ($C/N_u - C/N_d$). Se ilustran los dos casos: aquél en que existe plena correlación y aquél en que existe independencia entre los desvanecimientos en ambos enlaces. Todos los valores de C/N se especifican para el 99% del mes más desfavorable.

No es preciso especificar la distribución del ruido como elemento de planificación en la Región 2, porque la relación total portadora/ruido, es el criterio aplicable cuando se planifican al mismo tiempo los enlaces de conexión y descendentes. Sin embargo, es preciso suponer una cierta distribución del ruido a fin de determinar ciertas características del enlace de conexión, como, por ejemplo, la p.i.r.e. necesaria para satisfacer las necesidades del servicio de radiodifusión por satélite.

Como guía para la realización de los Planes de la Región 2 y de las Regiones 1 y 3, se ha supuesto que la contribución del ruido del enlace de conexión al ruido del enlace total no debía exceder de 0,5 dB durante el 99% del mes más desfavorable.

3.3 *Relación portadora/ruido del enlace de conexión*

Suponiendo que no hay reducción de potencia con respecto a saturación a la salida del transpondedor, una contribución de ruido de 0,5 dB del enlace de conexión al ruido del enlace total requiere que la siguiente relación:

$$(C/N)_u = (C/N)_d + 10 \quad \text{dB} \tag{1}$$

se rebase durante el 99% del mes más desfavorable. Con condiciones de cielo despejado, la relación $(C/N)_u$ es:

$$(C/N)_u = (C/N)_d + 10 + L_{Att} \quad \text{dB} \tag{2}$$

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

donde:

$(C/N)_u$: relación portadora/ruido del enlace de conexión,

$(C/N)_d$: relación portadora/ruido del enlace descendente, y

L_{Atu} : atenuación debida a la lluvia en el enlace de conexión rebasada durante el 1% del mes más desfavorable.

Se necesita también un margen de 1 dB a fines de planificación, para tener en cuenta posibles errores de puntería de la antena transmisora de la estación terrena.

Además, el amplificador no lineal de gran potencia del transpondedor introduce, debido a su factor de conversión MA/MP, cierta degradación del ruido térmico en la señal demodulada. La degradación causada por el fenómeno MA/MP a la señal demodulada en frecuencia viene dada por la fórmula:

$$D = \frac{\alpha + I}{1 + I} \tag{3}$$

siendo:

D : disminución de la relación señal/ruido (S/N) después de la demodulación debida al incremento del ruido de la detección en presencia de conversión MA/MP (véase la fig. 2);

$I = (C/N)_u/(C/N)_d$

$\alpha = 1 + \left(\frac{K}{6{,}6}\right)^2$ (para la modulación de frecuencia).

K : factor de conversión MA/MP.

K es del orden de 5 a 6 grados/dB, con la tecnología actual de los amplificadores. Esta fórmula da un valor α entre 2,0 y 2,6 dB; este valor se ha demostrado teórica y experimentalmente [CCIR, 1982-86a].

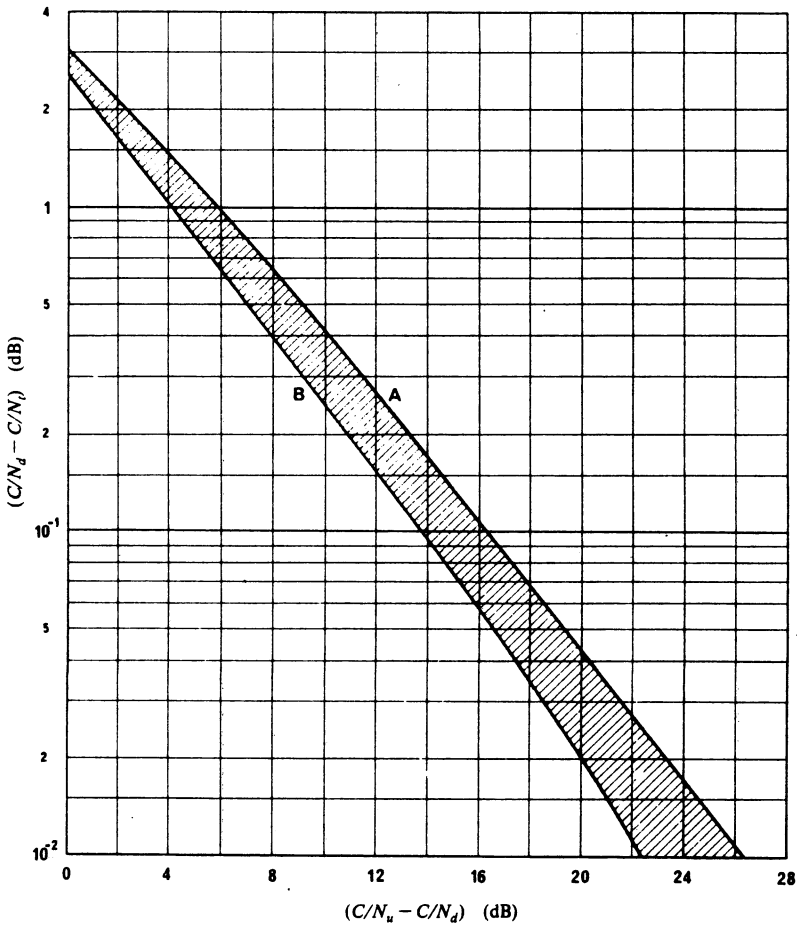


FIGURA 1 – *Contribución de ruido del enlace de conexión*

A: Correlacionado
B: No correlacionado

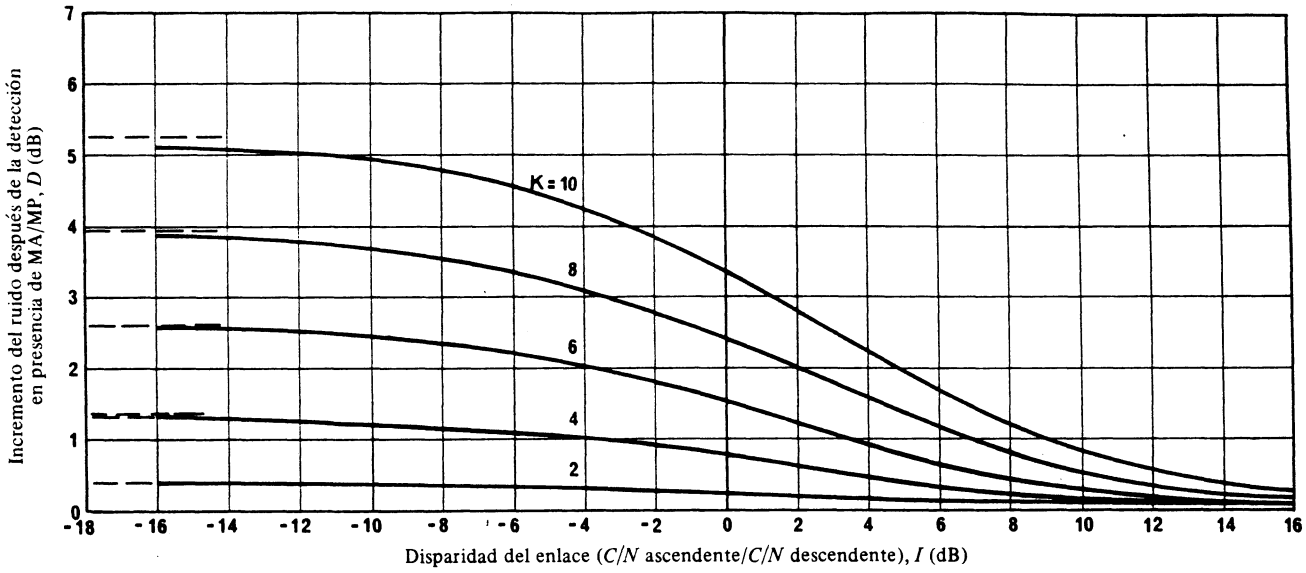


FIGURA 2 – *Degradación de la señal demodulada debido al efecto de la conversión MA/MP*

K: Factor de conversión MA/MP (grados/dB)

— — — : I → -∞ dB

La degradación causada por la conversión MA/MP no puede observarse midiendo la relación portadora/ruido (C/N) directamente. Sin embargo, esta degradación puede medirse por otros medios. En cambio, debe tenerse en cuenta al calcular los presupuestos del enlace de conexión y puede compensarse aumentando la $(C/N)_u$ en 10 log α dB. La conversión MA/MP no se tuvo en cuenta al preparar el Plan para la Región 2.

En un plan basado en características homogéneas de las estaciones del enlace de conexión, que, por tanto, generan a su vez densidades de flujo de potencia nominales homogéneas (cielo despejado) en los satélites, C/N_u varía con la ganancia de la antena receptora del satélite. En la Región 2, la gama de interés de la ganancia de la antena receptora del satélite en el borde de la zona de cobertura de −3 dB, varía de unos 28 dB, en el caso de un haz grande de enlace de conexión para un vasto país de 3° × 8°, a 46 dB para un haz puntual pequeño de 0,6° de diámetro. Con una temperatura de ruido del sistema para el satélite de 1500 K, que puede obtenerse fácilmente para receptores de satélites en 18 GHz, y la gama de interés de G/T varía de −4 dB(K^{-1}) a 14 dB(K^{-1}) en el borde de la zona de cobertura. La elección de la potencia del enlace de conexión en la antena transmisora puede situarse entre 500 y 1000 W. El Plan de enlaces de conexión de la Región 2 está basado en una potencia RF máxima de 1000 W a la entrada de la antena del enlace de conexión. En el cuadro I se indica la gama de C/N_u a 17,5 GHz, suponiendo una eficacia de la antena del 65%, una anchura de banda del filtro de 24 MHz y una pérdida de ganancia debida a un error de puntería de 1 dB en la antena de estación terrena, para una potencia transmitida de 500 y 1000 W. En la Región 2, el Plan se basa en un diámetro de antena de 5 m pero permite emplear antenas más grandes y/o más pequeñas.

Por ejemplo, en el caso de una relación portadora/ruido de 14,5 dB en el enlace descendente y de un posible error de puntería de 1 dB de la antena transmisora de la estación terrena, un número muy pequeño de casos del cuadro I darían una contribución de ruido del enlace de conexión superior a 0,5 dB al ruido total en los canales de comunicación. Estos pocos casos figuran en bastardilla en el cuadro I. En las Regiones 1 y 3, el Plan se basa en diámetros de antena de 5 y 6 m para las bandas de frecuencias de 17 y 14 GHz respectivamente y en potencias del transmisor de 500 W. Estos valores corresponden a unas p.i.r.e. de 84 y 82 dBW, respectivamente y se propone lograr una (C/N) de 24 dB rebasada para el 99% del mes más desfavorable.

CUADRO I – *Gama de la relación portadora/ruido calculada para una antena de estación terrena con un error de puntería de 1 dB y que transmite de 500 a 1000 W de potencia* (Región 2)[1]

Diámetro de la antena de la estación terrena (m)	G/T mínima de la antena receptora del satélite (borde de la zona de cobertura) (dB(K^{-1}))	Relación portadora/ruido, C/N_u (dB)					
		Cielo despejado		Con atenuación por lluvia de 5 dB		Con atenuación por lluvia de 10 dB	
		Potencia transmitida (W)					
		500	1000	500	1000	500	1000
2,5	– 4	*19,2*	*22,2*	*14,2*	*17,2*	*9,2*	*12,2*
	+ 2	25,2	28,2	*20,2*	*23,2*	*15,2*	*18,2*
	+ 8	31,2	34,2	26,2	29,2	*21,2*	*24,2*
	+14	37,2	40,2	32,2	35,2	27,2	30,2
5	– 4	25,2	28,2	*20,2*	*23,2*	*15,2*	*18,2*
	+ 2	31,2	34,2	26,2	29,2	*21,2*	*24,2*
	+ 8	37,2	40,2	32,2	35,2	27,2	30,2
	+14	43,2	46,2	38,2	41,2	33,2	36,2
8	– 4	29,3	32,3	24,3	27,3	*19,3*	*22,3*
	+ 2	35,3	38,3	30,3	33,3	25,3	28,3
	+ 8	41,3	44,3	36,3	39,3	31,3	34,3
	+14	47,3	50,3	42,3	45,3	37,3	40,3
11	– 4	32,1	35,1	27,1	30,1	*22,1*	25,1
	+ 2	38,1	41,1	33,1	36,1	28,1	31,1
	+ 8	44,1	47,1	39,1	42,1	34,1	37,1
	+14	50,1	53,1	45,1	48,1	40,1	43,1

[1] En el caso del Plan de enlaces de conexión para las Regiones 1 y 3, las cifras del Cuadro I deben reducirse en 0,5 dB con una anchura de banda de referencia de 27 MHz.

3.4 *Influencia de la atmósfera*

3.4.1 *Atenuación debida a la lluvia*

La señal de enlace de conexión sufrirá atenuación al pasar a través de la atmósfera. Estos efectos tienen carácter estadístico y dependen en gran medida de la frecuencia del enlace de conexión y de la ubicación de la estación de dicho enlace.

La atenuación debida a la lluvia disminuye las relaciones C/N y C/I en el enlace de conexión. Además, disminuirá la relación C/N en el enlace descendente a no ser que se utilice control automático de ganancia en el satélite a fin de mantener el transpondedor del satélite en situación de saturación o casi saturación.

El modelo de propagación para los enlaces de conexión en las Regiones 1 y 3 que utiliza señales con polarización circular se basa en el valor de la atenuación debida a la lluvia durante el 1% del mes más desfavorable.

La CAMR ORB-88 adoptó para el cálculo de la atenuación debida a la lluvia el método siguiente:

La altura media de la isoterma de cero grados h_F es:

$$h_F = 5{,}1 - 2{,}15 \log \left[1 + 10^{\frac{(|\zeta| - 27)}{25}} \right] \quad \text{(km)}$$

siendo ζ la latitud de la estación terrena (grados)

La altura de la lluvia h_R es:

$$h_R = C \cdot h_F$$

donde:

$C = 0{,}6$ para $0° \leq |\zeta| < 20°$

$C = 0{,}6 + 0{,}02\ (|\zeta| - 20)$ para $20° \leq |\zeta| < 40°$

$C = 1$ para $|\zeta| \geq 40°$

La longitud del trayecto oblicuo, L_S, por debajo de la altura de la lluvia es:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_o)}{\left[\operatorname{sen}^2 \theta + 2 \frac{(h_R - h_o)}{R_e} \right]^{1/2} + \operatorname{sen} \theta} \quad \text{(km)}$$

donde: h_o = altura sobre el nivel medio del mar de la estación terrena (km)

θ = ángulo de elevación (grados)

R_e = radio efectivo de la Tierra (8.500 km).

La proyección horizontal, L_G, del trayecto oblicuo es:

$$L_G = L_S \cos \theta \ \text{(km)}$$

El factor de reducción del trayecto de la lluvia, $r_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo es:

$$r_{0,01} = \frac{90}{90 + 4\, L_G}$$

La atenuación específica γ_R, viene determinada por:

$$\gamma_R = k\ (R_{0,01})^{\alpha}\ \text{(dB/km)}$$

donde: $R_{0,01}$: viene dado en el Cuadro II, para cada zona hidrometeorológica. Los coeficientes k y α dependientes de la frecuencia figuran en el Cuadro III y las zonas hidrometeorológicas en el Informe 563.

CUADRO II

Intensidad de la lluvia (R) para las zonas hidrometeorológicas rebasada durante el 0,01% de un año medio

Zona hidrometeorológica	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
Intensidad de lluvia (mm/h) $R_{0,01}$	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145

CUADRO III

Coeficientes dependientes de la frecuencia

Frecuencia* (GHz)	k	α	
14,65	0,0327	1,149	Para las Regiones 1 y 3
17,5	0,0521	1,114	Para la Región 2
17,7	0,0531	1,110	Para las Regiones 1 y 3

* **Frecuencias principales de las bandas de enlaces de conexión.**

La atenuación rebasada durante el 1% del mes más favorable es:

$A_{1\%} = 0{,}223\ \gamma_R\ L_s\ r_{0,01}$ (dB) en las Regiones 1 y 3

$A_{1\%} = 0{,}21\ \gamma_R\ L_s\ r_{0,01}$ (dB) en la Región 2.

Para el cálculo del control de potencia descrito en el punto 5.4.4, se utiliza la atenuación debida a la lluvia durante el 0,1% del mes más desfavorable. Se puede calcular como sigue:

$$A_{0,1\%} = 3{,}3\ A_{1\%}$$

3.4.2 *Despolarización*

La lluvia y el hielo pueden provocar la despolarización de las señales y reducir, por consiguiente, la relación portadora/interferencia (C/I) en satélites situados en la misma posición y en posiciones adyacentes. Cuando hay hielo en el trayecto de transmisión, particularmente si se encuentra en proceso de fusión, su efecto de despolarización es particularmente fuerte (fenómeno de la «banda brillante»), aunque en tales momentos la atenuación es escasa.

En el modelo pluviométrico del CCIR (Informe 564) se predice que la despolarización debida a la lluvia (XPD) varía con la atenuación y el ángulo de elevación, según se ilustra en la fig. 3 para la polarización circular. El valor de XPD disminuye al decrecer el ángulo de elevación, para cualquier valor dado de atenuación causada por la lluvia (A_p).

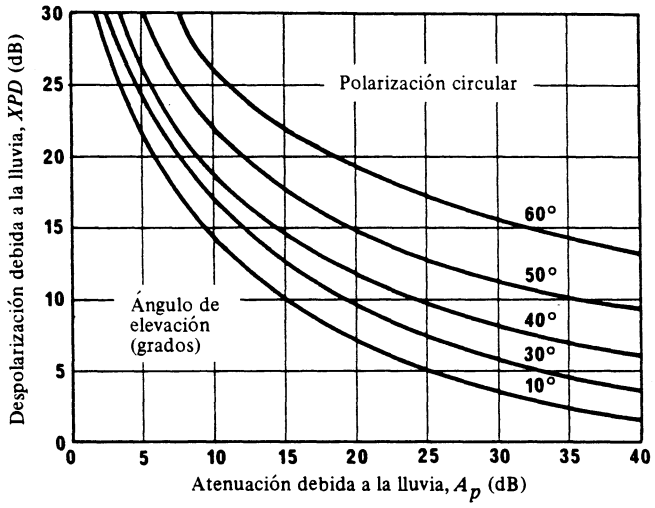


FIGURA 3 – *Despolarización debida a la lluvia y atenuación predicha para señales con polarización circular (14 GHz)*

La CAMR-ORB(88) adoptó el método siguiente para el cálculo de la despolarización (XPD), no rebasada durante el 1% del mes más desfavorable:

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

donde V = 20 para 14,5 - 14,8 GHz

y V = 23 para 17,3 - 18,1 GHz

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

f: frecuencia (GHz)

θ: ángulo de elevación (grados).

Para valores de θ superiores a 60°, utílicese θ = 60° en la ecuación anterior.

3.4.3 *Dispersión por la lluvia*

En [CCIR, 1982-86b] se analiza la dispersión por la lluvia, como mecanismo potencialmente importante de interferencia a corto plazo a 17 GHz, para la compartición entre enlaces de conexión. Se necesitan estudios adicionales porque se han adoptado varios supuestos simplificados y porque el modelo de dispersión por la lluvia utilizado es aplicable concretamente a los trayectos terrenales de dispersión. El análisis provisional muestra que:

- La contribución de la dispersión por la lluvia a la interferencia no debiera plantear problemas en 17 GHz, pero, sin embargo, puede superar en gran manera a la interferencia sobre el trayecto directo que va desde la estación terrena (a través del lóbulo lateral) al satélite perjudicado.
- La interferencia debida a la dispersión por la lluvia es muy alta en relación con la interferencia del trayecto directo que va desde la estación terrena (lóbulo lateral) al satélite perjudicado, en el caso de separaciones angulares amplias entre los satélites perjudicado y deseado.

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

- En algunos casos, la interferencia neta en el curso de la lluvia puede superar a la existente en condiciones de cielo claro. Sin embargo, todos esos casos están asociados a situaciones en que esa interferencia es despreciable por su pequeñez.
- Se necesitan estudios adicionales para evaluar la magnitud de la interferencia debida a la dispersión por la precipitación y por encima de la isoterma de 0°C. Las reflexiones del radar a 10 GHz en la capa de fusión a esa altitud son habitualmente bastante mayores que las registradas en altitudes algo inferiores.

3.5 *Margen de propagación*

El margen de propagación a 17 GHz (L_{4u} en la ecuación (2)) dependen principalmente de la zona hidrometeorológica y del ángulo de elevación. Se prevé una atenuación debida a la lluvia de menos de 10 dB durante el 1% del mes más desfavorable en muchas zonas hidrometeorológicas, con poca restricción o con ninguna en el ángulo de elevación. En las zonas hidrometeorológicas *M*, *N* y *P*, pudiera ser conveniente colocar los satélites de modo que se limite al ángulo de elevación mínimo, minimizado así los casos en que la atenuación debida a la lluvia puede exceder de 10 dB durante el 1% del mes más desfavorable. Los ángulos de elevación mínimos en las zonas hidrometeorológicas *M*, *N* y *P* son aproximadamente 12°, 35° y 60°, respectivamente, para una atenuación producida por la lluvia de 10 dB, excedida durante el 1% del mes más desfavorable.

La atenuación debida a la lluvia puede compensarse mediante la utilización de técnicas de diversidad de emplazamientos y de control de la potencia. Estas técnicas se tratan en los § 5.6 y 5.4, respectivamente.

3.6 Estaciones terrenas de enlace de conexión, en la práctica

Resulta útil obtener información acerca de las características técnicas y operativas de los enlaces de conexión en funcionamiento, y en particular sobre la posibilidad de superar los problemas de atenuación debida a lluvia intensa y sobre el aumento de la eficacia de las estaciones terrenas transportables.

A tenor de la experiencia de funcionamiento adquirida con los enlaces de conexión del satélite de radiodifusión japonés BS-2, en el Anexo II al presente Informe se ofrece información sobre los dos aspectos siguientes del enlace de conexión [CCIR 1986-90a]:

- funcionamiento de los enlaces de conexión en condiciones de lluvia (sección 1 del Anexo II),
- sistemas de estaciones terrenas transportables (sección 2 del Anexo II).

4. Interferencia

Como las fuentes de interferencia en el trayecto descendente, es decir, en los satélites de radiodifusión, son numerosas, y como este tipo de interferencia tiende a reducir el número de programas que pueden difundirse hacia cada país, la CAMR-RS-77 decidió para las Regiones 1 y 3 que, para la planificación, la interferencia debida al trayecto descendente equivalga al 90% de la interferencia total.

Según el método de CAMR-RS-77, para los enlaces de conexión se requieren relaciones de protección unos 10 dB mayores que los estipulados para el enlace descendente. Sin embargo, no debe olvidarse que la CAMR-RS-77 especificó condiciones más rigurosas para la protección contra la interferencia que para la protección contra el ruido. Cabe esperar que, con cielo despejado, podría obtenerse una relación C/N próxima a 30 dB en el enlace de conexión. Aún en estas condiciones, la potencia de ruido debida sería aún 10 veces superior a la potencia de interferencia, suponiendo una relación de protección de 40 dB.

No es necesario especificar la relación C/I del enlace de conexión como elemento de planificación cuando se planifican al mismo tiempo los enlaces de conexión y los enlaces descendentes, dado que el criterio aplicable es la relación global portadora/interferencia.

4.1 *Interferencia cocanal por una señal copolar*

Puede lograrse fácilmente para el 99% del tiempo del mes más desfavorable una relación de protección para una sola fuente interferente (C/I_u) de 40 dB entre enlaces de conexión con el mismo tipo de polarización transmitidos desde zonas de servicio adyacentes. En condiciones de cielo despejado, una C/I_u de 40 dB require una separación entre satélites de unos 3° para antenas de enlace de conexión de 5 m de diámetro. Para el caso más desfavorable de interferencia compuesta y un desvanecimiento por la lluvia de 10 dB en la estación terrena transmisora deseada, la separación orbital mínima requerida entre satélites que cubren zonas de servicio adyacentes es aproximadamente de 10°. Las separaciones orbitales inferiores a unos 10° requerirían alguna separación de las zonas de servicio de los enlaces de conexión, del mismo modo que es necesaria cierta separación de las zonas de servicio de los enlaces descendentes cuando las separaciones orbitales son inferiores a 15°. La separación entre los satélites vendrá determinada normalmente por consideraciones de interferencia del enlace descendente. Sin embargo, la interferencia del enlace de conexión podría ser el factor determinante cuando la zona de servicio del enlace de conexión es más extensa que la zona de servicio del enlace descendente, o cae fuera de ésta. Como guía para la elaboración de planes de enlaces de conexión, parece adecuado un valor de 40 dB para la relación C/I_u.

Se han efectuado experimentos con el satélite OTS para medir el umbral de recepción de una fuente interferente para un enlace total [CCIR, 1978-82d]. Las pruebas han demostrado que para una señal de televisión de 625 líneas de conformidad con el Plan de la CAMR-RS-77, se confirma el valor de 30 dB para la relación de protección cocanal.

En Canadá se realizaron mediciones del efecto de la no linealidad de los amplificadores de tubos de ondas progresivas (TOP) del satélite sobre la interferencia cocanal, observándose que el fenómeno conocido normalmente como «supresión de señales pequeñas» no se produce en este caso, y que la salida de un amplificador TOP saturado no disminuye el nivel de interferencia. Por tanto, en el cálculo de la relación global portadora/interferencia cocanal, el satélite debe considerarse transparente.

Al establecerse el plan para las Regiones 1 y 3, se utilizó un valor de 40 dB como relación de protección cocanal del enlace de conexión.

4.2 *Interferencia del canal adyacente*

Para otros casos de interferencia, distintos de la interferencia cocanal por una señal copolar, la relación C/I requerida es muy inferior a 40 dB, y las separaciones entre satélites y/o entre zonas de servicio, pueden ser mucho más reducidas. Para zonas de servicio comunes o adyacentes, los satélites pueden estar casi coubicados y seguir estando protegidos todavía para los canales adyacentes y los segundos canales adyacentes.

Se han efectuado experimentos con el satélite OTS para medir el umbral de recepción de una fuente interferente (cocanal o del canal adyacente) para un enlace total [CCIR, 1978-82d]. Las pruebas han demostrado que para una señal de televisión de 625 líneas de conformidad con el Plan de la CAMR-RS-77 puede ser aceptable un valor más bajo (7 dB en vez de 14 dB) para la relación de protección de canal adyacente en las Regiones 1 y 3. Esta reducción puede explicarse muy probablemente por el mejoramiento de la selectividad de canales gracias al filtrado en la estación transmisora. Sin embargo, la reducción de la interferencia de canal adyacente debida al filtrado en los enlaces de conexión se limita algo debido a la necesidad de un filtro de selectividad bastante baja para transmitir señales con una degradación mínima. Si, como parece, es un poco demasiado elevado el valor adoptado por la CAMR-RS-77 para el canal adyacente en el enlace descendente, sería interesante proseguir los experimentos para ver si podría adoptarse para la planificación del enlace de conexión un valor correspondiente más bajo (por ejemplo, 17 dB) para el canal adyacente.

Según experimentos realizados en laboratorios de Francia en los que se simuló la interferencia de los enlaces de conexión utilizando señales de televisión de 625 líneas, de conformidad con el Plan de la CAMR-RS-77, además de confirmarse la relación de protección de 30 dB para la interferencia cocanal, por lo que respecta a la interferencia del canal adyacente, el filtrado de transmisión en la estación del enlace de conexión y el funcionamiento del tubo amplificador del satélite en saturación producen una disminución subjetivamente aparente de 4 dB en la interferencia del canal adyacente.

Recientes experimentos llevados a cabo en Japón han demostrado que la relación de protección de canal adyacente en los enlaces de conexión, para una interferencia perceptible, podría reducirse al valor de 19 dB cuando las señales pasan a través de un amplificador TOP, en 12 GHz, que funciona en saturación con un factor de conversión MA/MP de 2 grados/dB y a continuación se reciben a través de un filtro de onda acústica de superficie de una anchura de banda de 27 MHz antes de la demodulación. Esos experimentos se realizaron sobre el sistema NTSC de 525 líneas.

En el Japón se han realizado experimentos sobre la relación de protección de canal adyacente para el sistema NTSC de 525 líneas, teniendo en cuenta los efectos del factor de conversión MA/MP de los repetidores de satélite. Los resultados de las mediciones subjetivas de las señales pasan a través de un amplificador TOP, en 12 GHz, y la simulación del computador de amplificación saturada, que comprende la conversión MA/MP, coinciden perfectamente, e indican que la relación de protección de canal adyacente, para una interferencia apenas perceptible, se reduce a 11 dB, después de tener en cuenta el factor de conversión MA/MP de 6°/dB (véase el punto 3.3 del presente Informe).

Teniendo en cuenta los diferentes resultados experimentales indicados, parece apropiado considerar para la relación de protección de canal adyacente un valor de planificación unificado del orden de 21 dB, independientemente del sistema de televisión empleado.

Al establecer el Plan en las Regiones 1 y 3 se utilizó un valor de 21 dB para la relación de protección cocanal del enlace de conexión.

4.3 *Interferencia del segundo canal adyacente*

Debido al rechazo fuera de banda, relativamente limitado, de los filtros del receptor que se espera utilizar en la práctica, la interferencia del segundo canal adyacente puede representar una contribución nada desdeñable al nivel de interferencia. Se estima que la relación de protección se encuentra en las proximidades de −10 dB, para señales NTSC con modulación de frecuencia con dos portadoras de sonido y filtros de 4 polos con elementos simples concentrados.

Algunas mediciones realizadas con señales C-MAC indican que es apropiada una relación de protección comprendida en el margen de 0 a −8 dB con el mismo tipo de filtro [Shelswell, 1984].

Los enlaces de conexión son los que aportan la mayor contribución a esta interferencia del segundo canal adyacente. La contribución de los enlaces descendente es desdeñable, puesto que la diferencial de la p.i.r.e. hacia un punto dado de la zona de servicio, debido a la superposición de los haces, se limita a unos cuantos decibelios. La contribución de los enlaces de conexión será más importante, produciéndose el caso más desfavorable cuando los enlaces de conexión para los dos canales, deseado y segundo canal adyacente interferente, van desde la misma zona de servicio hacia la misma posición orbital. Una diferencia de ganancia de las antenas hacia las dos estaciones, deseada e interferente, así como un desvanecimiento debido a la lluvia en el lugar de transmisión deseado cuando se observan condiciones de atmósfera despejada en el lugar interferente, puede producir una diferencia relativamente amplia en los niveles recibidos en el satélite.

En el caso de la planificación para la Región 2 en la CARR SAT-83, esta diferencial de nivel de los enlaces de conexión puede ser de hasta 16 dB, lo que da un margen para el segundo canal adyacente de −6 dB, para una relación de protección correspondiente de −10 dB, convirtiéndose en muchos casos en el mecanismo de interferencia predominante. Se ha supuesto una reducción de 10 dB de la interferencia del segundo canal adyacente de enlace de conexión debida al filtrado de canales de satélite para evitar ese predominio.

Otros problemas que pueden aparecer son la transmisión significativa de fuertes señales procedentes del segundo canal adyacente a través del repetidor del satélite e intermodulación con la señal deseada en el amplificador no lineal del repetidor. Esto provoca la radiación de más componentes interferentes dentro y fuera de la anchura de banda nominal del canal del enlace descendente. En el Plan de los enlaces descendentes para las Regiones 1 y 3, las zonas de cobertura próximas o que se superponen trabajan con canales con una separación de frecuencia de dos canales, teniendo el mismo sentido de polarización en la misma posición orbital. Por consiguiente, existe la posibilidad de provocar una interferencia adicional del enlace descendente sobre el canal deseado *n* debido a que:

- la señal del enlace de conexión del canal *n* pasa a través de repetidores coubicados sobre el canal $n \pm 2$, y
- se puede producir intermodulación en el mismo repetidor en canales $n \pm 2$ procedente de las señales transmitidas por los canales $n \pm 4$.

Por lo tanto, es preciso asegurar el rechazo adecuado de las señales del segundo canal adyacente mediante un filtrado en el repetidor del satélite, a fin de minimizar este posible mecanismo de interferencia.

Un estudio realizado en el Reino Unido llegó a la conclusión de que esta necesidad de tener en cuenta la interferencia del segundo canal adyacente puede evitarse en la planificación de los enlaces de conexión de las Regiones 1 y 3 y si se supone traslación directa de frecuencias, siempre que se establezca un rechazo del segundo canal adyacente a través del repetidor del satélite de al menos 40 dB [Shelswell, 1984], lo cual ha sido logrado ya en la práctica. El segundo estudio realizado en el Japón mostró que suponiendo un desvanecimiento intenso debido a la lluvia (de unos 18 dB) en el segundo canal adyacente, el rechazo necesario en el segundo canal adyacente por el efecto combinado de los filtros de canal de entrada y salida, es aproximadamente de 50 dB.

En el segundo canal adyacente, puede obtenerse en la práctica un rechazo de las señales de 55 dB mediante el efecto combinado de los filtros de entrada y de salida del repetidor [CCIR 1986-90b]. Por consiguiente, se confirma que no sería necesario tener en cuenta la interferencia al segundo canal adyacente cuando al evaluar el plan de enlaces de conexión para las Regiones 1 y 3 si el plan se basa en la utilización de filtros de repetidores de satélite para rechazar la interferencia del segundo canal adyacente.

Para la planificación en las Regiones 1 y 3, no se tuvo en cuenta la interferencia debida al segundo canal adyacente.

4.4 Cálculo del margen de protección equivalente para las Regiones 1 y 3*

El margen de protección equivalente (M_u) del enlace de conexión viene dado por la fórmula:

$$M_u = -10 \log \left(10^{-M_1/10} + 10^{-M_2/10} + 10^{-M_3/10} \right) \text{(dB)}$$

donde M_1 es el valor, en dB, del margen de protección para el mismo canal, es decir:

$$M_1 = \left[\frac{\text{potencia deseada}}{\text{suma de las potencias interferentes cocanal}} \right] \text{(dB)} - \text{relación de protección cocanal (dB)}$$

M_2 y M_3 son los valores, en dB, del margen de protección para los canales adyacentes superior e inferior, respectivamente, es decir:

$$M_2 = \left[\frac{\text{potencia deseada}}{\text{suma de las potencias interferentes del canal adyacente superior}} \right] \text{(dB)} - \text{relación de protección del canal adyacente (dB)}$$

$$M_3 = \left[\frac{\text{potencia deseada}}{\text{suma de las potencias interferentes del canal adyacente inferior}} \right] \text{(dB)} - \text{relación de protección del canal adyacente (dB)}$$

Todas las potencias se consideran a la entrada del receptor.

---

* La definición del margen de protección equivalente para las Regiones 1 y 3 figura en el § 4.11 de la Recomendación 566.

4.5 Cálculo del margen de protección equivalente* global para las Regiones 1 y 3**

El margen de protección equivalente global M viene dado en dB por la expresión [Brajan, 1986]:

$$M = -10 \log \left[10^{-(M_u + R_{cu})/10} + 10^{-(M_d + R_{cd})/10} \right] - R_{co}$$

donde M_u = margen de protección equivalente para el enlace de conexión (según la definición del punto 4.4)

M_d = margen de protección equivalente para el enlace descendente

R_{cu} = relación de protección cocanal del enlace de conexión

R_{cd} = relación de protección cocanal del enlace descendente

R_{co} = relación de protección cocanal global.

Los valores de las relaciones de protección utilizados para la planificación son los siguientes:

R_{cu} = 40 dB

R_{cd} = 31 dB

R_{co} = 30 dB.

4.6 *Interferencia entre satélites coubicados*

Los casos más críticos de interferencia de enlaces de conexión corresponden a los canales con polarización cruzada transmitidos hacia satélites coubicados.

En el caso de que satélites coubicados utilicen un canal común con polarización cruzada, se necesita una relación de protección de 40 dB. Una discriminaicón de más de unos 30 dB a partir del diagrama de la antena receptora del satélite requiere una separación geográfica de las zonas de servicio de los enlaces de conexión. La discrimininación es la diferencia entre la ganancia copolar hacia los puntos dentro de la zona de servicio deseada y la ganancia contrapolar hacia el punto más próximo de la zona de servicio interferente. Los diagramas de las antenas de satélite se dan normalmente como funciones de φ/φ_0, donde φ es el ángulo exocéntrico entre la dirección del eje y la dirección de interés, y φ_0 es la anchura de haz a -3 dB de la antena de satélite. La discriminación entre las señales deseada e interferente es entonces la diferencia entre la ganancia hacia la estación de enlace de conexión deseada y la ganancia para el ángulo φ. Si se toma como discriminación máxima la opuesta a la ganancia en el eje, una discriminación de 40 dB en el borde de la zona de servicio exigiría una ganancia en el eje de 43 dB y valores de φ/φ_0 superiores a 2. Ganancias de antenas de satélite de 43 dB no son consecuentes con zonas de servicio nacionales del enlace de conexión para muchos países. Tener en cuenta las inhomogeneidades de la señal recibida debidas a la atenuación producida por la lluvia y a niveles desiguales de potencia de transmisión exigiría aún mayores ganancias de antena. Una ganancia en el eje de 49 dB (anchura de haz de 0,6°) proporcionaría, como máximo, un margen de 6 dB para la atenuación producida por la lluvia.

---

* El adjetivo "equivalente" indica que se han incluido los márgenes de protección para todas las fuentes interferentes de los canales adyacentes así como las fuentes de interferencia cocanal.

** Estas definiciones figuran en la Recomendación 566.

Considérese también el caso en que satélites coubicados y que funcionan en canales adyacentes con polarización cruzada tienen zonas de servicio de enlace de conexión comunes. Supóngase que las posibilidades de discriminación son de 25 dB para la antena receptora del satélite y de 30 dB para la antena transmisora de la estación terrena. Como las dos componentes de interferencia pueden estar en fase, se aplicará la suma de tensiones para determinar el nivel de interferencia. En condiciones de cielo despejado, la relación C/I del enlace de conexión para un canal adyacente sería de 21,1 dB. Si el trayecto deseado del enlace de conexión experimenta una atenuación debida a la lluvia de 10 dB, la relación C/I del enlace de conexión cae hasta 11,1 dB. La relación de protección de 24 dB preconizada por la CAMR-RS-77 no puede alcanzarse en este ejemplo, ni siquiera en condiciones de cielo despejado.

Una de las posibles soluciones del problema de la interferencia de canal adyacente consiste en prever una ligera separación entre satélites coubicados. Un estudio realizado en Canadá reveló que puede obtenerse una mejora de aislamiento en el caso de dos satélites que transmiten canales adyacentes con polarización cruzada separando estos satélites en una fracción de 1°, de manera que puedan ser vistos como satélites de dos posiciones orbitales distintas por las antenas transmisoras de enlaces de conexión pero como satélites coubicados por las antenas de recepción más pequeñas. Esto permite eliminar casi por completo la susceptibilidad, para la relación C/I de canal adyacente del enlace total, a los desvanecimientos causados por la lluvia en los enlaces de conexión, a costa de una pequeña pérdida de ganancia en el terminal de recepción.

La fig. 4 muestra los resultados del estudio paramétrico que darán la relación global C/I de canal adyacente en función de la separación orbital y para diferentes tamaños de la antena de transmisión. Se utilizaron en este análisis los parámetros técnicos adoptados en la CARR SAT-83 que incluyen los errores de puntería de las antenas de transmisión y de recepción. La figura incluye también la variación en la ganancia de la antena de recepción en función de la separación orbital. Debe señalarse que se ha tenido en cuenta una pérdida de ganancia de recepción de 1 dB debido al error de puntería en el cálculo de la G/T de la estación terrena.

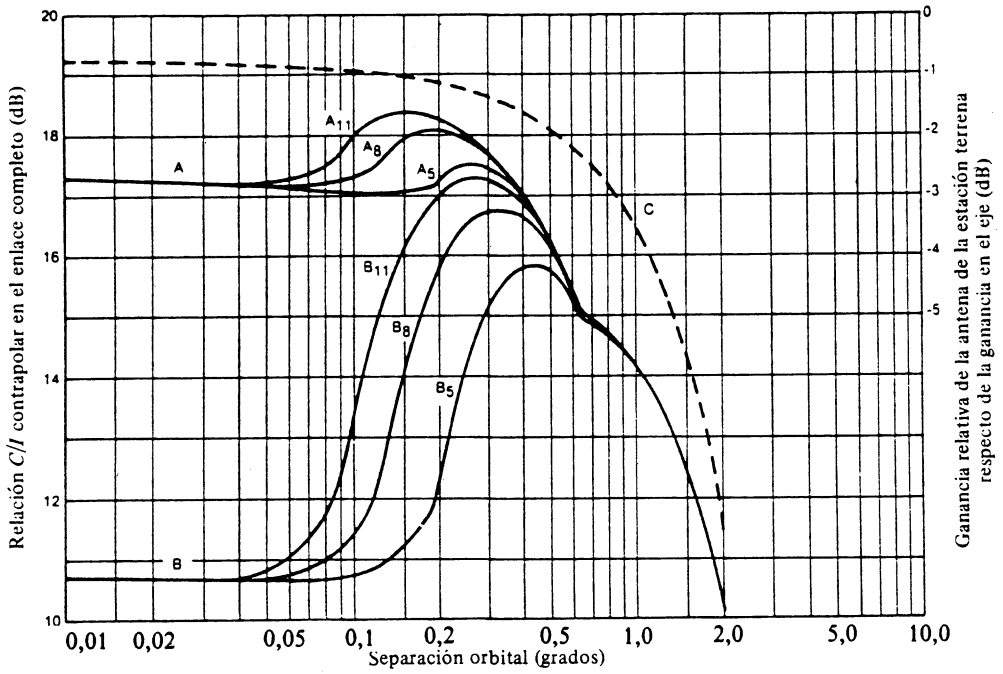


FIGURA 4 – *Mejora de la relación C/I contrapolar mediante la separación orbital*

Curvas A : Condiciones de cielo despejado sobre los enlaces de conexión y descendente

B : Atenuación por la lluvia de 10 dB sobre el enlace de conexión deseado

C : Degradación de la ganancia copolar de la antena receptora de la estación terrena

A_5 : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para antenas de 5 m en los emplazamientos de enlaces de conexión (situación de cielo despejado)

A_8 : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para 8 m en los emplazamientos de enlaces de conexión (situación de cielo despejado)

A_{11} : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para antenas de 11 m en los emplazamientos de enlaces de conexión (situación de cielo despejado)

B_5 : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para antenas de 5 m (situación de desvanecimiento de 10 dB)

B_8 : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para antenas de 8 m (situación de desvanecimiento de 10 dB)

B_{11} : Relación C/I contrapolar en el enlace completo para antenas de 11 m (situación de desvanecimiento de 10 dB)

La separación orbital óptima es el punto de mejor discriminación por polarización en condiciones de desvanecimiento en el enlace de conexión. Éste representa el mejor compromiso entre la discriminación por polarización en el enlace de conexión y la pérdida de ganancia en el enlace descendente. Se ha comprobado que este valor óptimo es de 0,4° para antenas de transmisión de enlace de conexión de 5 m. Esta separación se utilizó para elaborar el Plan para la Región 2 en la CARR SAT-83. El empleo de antenas de transmisión más grande desplazará este valor óptimo a separaciones orbitales más pequeñas (por ejemplo, 0,3° para antenas de 8 m y 0,27° para antenas de 11 m).

La CAMR-ORB(88) decidió que las administraciones podían ubicar los satélites de un mismo "grupo" (es decir, que comparten la misma posición nominal en el plan) en cualquier posición esperada, como máximo, 0,2° de la posición nominal, a condición de obtener el acuerdo de las otras administraciones de esta posición orbital. El propósito de esta disposición es permitir una discriminación suplementaria entre enlaces de conexión (grandes antenas de transmisión) mientras que, en la recepción del enlace descendente (antenas pequeñas), puede considerarse que los satélites siguen en la misma posición.

4.7 *Efecto de la conversión MA/MP*

En el § 3.3 se considera la degradación de la relación efectiva C/N en el enlace de conexión, provocada por la conversión MA/MP en el transpondedor del satélite. Cabe esperar que se produzca un efecto similar en las relaciones efectivas C/I del enlace de conexión, si bien hasta ahora no hay suficiente evidencia experimental para confirmar este hecho. Pruebas llevadas a cabo en el Reino Unido indican que con un factor de conversión MA/MP bajo (< 2°/dB), el efecto de la interferencia mutua sobre los enlaces de conexión es muy similar a su efecto sobre el enlace descendente [Shelswell, 1984]. Es precisa la realización de estudios ulteriores si se trata de factores de conversión MA/MP más elevados, como los que actualmente tienen los amplificadores TOP de alta potencia necesarios en la radiodifusión por satélite.

La disminución de las relaciones C/I en el enlace total dependerán de las relaciones relativas C/I en el enlace de conexión y en el enlace descendente de forma similar al efecto que tiene, sobre la relación total C/N, el desequilibrio en el enlace tal como se indica en el § 3.3.

4.8 *Técnicas para reducir la interferencia mutua entre enlaces de conexión*

Para aminorar la interferencia recíproca entre enlaces de conexión pueden adoptarse los métodos siguientes (véase el Informe a la CAMR-ORB(85)):

- Es conveniente utilizar un conjunto común de parámetros técnicos para todos los enlaces de conexión en la planificación, pero, según estudios preliminares realizados por varias administraciones, puede ser difícil obtener las relaciones portadora/interferencia requeridas en un pequeño número de enlaces de conexión, particularmente cuando ciertas administraciones tienen que satisfacer necesidades especiales.

  A fin de superar estas dificultades, se propone cierta flexibilidad en los valores de los parámetros de planificación utilizados. En el proceso de planificación pueden aplicarse una o más de las siguientes técnicas, cuando sea necesario, para lograr los valores deseados de protección contra la interferencia.

- Ajuste del nivel máximo de la p.i.r.e. de los posibles enlaces de conexión interferentes o enlaces de conexión sujetos a interferencia excesiva para mantener relaciones portadora/ruido y portadora/interferencia adecuadas en los enlaces de conexión ajustados.

- Cuando resulta afectada adversamente la planificación independiente de posiciones orbitales, los diagramas de respuesta fuera del eje de lóbulos laterales con copolarización y polarización cruzada de la antena transmisora de estación terrena pueden limitarse a $29 - 25 \log \varphi$ (dBi), para valores de ángulo fuera del eje, φ, en las regiones de las posiciones orbitales adyacentes y segundas adyacentes en el plano de la órbita de los satélites geoestacionarios.

- En los casos en que se logra un aislamiento insuficiente con polarización cruzada, el diagrama de respuesta fuera del eje de lóbulos laterales con polarización cruzada de la antena transmisora de estación terrena puede limitarse a $24 - 25 \log \varphi$ (dBi) para $0{,}76° \leqslant \varphi \leqslant 22{,}9°$ y -10 (dBi) para $\varphi > 22{,}9°$.

- Ajuste de las asignaciones de canales de enlaces de conexión, manteniendo la misma frecuencia de transmisión para todas las asignaciones asociadas con un haz de enlace descendente dado.

- Modificación de la forma del diagrama del haz, del tamaño y/o de las respuestas de lóbulos laterales de la antena receptora del satélite (por ejemplo, antena de múltiples haces o de haz conformado).

– Desalineación de la dirección de puntería del haz de la antena receptora del satélite, sujeta a que se mantenga invariable el valor fijado de la relación portadora/ruido.

– Mejora de la precisión de puntería del haz de la antena receptora del satélite a 0,1°.

– Establecimiento de un límite superior para el margen de la atenuación debida a la lluvia incluida en el balance de potencia del enlace de conexión.

– Separación de las posiciones de los satélites en la órbita de ±0,2° con respecto a la posición nominal, y especificación de la p.i.r.e. fuera del eje de la estación terrena pertinente en la gama 0° a 1° en ángulos del haz fuera del eje.

Para esos casos, en los que la p.i.r.e. (dBW) es la p.i.r.e. en el eje de la estación terrena, la p.i.r.e. fuera del eje de la antena transmisora de la estación terrena para ángulos $0° \leqslant \varphi < 1°$ no debe ser mayor que:

p.i.r.e. (dBW)	para $0° \leqslant \varphi \leqslant 0{,}1°$
p.i.r.e. $- 21 - 0 \log \varphi$ (dBW)	para $0{,}1° < \varphi \leqslant 0{,}32°$
p.i.r.e. $- 5{,}7 - 53{,}2\ \varphi^2$ (dBW)	para $0{,}32° < \varphi \leqslant 0{,}44°$
p.i.r.e. $- 25 - 25 \log \varphi$ (dBW)	para $0{,}44° < \varphi < 1°$

5. Características de las estaciones terrenas de los enlaces de conexión

5.1 *P.i.r.e.*

Una vez especificados la banda de frecuencias y el factor de calidad G/T del satélite, la p.i.r.e. de la estación terrena requerida para satisfacer la relación C/N está en gran parte determinada por las estadísticas relativas a la atenuación inducida por la precipitación en los emplazamientos de la estación terrena. Si L designa la pérdida neta de trayecto en dB, que no se excede durante un porcentaje determinado del mes más desfavorable, por ejemplo, 99%, entonces la p.i.r.e. requerida de la estación terrena por canal viene dada por la ecuación:

$$p.i.r.e. = P_E + G_E = C/N + 10 \log (kB) - G/T + L \qquad \text{dBW} \tag{4}$$

donde:

P_E: potencia del transmisor de la estación terrena por canal (dBW),

G_E: ganancia en el eje de la antena de la estación terrena (dBi),

C/N: relación portadora/ruido en la entrada del receptor del satélite (dB) excedida, por ejemplo, durante el 99% del mes más desfavorable,

k: constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K),

B: anchura de banda en FI del receptor del satélite (Hz),

G/T: factor de calidad del satélite (con el alimentador y la antena de recepción incluidos) (dB(K^{-1})).

Las consideraciones formuladas en el § 3.3 permiten pensar que debe elegirse una relación C/N de entrada de satélite del orden de 26 dB. Para ilustrar la utilización de esta ecuación, tómese C/N = 26 dB, B = 27 MHz (como se especifica en el Plan para las Regiones 1 y 3), G/T = 5 dB(K^{-1}) (correspondiente a T = 2000 K y a G = 38 dB en el borde de un haz de 1,5°) y L = 212 dB (pérdida de 209 dB en el espacio libre a 18 GHz, más 3 dB de atenuación por la lluvia correspondiente al 1% del promedio nacional más desfavorable de las estadísticas de previsión del mes más desfavorable para Europa) (véase el Informe 565). El resultado del cálculo de la p.i.r.e. de la estación terrena en este caso da 78,7 dBW. Este valor se halla perfectamente dentro de la posibilidad de p.i.r.e. procedente de una estación terrena que trabaje en 18 GHz con una potencia de transmisión de 200 W aproximadamente y una antena de 5 m de diámetro y 55% de eficacia.

En la práctica, cuando se toman en cuenta factores distintos de la relación C/N, los valores de p.i.r.e. requeridos para los enlaces de conexión estarán en la gama de 78-87 dBW, conforme a las características de cada sistema. Como ejemplo, para la planificación de la Región 2, se ha utilizado una p.i.r.e. nominal de 87 dBW.

Otro ejemplo práctico, basado en la utilización de varias estaciones terrenas de enlace de conexión con un satélite de antena receptora de haz estrecho para reducir los problemas de la interferencia mutua de los enlaces de conexión, conduce a una p.i.r.e. necesaria de 81,5 dBW. Para ese ejemplo se han elegido los siguientes parámetros: C/N = 26 dB, B = 27 MHz (véanse los Planes de las Regiones 1 y 3), G/T = 8,5 dB(K^{-1}) (correspondiente a T = 2500 K), G = 46,5 dB en el límite de un haz de 0,6°, un margen de 4 dB para el emplazamiento de puntería de la antena receptora, para tener en cuenta los enlaces de conexión situados cerca del borde de la zona de cobertura, y L = 218,3 dB (209,3 dB de pérdida en el espacio libre a 18 GHz, y 9 dB como ejemplo de atenuación por la lluvia). La p.i.r.e. mínima necesaria es entonces de 81,5 dBW. Para tener en cuenta el margen de la estación (seguimiento, medición, etc.) puede necesitarse la adición de 3 dB a fin de obtener la p.i.r.e. necesaria máxima de 84,5 dBW.

Se dispone fácilmente de antenas y transmisores que pueden satisfacer el requisito de p.i.r.e., teniendo en cuenta las pérdidas del enlace de conexión y del multiplexor. Existen antenas (del tipo Cassegrain y de alimentación central) con diametros de 8 m y mayores y se están elaborando tubos de transmisión en 18 GHz con una potencia de salida de 1 kW.

5.2 *Diagrama de referencia de la antena transmisora*

En la Recomendación 465 se propone el siguiente diagrama de radiación de referencia copolar para antenas transmisoras de estación terrena del servicio fijo por satélite con una relación $D/\lambda \geqslant 100$:

$$G = 32 - 25 \log \varphi \quad \text{dBi} \quad \text{para } 1^\circ < \varphi \leqslant 48^\circ \qquad (5)$$
$$= -10 \quad \text{dBi} \quad \text{para } \varphi > 48^\circ$$

En el Informe 391, se analiza este diagrama de radiación y se indican datos que los apoyan. El Informe 390 trata de los factores que influyen en los niveles de los lóbulos laterales. El Informe 453-3 (1982), sin embargo, sugiere el uso de un diagrama más exigente para aumentar la eficacia de utilización del recurso órbita/espectro:

$$G = 28 - 25 \log \varphi \quad \text{dBi} \qquad (6)$$

hasta un mínimo de -20 dBi.

Dadas las opiniones de los fabricantes de antenas en Francia y las pruebas efectuadas en el Canadá con antenas modernas de alta calidad (véase el anexo I), es posible que puedan fabricarse antenas que no tengan más del 10% de sus crestas de lóbulos laterales por encima de esa envolvente.

Entre los factores que indican que esos niveles son alcanzables en las antenas prácticas figura el hecho de que el diseño de los enlaces de conexión (incluido cualquier subreflector) puede optimizarse sólo para la banda de frecuencia de transmisión empleada (500 u 800 MHz, según la Región).

La XVI Asamblea Plenaria del CCIR adoptó la Recomendación 580 según la cual las antenas de nuevas estaciones terrenas con relación D/λ superior a 150, instaladas después de 1988 ——————, y que funcionen con un satélite geoestacionario, debieran tener como objetivo de diseño el que la ganancia del 90% de las crestas de los lóbulos laterales no exceda de:

$$G = 29 - 25 \log \varphi \quad \text{dBi} \quad \text{para } 1^\circ \leqslant \varphi \leqslant 20^\circ \qquad (7)$$

En el Informe 391 se sugieren también diagramas de radiación para antenas pequeñas ($D/\lambda < 100$), pero esta relación corresponde a antenas de menos de 1,7 m de diámetro en 17 GHz y no es posible que se utilicen para conectar con los satélites de radiodifusión.

También sería posible optimar la calidad de funcionamiento de lóbulos laterales de las antenas para que corresponda a separaciones de satélite específicas en un plan que utilice una separación orbital fija. En este caso, tal vez convenga emplear un diagrama de referencia para la planificación del servicio de radiodifusión por satélite y otro para la coordinación con otros servicios.

Los apéndices 28 y 29 al Reglamento de Radiocomunicaciones hacen extensivos los diagramas de radiación copolar a ángulos inferiores a 1°, suponiendo un lóbulo principal gaussiano y una zona plana para el nivel del primer lóbulo lateral.

5.2.1 *Diagramas de referencia en la Región 2*

Los nuevos diagramas de radiación descritos más abajo e indicados en la fig. 5 fueron adoptados por la CARR SAT-83 para planificar los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión. En el anexo I al presente Informe figura la información de base.

5.2.1.1 *Componente copolar*

La componente copolar de la antena del enlace de conexión se basa en una envolvente de lóbulos laterales de «29 – 25 log φ» que desciende hasta -10 dB con relación a la ganancia isótropa para la región del lóbulo posterior, conforme se indica en la fig. 5. El lóbulo principal de la antena está limitado por el segmento «36 – 20 log φ», al cual son tangentes los lóbulos principales gaussianos de las antenas de cualquier tamaño, en el supuesto de una eficacia de antena del 65%. Este segmento se extiende hasta el ángulo de 0,32°, más allá del cual una parte del lóbulo principal gaussiano de la antena de 2,5 m (tamaño mínimo permitido por el Plan) lo une a la envolvente de lóbulos laterales de «29 – 25 log φ». Esto tiene en cuenta el ensanchamiento de los lóbulos laterales en el caso de las antenas pequeñas.

5.2.1.2 *Componente contrapolar*

La componente contrapolar de la antena del enlace de conexión se basa en una meseta casi en el eje, con una discriminación de 30 dB con relación a la ganancia copolar en el eje. En los ángulos grandes con el eje, los lóbulos contrapolares tienen que respetar el segmento en pendiente de «9 – 20 log φ» hasta -10 dB con relación a la ganancia isótropa. Este segmento tiene una pendiente tal que la unión con la meseta casi en el eje estará siempre allí donde tiene lugar el peor lóbulo lateral contrapolar, que resulta está en el punto a -3 dB en la componente copolar.

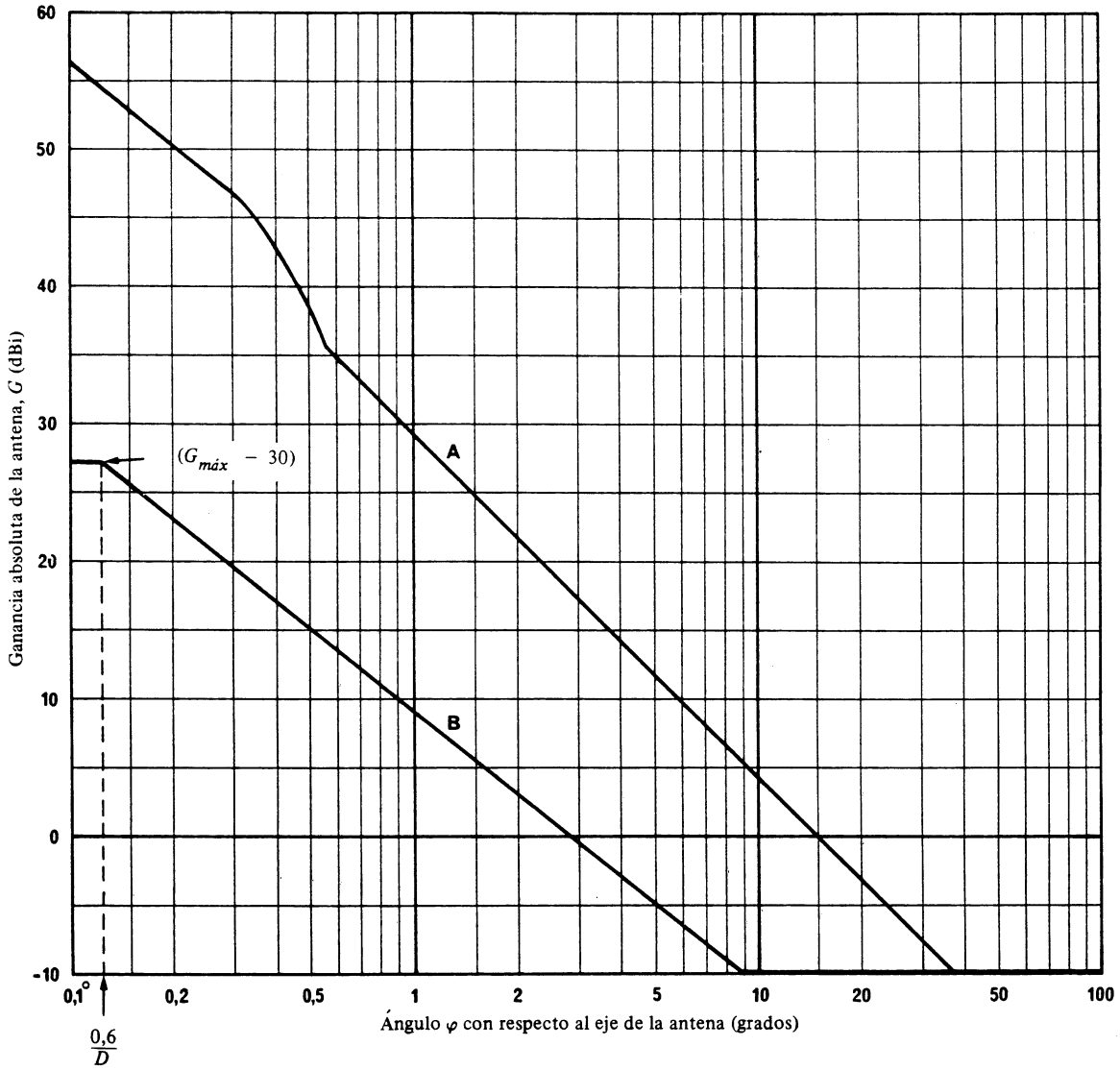


FIGURA 5 – *Diagramas de radiación de referencia para las componentes copolar y contrapolar de antenas transmisoras para la Región 2*

Curvas A: Componente copolar
(dBi con relación a la ganancia isótropa)

$36 - 20 \log \varphi$	para	$0{,}1° \leqslant \varphi < 0{,}32°$
$51{,}3 - 53{,}2\, \varphi^2$	para	$0{,}32° \leqslant \varphi < 0{,}54°$
$29 - 25 \log \varphi$	para	$0{,}54 \leqslant \varphi < 36°$
-10	para	$\varphi \geqslant 36°$

B: Componente contrapolar
(dBi con relación a la ganancia isótropa)

$G_{máx} - 30$	para	$\varphi < \left(\frac{0{,}6}{D}\right)°$
$9 - 20 \log \varphi$	para	$\left(\frac{0{,}6}{D}\right)° \leqslant \varphi < 8{,}7°$
-10	para	$\varphi \geqslant 8{,}7°$

donde:

φ : ángulo con el eje referido al eje del lóbulo principal;

$G_{máx}$: ganancia copolar en la dirección del eje de la antena;

D : diámetro de la antena en (m) ($D \geqslant 2{,}5$).

5.2.1.3 *Método de análisis para la observancia de los diagramas de radiación de referencia*

Para determinar si los diagramas de radiación de antena medidos son conformes o no a los diagramas de referencia se procede de la siguiente manera:

- para la componente copolar, no se debe exceder del diagrama de referencia en la gama angular de 0,1° a 0,54°;
- para la componente contrapolar, no se debe exceder el diagrama de referencia en la gama angular de 0° a $(0{,}6/D)°$;
- para ángulos grandes con respecto al eje, el diagrama de referencia no puede ser excedido por más del 10% de los lóbulos laterales contenidos en cada ventana angular de referencia. Estas ventanas son 0,54° a 1°, 1° a 2°, 2° a 4°, 4° a 7°, 7° a 10°, 10° a 20°, 20° a 40°, 40° a 70°, 70° a 100° y 100° a 180°. La primera ventana angular de referencia para evaluar la componente contrapolar debe ser de $(0{,}6/D)°$ a 1,0°.

5.2.2 *Diagramas de referencia en las Regiones 1 y 3*

Para la planificación de los enlaces de conexión en las Regiones 1 y 3, la CAMR ORB-88 adoptó valores de p.i.r.e. fuera del eje que no deben rebasarse; esos valores se basan en la utilización de antenas transmisoras de estación terrena con una ganancia nominal de 57 dBi y con las características descritas más adelante.

5.2.2.1 *Diámetro de la antena*

Con un valor determinado de p.i.r.e. en el eje y un diagrama relativo determinado de antena, la p.i.r.e. fuera del eje depende del diámetro de la antena. Cuanto mayor sea el diámetro de la antena, menor será la p.i.r.e. fuera del eje, que es una posible fuente de interferencia entre posiciones orbitales adyacentes.

De ahí que para la planificación del enlace de conexión sea necesario determinar un diámetro de referencia de la antena. Para la banda 17,3-18,1 GHz, el valor adoptado es de 5 m, y para la banda 14,5-14,8 GHz, de 6 m.

También se pueden utilizar antenas más pequeñas, de 2,50 m de diámetro por ejemplo, siempre que no haya degradación de la situación de interferencia. Ello significa en la práctica que puede ser preciso reducir la potencia o mejorar el diagrama de la antena, para que no haya un aumento de la p.i.r.e. fuera del eje y, por ende, una interferencia inaceptable en la posición orbital adyacente y en otros servicios.

5.2.2.2 *Ganancia en la dirección del eje*

La ganancia en la dirección del eje para la antena de 5 m en 17,3-18,1 GHz, y para la antena de 6 m en 14,5-14,8 GHz, se considera de 57 dBi.

5.2.2.3 p.i.r.e. fuera del eje de las antenas transmisoras

En la Figura 6 se indican las p.i.r.e. copolar y contrapolar fuera del eje para la planificación en las Regiones 1 y 3.

5.2.2.4 *Ganancia contrapolar fuera del eje*

Según estudios realizados, para fines de planificación no es necesario mantener un alto grado de rechazo contrapolar para aberturas angulares apreciables con respecto al eje. Por consiguiente, pueden utilizarse características contrapolares idénticas a las características copolares para ángulos correspondientes a la separación orbital aplicada en las Regiones 1 y 3.

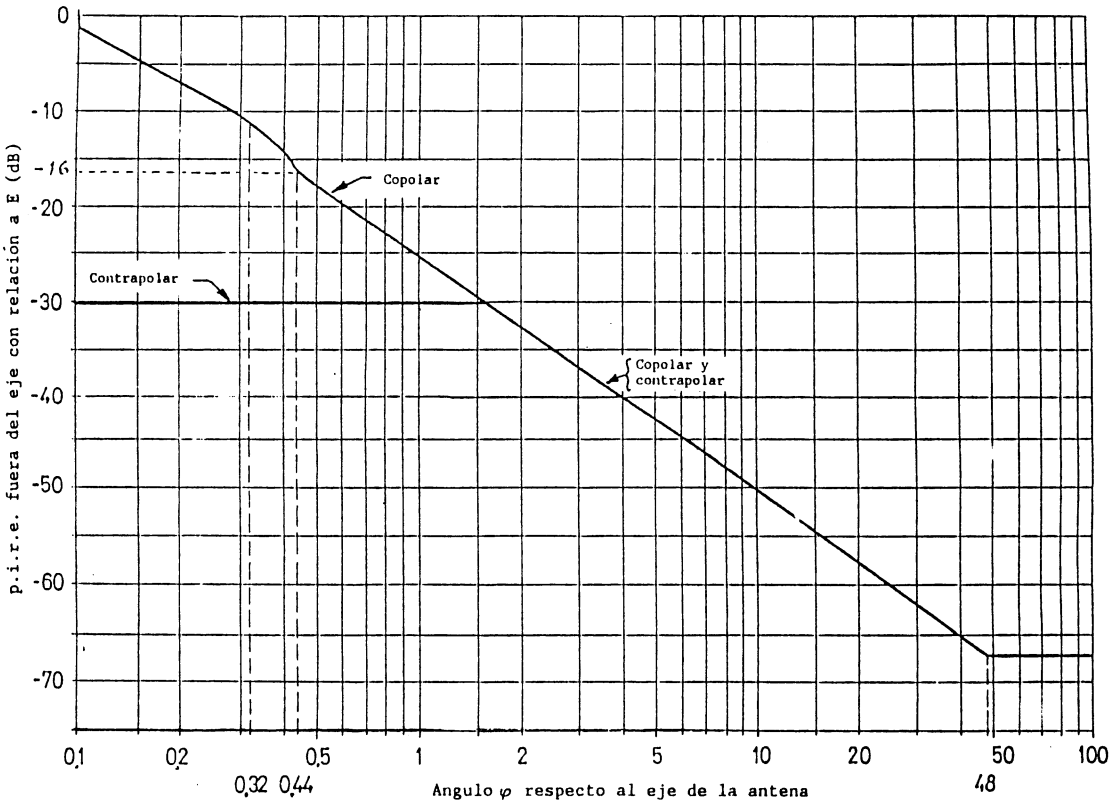


FIGURA 6

p.i.r.e. de la estación terrena en ángulos fuera del eje de la antena

Componente copolar (dBW):

E (dBW) para $0° < \theta \leq 0,1°$
E - 21 - 20 log θ (dBW) para $0,1° < \theta \leq 0,32°$
E - 5,7 - 53,2 θ^2 (dBW) para $0,32° < \theta \leq 0,44°$
E - 25 - 25 log θ (dBW) para $0,44° < \theta \leq 48°$
E - 67 (dBW) para $\theta > 48°$

Componente contrapolar (dBW):

E - 30 (dBW) para $0° \leq \theta \leq 1,6°$
E - 25 - 25 log θ (dBW) para $1,6° < \theta \leq 48°$
E - 67 (dBW) para $\theta > 48°$

donde E (dBW) es la p.i.r.e. en el eje de la antena de la estación terrena

y θ = ángulo con relación al eje del lóbulo principal (grados).

5.3 *Utilización de antenas transmisoras pequeñas*

El diámetro mínimo de una antena de estación terrena terminal que tuvo en cuenta la CARR SAT-83 para el diagrama de transmisión del enlace de conexión descrito en el § 5.2.1 es de 2,5 m. El ensanchamiento del haz principal de una antena de 2,5 m (D/λ = 150) ha sido incorporado en el diagrama de referencia copolar. Tales terminales transportables no darían lugar a mayor grado de interferencia que el calculado en un plan, a condición de que sus diagramas de radiación de lóbulos laterales no superasen las envolventes de lóbulos laterales propuestas con fines de planificación y a condición de que se adopte para la planificación un límite máximo de la potencia transmitida.

Para las Regiones 1 y 3 se puede tener en cuenta el empleo de una antena de menos de 5 m de diámetro a condición de que sea compatible con las condiciones de interferencia previstas en el Plan de enlaces de conexión, basado en un diámetro de por lo menos 5 m. Un estudio preliminar llevado a cabo en Japón demostró que en ciertas circunstancias, para la Región 3, no habría ninguna diferencia en los valores de C/I para los satélites coposicionados, independientemente de que empleen antenas transmisoras de por ejemplo, 2,5 m o incluso 1 m de diámetro, a condición de que los sistemas tengan una p.i.r.e. homogénea. Se produciría poca interferencia a los satélites adyacentes, incluso si se utilizasen antenas transmisoras de enlace de conexión de 2,5 m de diámetro y con las características de la Recomendación 465, a condición de que los sistemas tengan la misma p.i.r.e y que se desarrolle un plan de frecuencias de enlaces de conexión por transposición directa del Plan de enlaces descendentes de la CAM-RS-77. **La CAMR-ORB(88) adoptó un diámetro mínimo de antena de 2,5 m y el cumplimiento de las características de radiación fuera del eje que se indican en la Figura 6, adecuadas para una ganancia nominal en el eje de la antena de 57 dBi.**

Es posible que las relaciones C/N_u y C/I_u que pueden lograrse con esos terminales de estación terrena transportables no satisfagan los valores planificados para el 99% del tiempo del mes más desfavorable empleando una antena de mayores dimensiones, pero en la mayoría de los casos los valores obtenidos serían adecuados en condiciones de cielo despejado, como se indica en el cuadro I para la relación C/N_u. Esta relación C/N_u de los terminales transportables depende principalmente de la potencia transmitida y del factor de calidad G/T del satélite.

Será necesario que los sistemas de antenas de esos terminales transportables sean lo más sencillos y de dimensiones prácticas para su transporte por carretera. No debiera ser necesario en todos los casos un sistema de seguimiento. La práctica actual en el servico fijo por satélite parece indicar que las antenas plegables de 4,5 m y las no plegables de 2,5 m podrían satisfacer, en la mayoría de los casos, las normas de tráfico en carretera. Para una tolerancia del mantenimiento en posición del satélite de ± 0,1°, el empleo de antenas de más de 3 m de diámetro daría lugar a una variación de la densidad del flujo de potencia en el satélite de más de 3 dB en ausencia de seguimiento automático.

Sin embargo, si se considera una velocidad de deriva del satélite muy lenta y que esas pequeñas antenas transportables se usarán normalmente de una manera temporal, parece razonable la hipótesis de una deriva de 0,1° en vez de 0,28° como caso más desfavorable. Así pues, suponiendo una variación de la densidad del flujo de potencia en el satélite de 3 dB, sólo las antenas de más de 5 m de diámetro requerirían seguimiento automático.

5.4 *Control de potencia*

El control de potencia de 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.

5.4.1 *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 mantienen constante el valor de C/N_t según se puede ver en la fig. 7.

Experimentos realizados en el 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 [CCIR, 1978-82e]; [Shimoseko y otros, 1981]. 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.

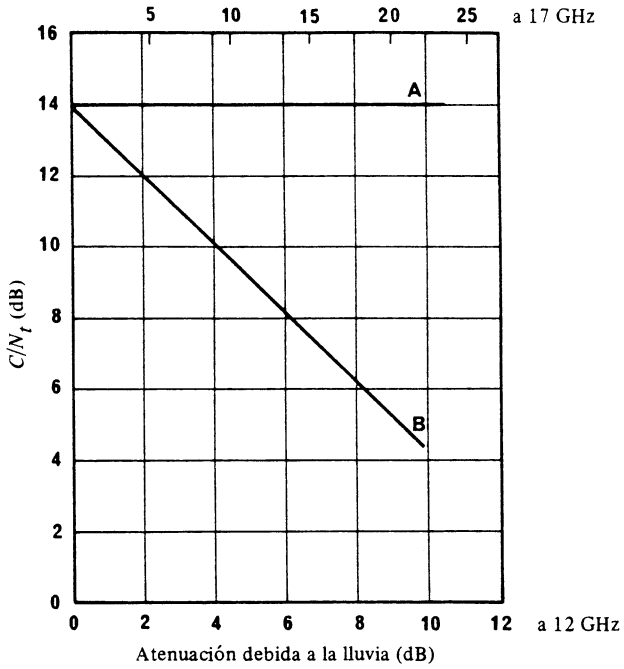


FIGURA 7 – *Efecto de la atenuación debida a la lluvia sobre C/N_t, con control de potencia (CP) en el enlace ascendente*

C/N_u con cielo despejado = 24 dB
C/N_d con cielo despejado = 14,5 dB

Curvas A: Lluvia en la estación del enlace de conexión solamente

B: Lluvia correlacionada en la estación del enlace de conexión y la estación del enlace descendente

5.4.2 Condiciones de utilización del control de potencia sin aumentar la interferencia

En esta sección 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 /CCIR, 1982-86c; Ohmi, 1985/, se determinan las condiciones que permiten utilizar el control de potencia en un enlace de conexión interferente sin que la relación C/I en un enlace interferido se degrade por debajo de los valores obtenidos cuando el enlace de conexión interferente está con cielo despejado.

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 (φ) y la anchura del haz a potencia/mitad (φ_0).**

Para el diagrama de radiación de referencia de antenas receptoras de satélite mostrado en la fig. 16, XPI_{sat} puede expresarse gráficamente como en la fig. 8.

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

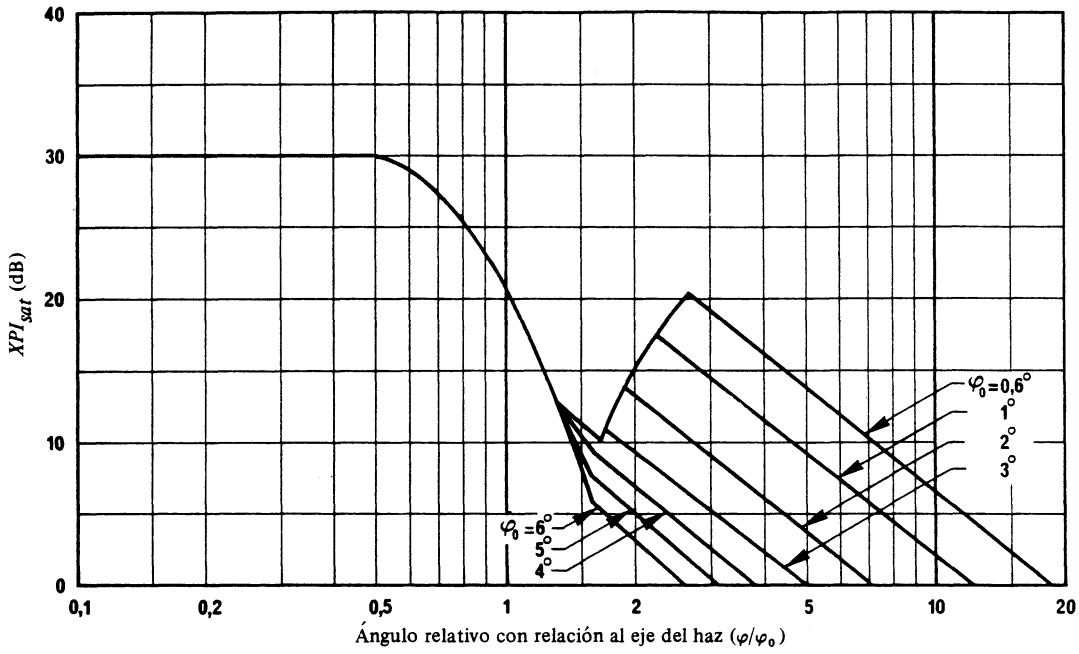


FIGURA 8 – *Discriminación por polarización cruzada (XPI_{sat}) de la antena receptora de un satélite (los diagramas de radiación de referencia se supone que son los que aparecen en la fig. 16)*

φ_0: anchura del haz a potencia mitad

XPI_{sat} (dB) – G_{rcwi} (dB) – G_{rxwi} (dB)

A fin de analizar el efecto de la XPI_{sat} sobre la C/I_u, seguidamente figura la ecuación (8) de C/I_u, que incluye explícitamente el parámetro XPI_{sat}, se ha obtenido como se indica a continuación:

$$\frac{C}{I_u} = \frac{P_w}{P_i} \cdot \frac{L_i}{L_w} \cdot \frac{R_i}{R_w} \cdot \frac{G_{rcww}}{G_{rcwi}} \cdot \frac{1}{A + \frac{1}{XPI_{sat}} + \frac{1}{XPI_{et}}} \tag{8}$$

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 la despolarización debida a la lluvia; se expresa mediante la siguiente ecuación:
$A = 10^{-(XPD/10)}$, donde XPD es la despolarización, en dB, debida a la lluvia a la que se refiere el § 3.4.2 en función de la atenuación debida a la lluvia y del ángulo de elevación.;

XPI_{sat}: relación entre las ganancias copolar (G_{rcwi}) y de 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 el control de potencia en un enlace interferente, la modificación de la relación C/I_u en un enlace interferente ΔM, se puede expresar como sigue:

$$\Delta M = \frac{C/I_{u,\ lluvia}}{C/I_{u,\ cielo\ despejado}} = \frac{R_i}{\Delta P_i} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{A}{\dfrac{1}{XPI_{sat}} + \dfrac{1}{XPI_{et}}}} \qquad (9)$$

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);

ΔP_i: aumento de potencia del transmisor terreno por control de potencia.

En la fig. 9 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 ΔM (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 CPI_{sat} es igual a 20 dB y XPI_{et} es igual a 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. 9 se presenta un ejemplo de posible algoritmo para aumentar la potencia del transmisor a medida que aumenta la atenuación causada por la lluvia.

El control de potencia representado en la curva B de la fig. 9 tiene como resultado un valor ΔM (dB) positivo según se puede ver en la curva B de la fig. 10, 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 representa ΔM sin utilización de control de potencia y la curva C representa ΔM con control de potencia según se indica en la curva A de la fig. 9 .

En el cuadro IV 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.

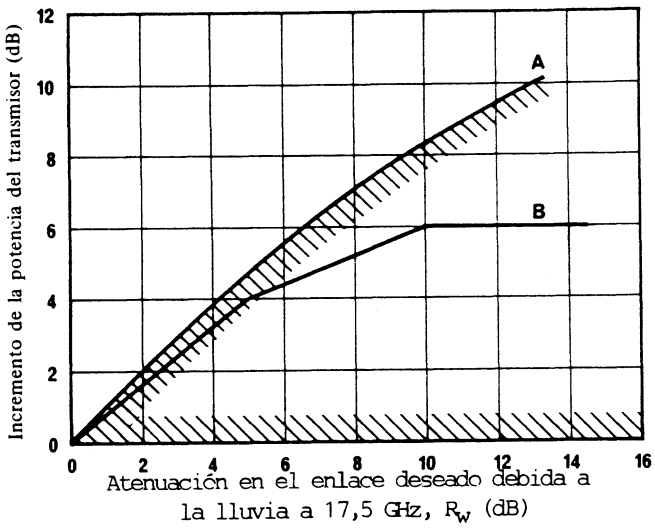


FIGURA 9 – *Posible incremento de la potencia del transmisor debido al control de potencia*

Curvas A: Límite superior para el control de potencia

B: Ejemplo de un control de potencia como el que se indica en el cuadro IV

XPI_{sat} = 20 dB
XPI_{et} = 30 dB
Ángulo de elevación: 50°

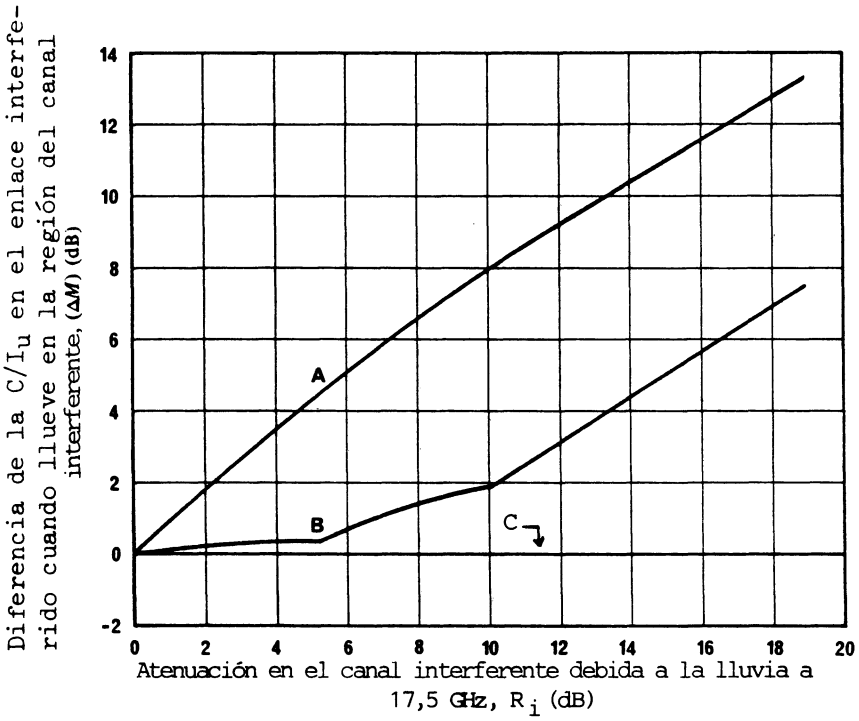


FIGURA 10 *Ejemplo de un control efectivo de potencia*

Curvas A: Sin control de potencia

B: Con control de potencia, correspondiente a la curva B de la fig. 9

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. 9

XPI_{sat} = 20 dB
XPI_{et} = 30 dB
Ángulo de elevación: 50°

CUADRO IV – *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 dB y 5 dB	Para una atenuación debida a la lluvia entre 5 dB 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
	60 a 90	0 a 5	5 a 9
20 a 25	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
	60 a 90	0 a 5	5 a 8
25 a 30 (1)	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

5.4.3 Utilización del control de potencia con potencial para aumentar la interferencia

Ciertas utilizaciones del control de potencia pueden empeorar la situación de interferencia. Ciertos estudios han demostrado [CCIR, 1978-82f] 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:

$$I_{pc} - I_{npc} = M_w - M_i + (CPA)_{i\,inst} - (CPA)_{w\,inst} \qquad (10)$$

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 (10)) 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 en [CCIR, 1982-86d], 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 del control de potencia sobre la relación C/I.

El efecto de 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° y calculamos la C/I_u contrapolar en función de la atenuación causada por la lluvia sobre el enlace de conexión para tres situaciones:

a) lluvia en el emplazamiento deseado solamente,

b) lluvia en los emplazamientos deseado e interferente simultáneamente,

c) lluvia en el emplazamiento interferente solamente.

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

En las figs. 11, 12 y 13 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, 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.

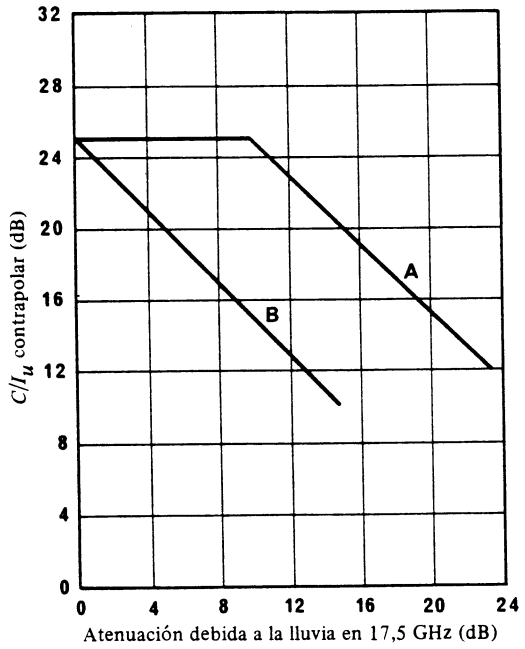


FIGURA 11 – *Efecto del control automático de ganancia (CAG) o control de potencia (CP) de 10 dB sobre la C/I_u contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en el emplazamiento deseado solamente (situación a))*

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

Curvas A: Con control de potencia de 10 dB

B: Con CAG o sin él
Sin control de potencia

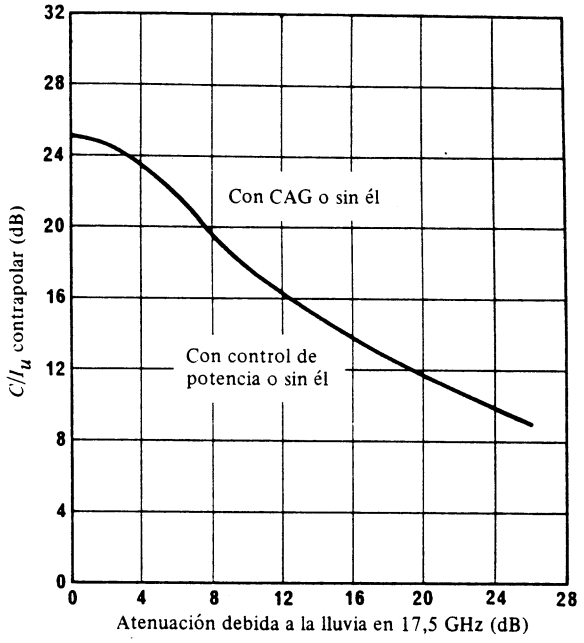


FIGURA 12 – *Efecto del control automático de ganancia (CAG) o del control de potencia sobre la C/I_u contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en los emplazamientos del transmisor deseado e interferente (situación b))*

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

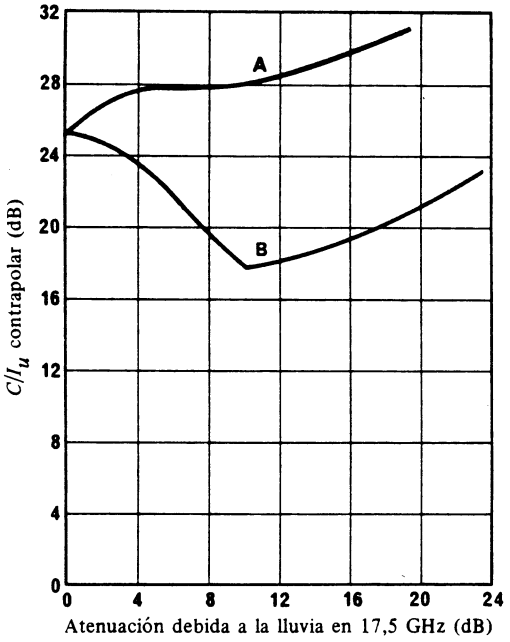


FIGURA 13 – *Efecto del control de potencia (CP) sobre la C/I_u contrapolar entre enlaces de conexión con polarización circular en 17,5 GHz, cuando llueve en el emplazamiento interferente solamente (situación c))*

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

5.4.4 Método de la CAMR-ORB(88) para el cálculo del control de potencia en las Regiones 1 y 3

5.4.4.1 Condiciones necesarias

En el Plan de las Regiones 1 y 3, se permite el control de potencia de conformidad con las características dadas en la Figura 14, siempre que el nivel de interferencia generada hacia cualquier otro enlace de conexión del Plan no degrade su C/I global en el espacio libre más de 0,5 dB, y que el aumento de potencia no supere la atenuación debida a la lluvia rebasada durante el 1% del mes más desfavorable, ó 10 dB.

5.4.4.2 Método de cálculo

a) Establecer la lista de todas las asignaciones de otras administraciones (A, B, C, ...) en la misma posición orbital y las dos posiciones adyacentes que pueden ser interferidas para la asignación estudiada (es decir, tres posiciones orbitales en total).

b) Calcular el margen de protección equivalente del enlace de conexión de la asignación A en condiciones de espacio libre, teniendo en cuenta todas las fuentes de interferencia de A en los puntos de prueba más desfavorables del arco visible, es decir:

- para la asignación A: el punto correspondiente al valor mínimo de la relación C/N;
- para cada fuente interferente de A: el punto correspondiente al valor máximo de la potencia de interferencia sobre A.

c) Calcular para la asignación estudiada, la atenuación debida a la lluvia para el 0,1% del mes más desfavorable y el valor correspondiente de la despolarización debida a la lluvia en todos los puntos de prueba (véanse los puntos 3.4.1 y 3.4.2 respectivamente).

d) Volver a calcular el margen de protección equivalente de enlace de conexión de la asignación A, teniendo en cuenta los efectos de la lluvia sobre la asignación estudiada, en los puntos de prueba más desfavorables, es decir:

- para la asignación A: el punto de prueba utilizado en el punto b);
- para la asignación estudiada: el punto de prueba más desfavorable correspondiente al valor máximo de la potencia de interferencia sobre A.*

En esta fase la p.i.r.e. de la asignación estudiada es la de valor nominal.

e) Aumentar la p.i.r.e. de la asignación estudiada en 0,1 dB y volver a calcular el margen equivalente del enlace ascendente de A como en el precedente punto d).

f) Repetir la operación del punto e) hasta que el margen equivalente del enlace ascendente de la asignación A se degrade en más de 0,5 dB en relación con el valor hallado en el punto 2 o hasta que el aumento de la p.i.r.e. exceda de 10 dB o la atenuación debida a la lluvia (véase el punto c)). Adoptar el aumento de la p.i.r.e. en el paso de iteración anterior.

g) Repetir las operaciones de los puntos b) a f) considerando las asignaciones B, C, ...

h) Retener el menor de los aumentos de la p.i.r.e. hallados en el punto f) para las diferentes asignaciones A, B, C, ...

---

* Este punto de prueba puede, en general, no ser el mismo que el calculado en el punto b).

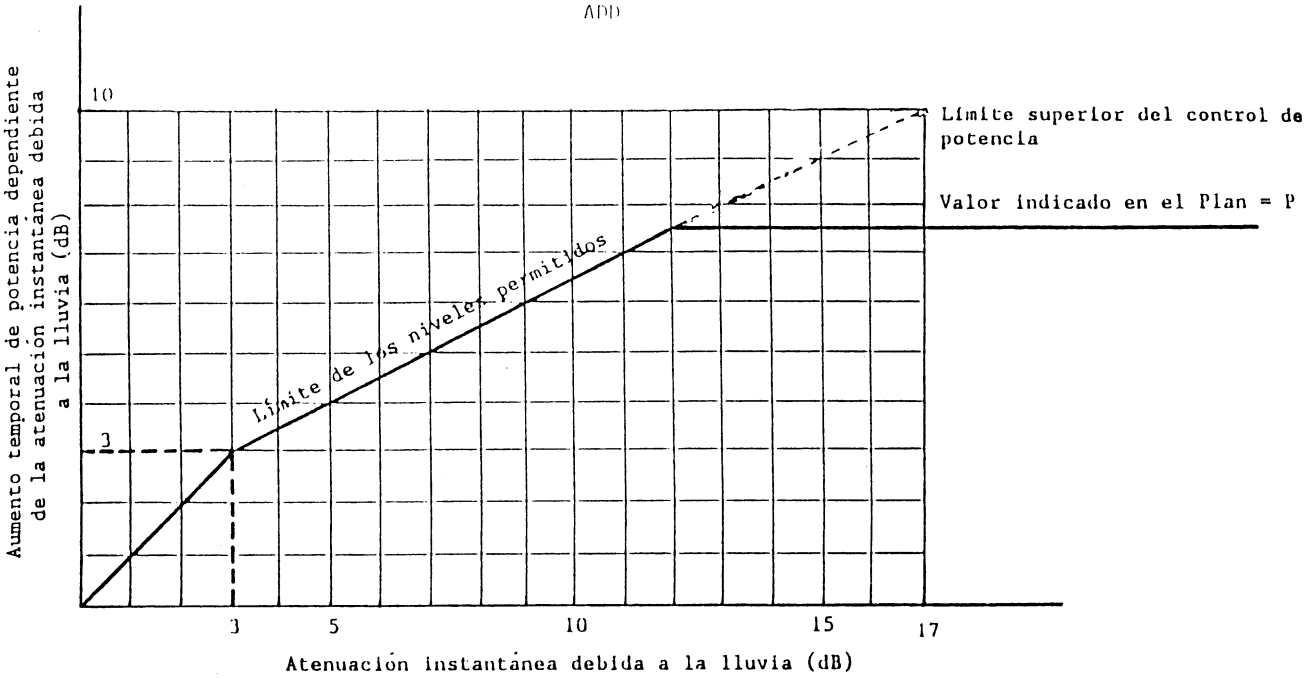


FIGURA 14

Características para el control de potencia del enlace ascendente

Nota:

P: El valor del aumento permitido indicado en el Plan de enlaces de conexión para países de las Regiones 1 y 3 que varía para cada asignación. El límite superior de este valor es de 10 dB.

5.4.5 Conclusiones

Una aplicación del control de potencia consistiría en aumentar la disponibilidad del enlace de conexión de manera que rebase la que se utiliza para la planificación. En esta aplicación, el aumento de potencia quedaría limitado a la cantidad que, suponiendo una aplicación perfecta, no conllevaría aumento alguno de la interferencia con otros enlaces de conexión.

Otra utilización del control de potencia consistiría en reducir al máximo la potencia transmitida requerida, excepto durante pequeños porcentajes de tiempo. Se utilizaría el control de potencia, en lugar de un margen fijo, para compensar la atenuación debida a la lluvia. La interferencia a otros enlaces de conexión podría aumentarse hasta superar el valor con cielo despejado.

La utilización del control de potencia en la última aplicación para mantener una determinada relación C/N y C/I en presencia de la atenuación por la lluvia tiene evidentemente ventajas e inconvenientes en el caso de satélites coubicados que emiten señales en contrapolarización. Por una parte, la relación C/I mejora con la lluvia en el trayecto deseado, mientras que, por otra parte, la relación C/I se degrada cuando llueve en el trayecto interferente. El descenso de C/I debido a la lluvia en el trayecto deseado es igual a la atenuación por la lluvia en ausencia de control de potencia. Las figs. 11 a 13 muestran que el descenso de C/I debido a la lluvia en el trayecto interferente es inferior a la atenuación por la lluvia cuando se utiliza el control de potencia. Los estudios incluidos en [CCIR, 1982-86d] comprueban ese resultado y calculan la diferencia en la degradación de C/I en 4,3 dB en presencia de un desvanecimiento por la lluvia de 10 dB, despolarización correspondiente a un desvanecimiento por la lluvia de 10 dB, y un ángulo de elevación del enlace de conexión de 30°.

El anterior resultado ofrece la posibilidad de que el control de potencia atenúe el problema de la interferencia en canales adyacentes en contrapolarización en el caso de satélites coubicados. Asociado al control de despolarización (§ 5.5), el control de potencia puede reducir al mínimo las variaciones de C/I en presencia de la lluvia.

La utilización del control de potencia para reducir al mínimo la degradación de C/I debida a los efectos atmosféricos tienen posibles inconvenientes. Todas las estaciones de enlace de conexión deben utilizar el control de potencia para obtener las ventajas indicadas. Además, el control de la interferencia del medio pasa del enlace de conexión sobre el trayecto interferido al enlace de conexión sobre el trayecto interferente.

La utilización óptima del control de potencia del enlace ascendente exige mediciones precisas de la atenuación debida a la lluvia. Esto es esencial para mantener la densidad de flujo de potencia óptima en el satélite, garantizando así el funcionamiento más eficaz posible con la señal de entrada requerida. Pueden emplearse cuatro métodos, cada uno de los cuales tiene sus propias dificultades. Cuando se necesite un control de potencia del enlace ascendente, deberá adoptarse el método que mejor responda a las exigencias concretas del sistema.

En el Anexo III se describen varios métodos para realizar la compensación de lluvia en el enlace ascendente.

5.5 *Compensación de la despolarización*

La compensación de la despolarización es el ajuste rápido y automático de la polarización de las señales del enlace de conexión transmitidas por las estaciones terrenas, para mantener la polarización deseada en la antena de recepción del satélite en diversas condiciones atmosféricas. Estudios teóricos indican que la componente contrapolar de una señal con polarización circular en 18 GHz, puede mantenerse 25 dB por debajo de la componente copolar [CCIR, 1978-82g; Fromm y McEwan, 1981; Bradford University, 1981], en condiciones de cielo despejado y de lluvia (o hielo). Esta técnica puede conseguirse con poco equipo adicional en la estación de transmisión.

La compensación de la despolarización se revelaría interesante para enlaces de conexión con satélites de radiodifusión, sólo si se aplicara el control de potencia y, en ese caso, sólo para satélites coubicados. En el caso de que no se aplique el control de potencia, sólo se produciría un aumento de la interferencia para la despolarización por hielo en ausencia de atenuación por la lluvia en el trayecto interferente. Para que de ello resultase una relación C/I no satisfactoria, tendría que producirse el aumento de la interferencia simultáneamente con un desvanecimiento de la señal deseada hasta el valor del 1% del mes desfavorable. La probabilidad conjunta de que ocurran ambos eventos es inferior al 1% del mes más desfavorable.

Sólo la aplicación combinada en el enlace de conexión del control de potencia y la compensación de la despolarización proporcionará importantes mejoras de C/I para los enlaces de conexión en condiciones críticas de interferencia. Estudios realizados han revelado que estas técnicas pueden introducirse en cualquier momento solamente con disponer de una estación terrena transmisora adecuada. No hay repercusiones en el diseño del satélite [CCIR, 1978-82g; Fromm y McEwan, 1981; Bradford University, 1981]. Evidentemente los niveles de p.i.r.e. de la estación terrena necesitan por tanto elevarse durante las condiciones de propagación adversas por encima del nivel utilizado en caso de cielo despejado. Otro estudio ha demostrado la compatibilidad de esta técnica con un plan de enlaces de conexión que se base en el principio de niveles de p.i.r.e. máximos para las estaciones terrenas transmisoras de los enlaces de conexión [CCIR, 1982-86e].

5.6 *Explotación con diversidad de emplazamientos para los enlaces de conexión*

La técnica de la diversidad de emplazamiento para lograr mayor disponibilidad en los enlaces de satélite está bien documentada. En el Informe 564 se indica que la probabilidad de rebasar la atenuación simultáneamente en ambos emplazamientos es inferior a la probabilidad de rebasar la misma atenuación en uno de los emplazamientos por un factor que disminuya al aumentar la distancia entre emplazamientos 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. 15 para atenuaciones de hasta 10 dB y una separación de emplazamientos de hasta 25 km, sobre la base de una distribución logarítmica normal de células de lluvia [Strickland, 1974]. Debe señalarse que, para cualquier distancia dada entre diversos emplazamientos, 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 emplazamientos sobre C/N_u y C/I_u contrapolar.

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 emplazamiento 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. 15 indica que, en estas condiciones de caso más desfavorable, la utilización de diversidad de emplazamientos 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 emplazamientos (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 emplazamientos 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 emplazamientos 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.

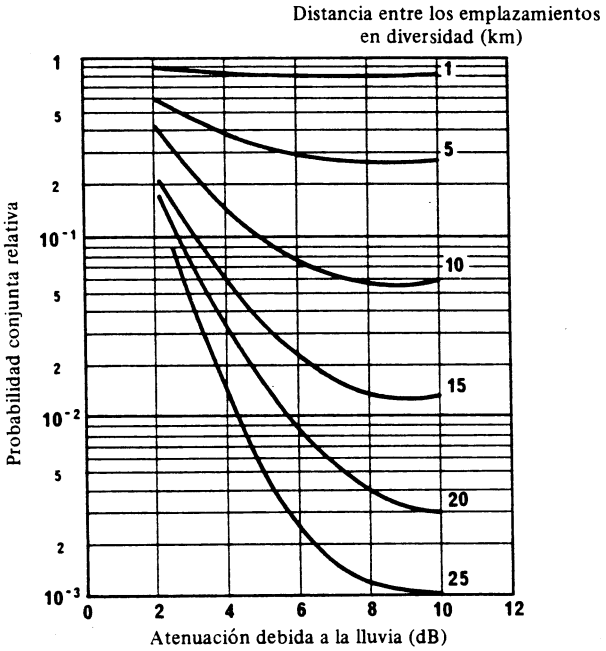


FIGURA 15 – *Probabilidad conjunta relativa de la diversidad de emplazamientos en función de la atenuación debida a la lluvia y de la distancia entre los emplazamientos en diversidad*

La utilización de la diversidad de emplazamientos sólo puede aumentar la disponiblidad 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 emplazamientos en la realización de los enlaces de conexión.

Si bien el uso de la diversidad de emplazamientos puede compensar eficazmente los efectos de la lluvia y de la despolarización, los costos y la complejidad de las estaciones con diversidad de emplazamientos 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.

6. Características de las antenas receptoras de satélite

Las características de las antenas receptoras de satélite dependen, en gran medida, del tipo de servicio de radiodifusión por satélite previsto. La antena receptora puede utilizarse de muchos modos diferentes según sea el sistema empleado. Entre esos modos pueden mencionarse los siguientes: apertura fija distinta, apertura orientable distinta, alimentadores separados con apertura común y alimentadores compartidos con apertura común.

En el Informe 558, se dan indicaciones sobre el diseño de antenas de satélite, y en el Informe 555 se dan más detalles sobre el aspecto de la polarización.

El Informe 558 trata de los métodos de conformación del haz, y el Informe 810 de los progresos realizados en materia de tecnología de antenas para reducir los niveles de radiación fuera de la zona de servicio deseada.

6.1 *Empleo de la misma antena para el enlace de conexión y el enlace descendente*

Desde el punto de vista del costo, la complejidad y el peso de la nave espacial, sería ventajoso utilizar una antena común transmisora/receptora. En tal caso, la ganancia contrapolar, anchura del haz, precisión de puntería y diagrama de radiación se ajustarían a las características de la antena para el enlace descendente. En el caso de que no se superpongan las zonas de servicio del enlace de conexión y del enlace descendente, pueden aplicarse los diagramas de referencia de la CAMR-RS-77, indicados en el Informe 810, para haces no conformados de sección transversal circular o elíptica, excepto para una degradación de la característica de polarización cruzada. Para haces conformados, se aplicaría el nuevo diagrama posible.

Cuando se utilizan haces conformados para zonas de servicio del enlace de conexión y del enlace descendente superpuestas, los alimentadores de recepción del enlace de conexión coinciden geométricamente con los grupos de alimentadores del enlace descendente, siendo necesario compartir los alimentadores. Hay escasez de datos sobre la calidad de funcionamiento de la antena en una extensa gama de frecuencias, por ejemplo, entre 12 y 18 GHz. Los problemas principales serán la característica de polarización cruzada y el control de los lóbulos laterales. La calidad de funcionamiento del enlace de conexión depende de manera crítica de que haya un valor alto de la discriminación por polarización cruzada. Deberá tenerse cuidado al diseñar la antena del satélite para evitar una degradación de 3 a 5 dB de la característica de polarización cruzada.

De conformidad con los Informes 558 y 810, debe tenerse en cuenta que una configuración de antena determinada puede optimizarse más fácilmente cuando se utiliza una sola banda de frecuencias. Si se utiliza una sola antena para el enlace de conexión y el enlace descendente y las bandas de frecuencias están en la relación 1,5 : 1, la ganancia mínima resultante es unos 0,5 dB inferior al valor óptimo que puede lograrse dentro de la zona de servicio empleando antenas separadas.

6.2 *Empleo de antenas separadas para el enlace de conexión y el enlace descendente*

El uso de antenas receptoras separadas ofrecería mayor flexibilidad en términos de independencia de la frecuencia del enlace de conexión, la polarización y la zona de servicio.

Una antena de enlace de conexión distinta, de apertura fija, es una duplicación exacta de la antena del enlace descendente, de ahí que su característica deba ser idéntica y puedan aplicarse los mismos diagramas si se diseñan las dos con el mismo cuidado.

Puede ser deseable que un número considerable de pequeñas estaciones fijas o transportables de enlace de conexión funcionen desde una zona de servicio de enlace de conexión más pequeña, igual o incluso mayor que la zona de servicio del enlace descendente. En tal caso, sería útil emplear una antena receptora de satélite separada y orientable. Por ejemplo, para la simplificación de su diseño, la antena podría ser pequeña, por ejemplo 1,5 m de diámetro, y mecánicamente orientable. Sin embargo, podría degradarse la característica de lóbulos laterales y de polarización cruzada debido a la interferencia causada por los alimentadores y la estructura soporte en caso de utilizarse un alimentador de foco primario. Debido al aislamiento necesario del enlace de conexión, es importante utilizar alimentadores descentrados para evitar la degradación de la característica de lóbulos laterales y la discriminación por polarización cruzada hasta unos 25 dB.

6.3 *Tamaño de antena y abertura angular del haz*

La abertura angular del haz de la antena receptora del satélite la determinan principalmente las ubicaciones de las estaciones terrenas para los enlaces de conexión. En un caso extremo puede existir una sola estación terrena fija, la mayoría de las veces ubicada cerca del centro de la zona de servicio, y, en algunos casos, fuera de ella. En el caso contrario extremo, puede existir un número considerable de pequeñas estaciones para enlaces de conexión, fijas o transportables, que funcionen desde cualquier punto situado dentro de la zona de servicio del satélite de radiodifusión o, incluso, en algunos casos, fuera de la zona de servicio del enlace descendente.

Cuando existe una sola estación terrena o cuando las ubicaciones de estación terrena están limitadas a una pequeña región geográfica, un estudio general realizado en Francia para la Región 1 [CCIR, 1978-82h] ha mostrado que sería muy provechoso desde el punto de vista de la interferencia utilizar antenas de satélite de haz estrecho (como por ejemplo, un haz de 0,6°). La utilización de tales antenas tendería también a reducir la p.i.r.e. de la estación terrena al aumentar el factor de calidad G/T del satélite. Las antenas orientables de haz estrecho pueden también ser útiles para reducir la interferencia y acrecentar la G/T del satélite.

Cuando existe una serie de estaciones terrenas para enlaces de conexión que proporcionan conexiones simultáneas a partir de ubicaciones situadas en todas las zonas de servicio, o incluso fuera de la zona de servicio del enlace descendente, como puede ser el caso en los sistemas de satélite de múltiples haces para la radiodifusión de programas nacionales desde ubicaciones dentro de un país, pueden identificarse dos casos:

- si el acceso ha de proporcionarse desde una sola o algunas ubicaciones conocidas, puede planificarse una pequeña zona de servicio servida por una pequeña antena receptora de satélite de haz puntual;
- si no se conocen los emplazamientos de los transmisores nacionales antes de la elaboración del plan o si se desea el acceso desde cualquier parte dentro del país, por ejemplo, para terminales transportables, es necesario planificar una zona de servicio de enlace de conexión de cobertura nacional.

La gama de interés de la ganancia de la antena receptora del satélite en el límite de −3 dB de la zona de cobertura varía desde unos 28 dBi, para un amplio haz de enlace de conexión que cubra todo el país (de 3° × 8°), hasta 45 dBi, para un pequeño haz puntual de 0,6° de diámetro.

6.4 *Precisión de puntería de la antena*

De conformidad con las Actas Finales de la CAMR-RS-77, la precisión de puntería de la antena transmisora del satélite debe situarse dentro de 0,1°. La precisión de puntería es también importante para las antenas receptoras, en particular, para las de haces estrechos.

Un estudio efectuado en Francia [CCIR, 1978-82h] proporciona una indicación cuantitativa del efecto que tendría el aumentar la tolerancia de puntería de la antena receptora del satélite de 0,1° a 0,2°. Dicho estudio indica que, al menos para el Plan de la CAMR-RS-77 y suponiendo que la posición de cada estación terrena de los enlaces de conexión corresponda al centro del haz previsto en el Plan de la CAMR-RS-77, el aumento indicado del error de puntería no agravaría apreciablemente la situación de interferencia.

Cuando se utiliza una sola antena para la transmisión y la recepción, esta precisión de puntería de 0,1° para la antena receptora se rige por el Reglamento de Radiocomunicaciones y es la indicada más arriba. Cuando se emplean dos reflectores separados para transmisión y recepción, una solución consiste en articular los reflectores con relación al cuerpo del satélite y orientar la antena transmisora por medio de un mecanismo de puntería automática que funcione por detección de una radiobaliza terrestre de radiofrecuencia. Con este sistema preciso de puntería de antena, un reflector de antena transmisora puede estabilizarse dentro de 0,1°.

La precisión de puntería de 0,2° mencionada puede lograrse utilizando señales del sistema de control de la antena transmisora descrito más arriba [CCIR, 1978-82i].

Sin embargo, a medida que se aumentan las tolerancias de error de puntería es necesario utilizar antenas de diámetro más reducido (es decir, de haz de dimensiones más grandes) para garantizar la cobertura de la zona de servicio, lo que tiene un efecto pernicioso en la reutilización de frecuencias.

El Informe 558 trata del efecto de la precisión de puntería sobre la variación de la ganancia dentro de una zona de servicio dada.

Se considera que pueden lograrse fácilmente, y utilizarse para fines de planificación, precisiones de puntería de ± 0,1° en dirección y de ± 1° en rotación con respecto del eje del haz. Estas tolerancias serían coherentes con las sugeridas para la antena transmisora de satélite en el enlace descendente.

6.5 *Diagramas de referencia de las antenas*

Si las antenas de satélite tanto transmisoras como receptoras se basan en la misma tecnología, conviene que ambas tengan los mismos diagramas de radiación de referencia. Sin embargo, con respecto a la pureza de la polarización y los lóbulos laterales, puede admitirse una mayor tolerancia para la antena receptora. Esto ha sido demostrado por varios estudios realizados por ESA y UER [CCIR, 1978-82j], Francia [CCIR, 1978-82i] y Japón [CCIR, 1978-82k], que consideraron la interferencia en un plan de enlaces de conexión directamente derivado del Plan de la CAMR-RS-77, suponiendo las siguientes características de la antena receptora:

- los mismos diagramas de la antena establecidos por la CAMR-RS-77, para las componentes copolares y contrapolares;
- primeros lóbulos laterales de la componente copolar de mayor nivel;
- mayor componente contrapolar cerca del eje del haz.

Estos estudios muestran que en el Plan de la CAMR-RS-77 puede no haber un aumento importante de la interferencia resultante de la disminución de la componente contrapolar cerca del eje del haz a −33 dB, o incluso −30 dB, por debajo de la ganancia de la antena en el eje. Esta conclusión no es aplicable a la Región 2.

En cuanto a la componente copolar, una disminución de hasta 10 dB en la región del primer lóbulo lateral puede no aumentar significativamente la interferencia entre los enlaces de conexión en la Región 1 y en la mayoría de los enlaces de conexión en la Región 3, salvo que en determinadas posiciones orbitales de la Región 3, puede degradarse en 4,2 dB el valor más desfavorable de la relación portadora/interferencia del canal adyacente. Incluso esta degradación puede no ser importante.

En el caso de satélites coubicados que sirven a zonas de servicio comunes o adyacentes en canales adyacentes contrapolarizados, la pureza de la polarización puede ser crítica para lograr las relaciones C/I necesarias.

Cuando se ha utilizado una antena de haz conformado de atenuación rápida para la transmisión, con objeto de fomentar la reutilización de frecuencias, es posible que se necesite también una antena de haz conformado de atenuación rápida para la recepción. La reducción progresiva de la ganancia de los lóbulos laterales de la antena receptora ha de ser rápida para evitar el impacto en las separaciones de las zonas de servicio necesarias para la reutilización de frecuencias.

En el caso de la planificación de la Región 2 realizada en la CARR SAT-83, se utilizó el mismo diagrama de referencia de la antena para las antenas receptora y transmisora del satélite. Estos diagramas copolares y de contrapolarización se describen en el Informe 810.

Para las Regiones 1 y 3, la CAMR ORB-88 adoptó las características que se detallan a continuación.

6.5.1 *Antena receptora del satélite*

Si se utiliza una antena común para transmisión y recepción, la ganancia contrapolar, la anchura del haz, la precisión de puntería y el diagrama de radiación dependen de las características de la antena del enlace descendente.

Si se utilizan antenas separadas para la transmisión y la recepción, los parámetros de la antena receptora se indican en los siguientes puntos. Las antenas receptoras separadas proporcionan mayor flexibilidad en lo que respecta a la independencia de la frecuencia del enlace de conexión, la polarización y la zona de servicio.

6.5.2 *Sección transversal del haz de la antena receptora*

La planificación inicial ha de basarse en la hipótesis de haces de sección transversal elíptica o circular. Si la sección transversal del haz de la antena receptora es elíptica, la anchura del haz efectiva φ_0, es una función del ángulo de rotación entre el plano que contiene el satélite y el eje principal de la sección transversal del haz y el plano en el que se necesita la anchura del haz.

La relación entre la ganancia máxima de una antena y la anchura del haz de potencia mitad puede obtenerse de la siguiente fórmula:

$$G_m = 27\,843/ab$$

o

$$G_m(\text{dB}) = 44{,}44 - 10 \log a - 10 \log b$$

donde:

a y b son los ángulos (en grados), con vértice en el satélite, subtendidos por los ejes mayor y menor de la sección transversal elíptica del haz.

Para la planificación se adopta un valor mínimo de 0,6° para la anchura del haz de potencia mitad, excepto cuando una administración pida un valor inferior para sus propios haces.

6.5.3 *Diagrama de la referencia copolar*

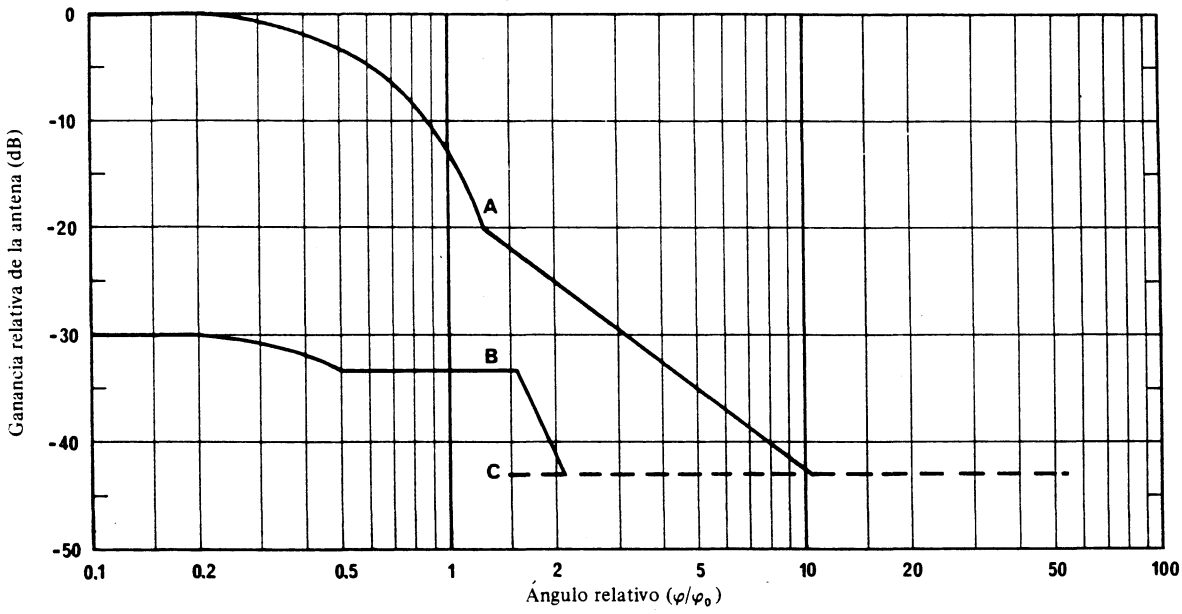
El diagrama de referencia copolar está dado por la fórmula:

Ganancia relativa copolar (dB) (véase la fig. 16, curva A)

$$G = -12\,(\varphi/\varphi_0)^2 \qquad \text{para } 0 \leqslant \varphi/\varphi_0 \leqslant 1{,}30$$

$$G = -17{,}5 - 25 \log(\varphi/\varphi_0) \qquad \text{para } \varphi/\varphi_0 > 1{,}30$$

Después de la intersección con la curva C: como la curva C (la curva C corresponde al valor opuesto de la ganancia en el eje).



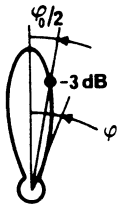


FIGURA 16 – *Diagrama de referencia de la antena receptora de satélite para las Regiones 1 y 3 adoptado por la CAMR ORB*-88

Curvas A: Componente copolar (véase el § 6.5.3)

B: Componente contrapolar (véase el § 6.5.4)

C: Valor opuesto de la ganancia en el eje (la curva C representada en esta figura corresponde al caso particular de una antena con 43 dBi de ganancia en el eje)

Nota. – Este diagrama de referencia de la antena receptora difiere del diagrama de referencia de antena transmisora de la CAMR-RS-77.

6.5.4 *Diagrama de referencia contrapolar*

El diagrama de referencia contrapolar está dado por la fórmula:

Ganancia contrapolar relativa (dB) (véase la fig. 16, curva B)

$$G = -30 - 12\,(\varphi/\varphi_0)^2 \qquad \text{para } 0 \leqslant \varphi/\varphi_0 \leqslant 0{,}5$$

$$G = -33 \qquad \text{para } 0{,}5 \leqslant \varphi/\varphi_0 \leqslant 1{,}67$$

$$G = -\left[40 + 40 \log \left|\varphi/\varphi_0 - 1\right|\right] \qquad \text{para } \varphi/\varphi_0 > 1{,}67$$

Después de la intersección con la Curva C: como la curva C (la curva C corresponde al valor opuesto de la ganancia en el eje).

6.5.5 Utilización de antenas con diagrama de caída rápida

Para reducir la interferencia copolar, se ha utilizado el diagrama de la Figura 17 para algunas asignaciones. Este diagrama procede del de una antena que produce un haz elíptico con caída rápida en el lóbulo principal. Se presentan como ejemplo tres curvas para diferentes valores de φ_o.

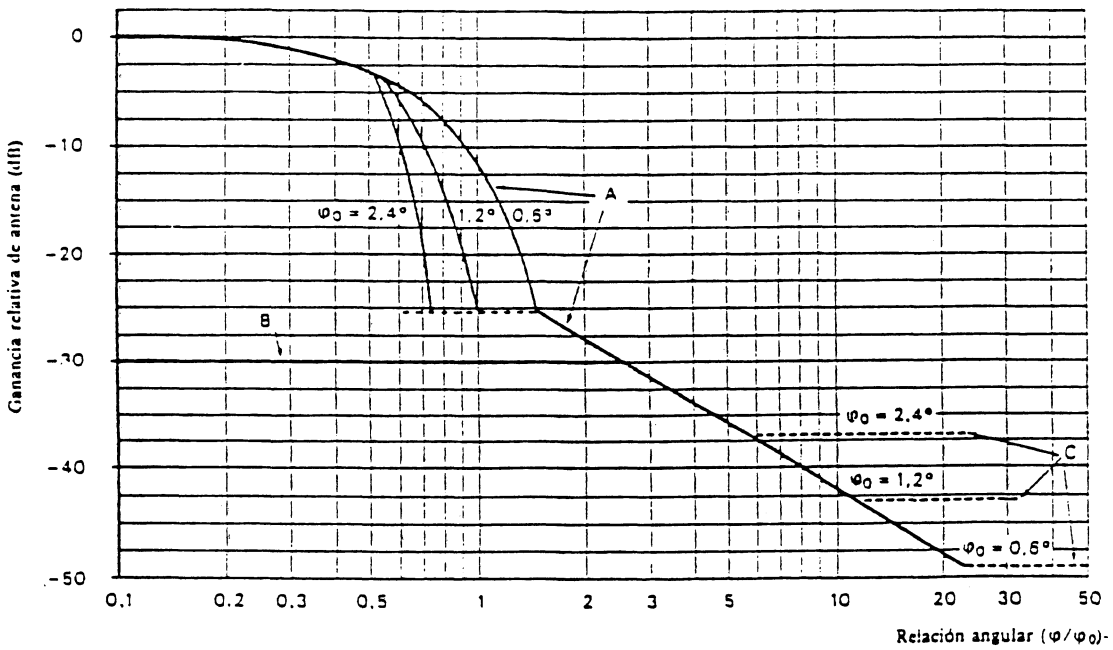


FIGURA 17

Diagramas de referencia de las componentes copolar y contrapolar de las antenas de satélite con régimen de caída rápida en el haz principal para las Regiones 1 y 3

Curva A: componente copolar (dB relativos a la ganancia del haz principal)

$-12\ (\varphi/\varphi_o)^2$	para $0 \leq \varphi/\varphi_o \leq 0{,}5$
$-33{,}33\ \varphi_o^2\ (\varphi/\varphi_o - x)^2$	para $0{,}5 < \varphi/\varphi_o \leq 0{,}87/\varphi_o + x$
$-25{,}23$	para $0{,}87/\varphi_o + x < \varphi/\varphi_o \leq 1{,}413$
$-(22 + 20 \log (\varphi/\varphi_o)$	para $\varphi/\varphi_o > 1{,}413$

después de la intersección con la curva C: como la curva C

Curva B: componente contrapolar (dB respecto a la ganancia del haz principal)

-30 para $0 \leq \varphi/\varphi_o < 2{,}51$

después de la intersección con la curva A: como la curva A

Curva C Valor opuesto de la ganancia en el eje (las curvas A y C representan ejemplos de tres antenas con diferentes valores de φ_o, como se indica en la Figura 17. Las ganancias en el eje de estas antenas son 37, 43 y 49 dBi respectivamente).

donde φ = ángulo desde el eje (grados)

φ_o = dimensión de la elipse mínima que se ajusta a la zona de servicio del enlace de conexión, en la dirección de interés (grados)

$$x = 0,5\left(1 - \frac{0,6}{\varphi_o}\right)$$

7. Control automático de ganancia (CAG)

El CAG 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 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° 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.

8. Elección de polarización para los enlaces de conexión

La elección de la polarización de los enlaces de conexión afecta:

- la posible interferencia en los enlaces de conexión que funcionan en el mismo canal o en canales adyacentes debido a la despolarización atmosférica;
- la compartición con otros servicios que funcionan en la misma banda de frecuencias;
- el diseño de los sistemas de antenas y transpondedores de los satélites

Se deben determinar dos factores:

- el tipo de polarización (circular o lineal)
- el sentido de la polarización (la misma o la opuesta a la del enlace descendente).

Al elegir la polarización del enlace de conexión habrá que considerar también la polarización del enlace descendente. El mismo *tipo* de polarización para el enlace descendente y para el enlace de conexión beneficiará normalmente la antena del satélite, permitiendo así el diseño de antenas menos complejas y de construcción más ligera.

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

Si se utiliza el mismo tipo de polarización para ambos enlaces, el interés relativo del *sentido* de polarización depende del diseño de la antena del satélite. En particular, la utilización del mismo sentido de polarización resulta ventajosa para el diseño de las antenas del vehículo espacial con haces especialmente conformados, que utilizan alimentadores múltiples en un solo reflector, y ha sido adoptada en el Plan de la Región 2. No obstante, la responsabilidad de proporcionar el aislamiento entre la entrada y la salida del transpondedor recae por entero en la selectividad de frecuencia. Por otra parte, el uso de polarización de sentido opuesto posibilita la utilización de un solo alimentador simple en un reflector común para los haces de conformación elíptica o circular, como se supone en ciertas propuestas para los planes de enlaces descendentes de las Regiones 1 y 3. En la polarización circular, el alimentador se conecta mediante un polarizador a un acoplador de modo ortogonal para separar los trayectos de transmisión y de recepción, lo que permite un aislamiento adicional de normalmente 30 dB, facilitando así los requisitos de filtrado del transpondedor. En los estudios de planificación realizados para la Región 1, se ha adoptado generalmente este último enfoque.

En lo que respecta al efecto sobre la compartición con otros servicios, tendrán importancia los lóbulos laterales de abertura angular relativamente grande y los diagramas de radiaciones copolar y contrapolar de la antena de la estación terrena que se situarán al mismo nivel aproximadamente con independencia del tipo de polarización. Por tanto, la elección de la polarización producirá poca diferencia en la interferencia a los servicios terrenales y al servicio fijo por satélite en el sentido espacio-Tierra.

Para una separación entre satélites superior a unos 10°, no es necesario especificar el tipo y/o el sentido de polarización para fines de planificación.

La interferencia del enlace de conexión es más crítica entre satélites coubicados o en ubicaciones vecinas que prestan servicio a la misma zona o a zonas de cobertura adyacentes, lo que hace de la discriminación por polarización cruzada un parámetro clave para la planificación de los enlaces de conexión. Las antenas con polarización lineal tienen un grado de discriminación por polarización cruzada mejor que las antenas con polarización circular. En el cuadro V se indican valores típicos de la discriminación por polarización cruzada (*XPD*).

CUADRO V – *Características de la discriminación contrapolar, XPD (dB) para antenas de enlace de conexión*

Tipo de polarización	Antena	
	Estación terrena transmisora	Estación receptora de satélite
Lineal	35	33
Circular	30	27

El modelo de lluvias del CCIR (véase el Informe 564) predice una diferencia muy pequeña entre la atenuación de la señal con polarización vertical y la señal con polarización horizontal para pequeños valores de la atenuación, y una diferencia que aumenta hasta 1,5 dB aproximadamente para una atenuación de 15 dB. El modelo predice también que la atenuación de las ondas polarizadas circularmente es la media entre la atenuación de las componentes de polarización vertical y de polarización horizontal, y que la despolarización contrapolar de las polarizaciones vertical y horizontal verdaderas puede ser hasta 15 dB mejor que la correspondiente a la polarización circular (véase el Informe 814).

8.1 *Lluvia en un emplazamiento*

En la fig. 18 se ilustra el efecto de la falta de alineación, β_T, en la relación C/I contrapolar de los enlaces de conexión, en el caso de que llueva sólo en el emplazamiento deseado. Los canales contrapolares se utilizan por el mismo satélite u otro satélite coubicado que da servicio a una zona de cobertura adyacente. Si las zonas de cobertura se superponen mucho, los canales con contrapolarización podrían experimentar un grado de interferencia superior en 3 dB al indicado en la fig. 18. La figura muestra que en condiciones de cielo despejado y en condiciones de lluvia, la polarización circular ofrece una relación C/I mejor para cualquier desalineación superior a unos 3°. Se ilustra este caso para valores de la atenuación de hasta 15 dB. El efecto del ángulo de inclinación en la degradación de C/I con polarización lineal durante la lluvia es pequeño, como indica el comportamiento similar de las polarizaciones vertical y la horizontal. Ello es debido a que la señal interferente no está atenuada o despolarizada.

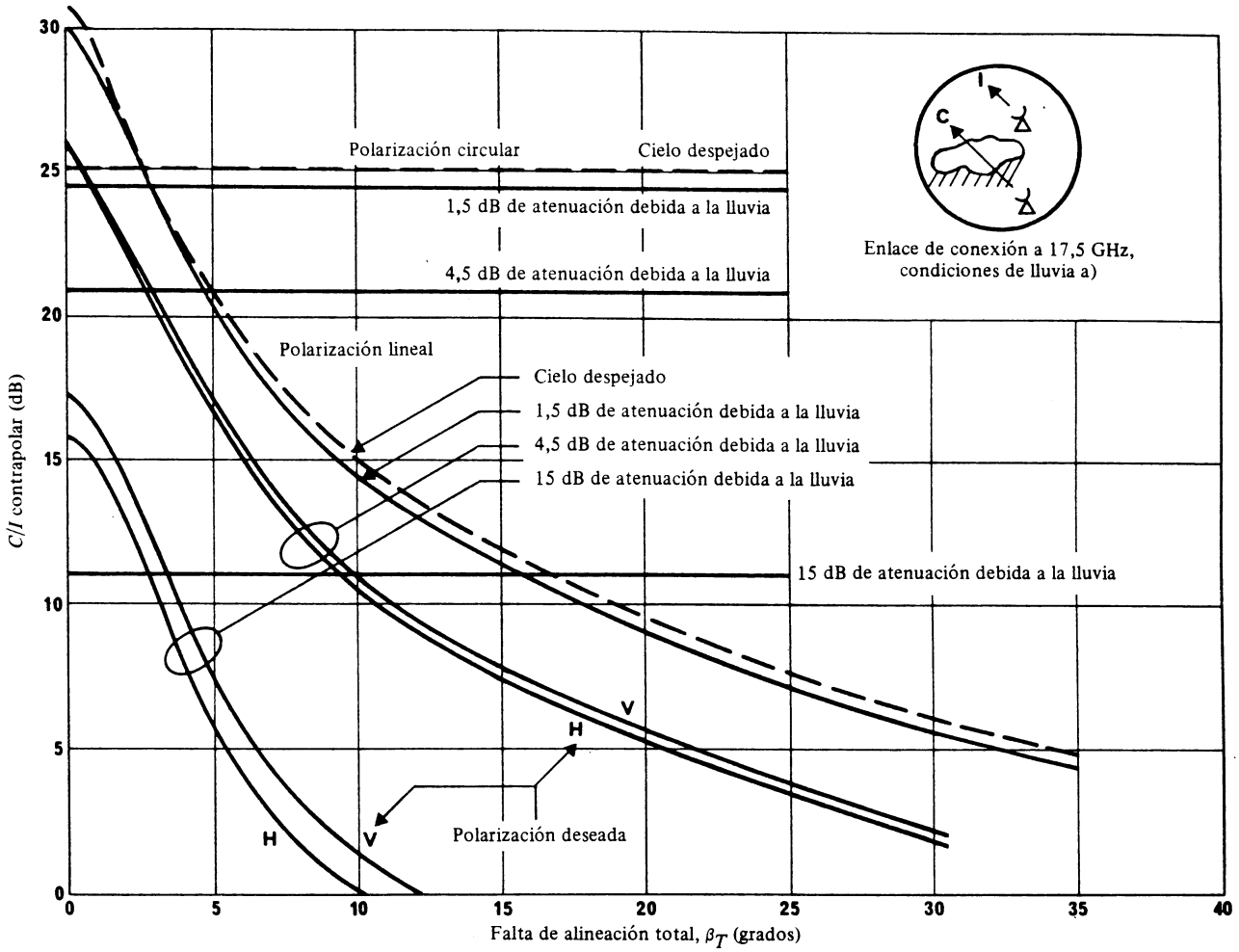


FIGURA 18 – *C/I contrapolar de enlaces de conexión en presencia de lluvia en el emplazamiento deseado únicamente*

— — — Cielo despejado

——— Con atenuación

8.2 *Lluvia en ambos emplazamientos*

Cuando llueve en los emplazamientos de los transmisores deseado e interferente, los efectos combinados de la lluvia y de la falta de alineación en la relación C/I se complican por la contribución de la despolarización de la señal interferente. Estas condiciones de lluvia son aplicables a dos estaciones terrenas de enlace de conexión próximas que transmiten canales con contrapolarización al mismo satélite o a satélites coubicados. En la fig. 19 se ilustra el efecto de la desalineación y de los ángulos de inclinación en la polarización lineal para una atenuación de 4,5 dB; y en la fig. 20 para una atenuación de 15 dB (véase también el anexo del Informe 814).

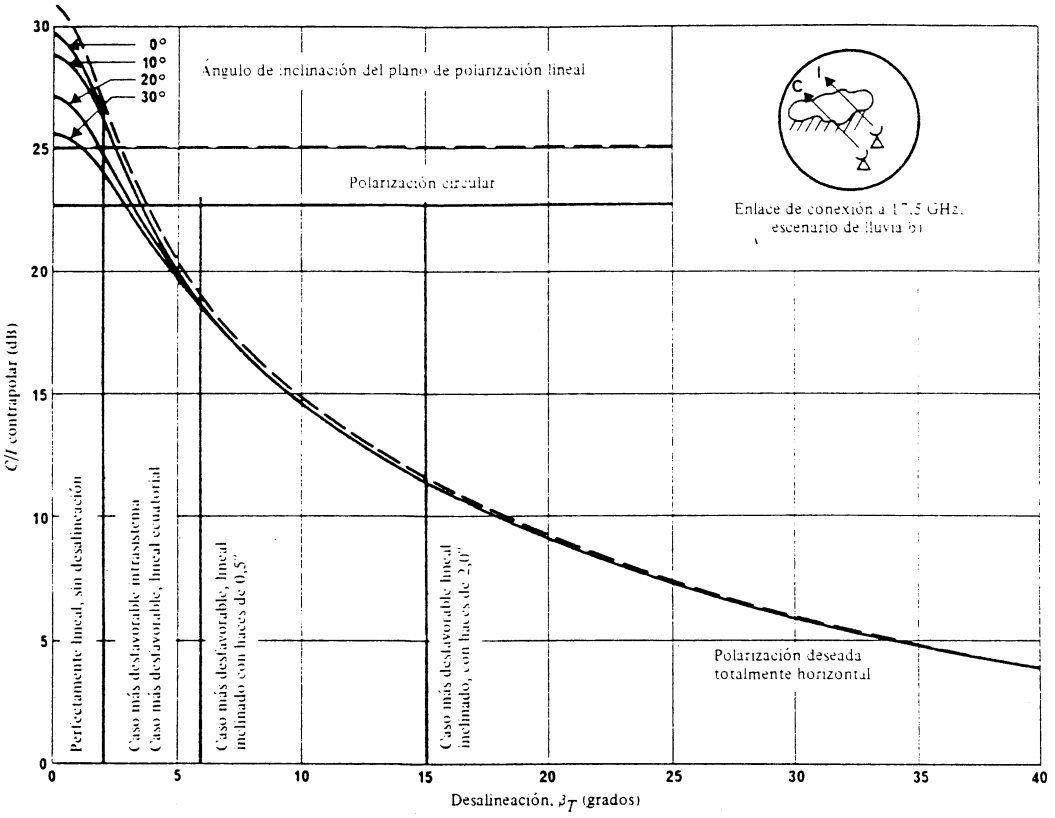


FIGURA 19 – *C/I contrapolar de enlaces de conexión en presencia de atenuación debida a la lluvia de 4,5 dB en los emplazamientos próximos de las estaciones deseada e interferente*

— — — Cielo despejado

——— 4,5 dB de atenuación debida a la lluvia

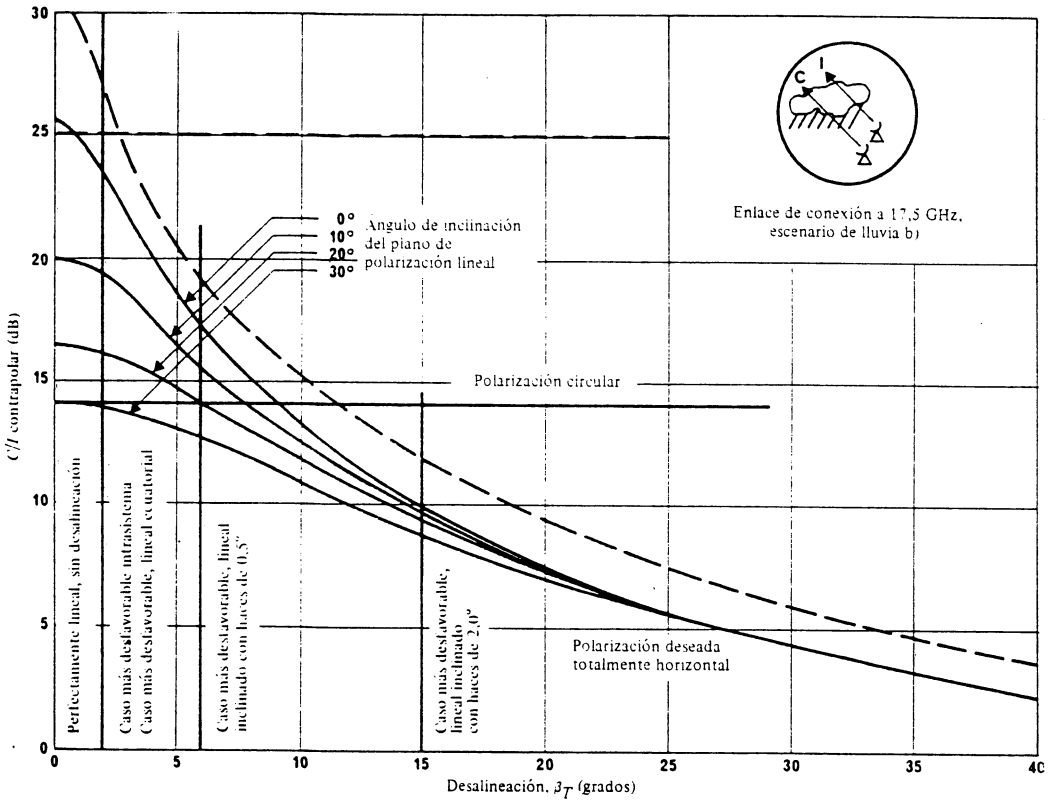


FIGURA 20 – *C/I contrapolar de enlaces de conexión en presencia de atenuación debida a la lluvia de 15 dB en los emplazamientos próximos de las estaciones deseada e interferente*

— — — Cielo despejado

——— 15 dB de atenuación debida a la lluvia

8.3 *Desalineación*

La discriminación contrapolar (*XPD*) de la polarización circular (*PC*) es independiente de la alineación rotacional de los polarizadores de las antenas transmisora y receptora y de la orientación de los vectores locales horizontal y vertical. Con la polarización lineal (*PL*) puede obtenerse una *XPD* mejor que con la *PC*, aunque sólo si la alineación rotacional de las antenas trasmisora y receptora con *PL* se mantiene dentro de un margen de 2°, y el ángulo de inclinación del plano de polarización de la antena transmisora es inferior a 20°.

Para zonas de servicio del enlace de conexión de hasta varios cientos de kilómetros de diámetro y ángulos de elevación del satélite de hasta 60° (intervalos de eclipses tardíos y/o zonas de servicio no ecuatoriales), la variación del ángulo de inclinación a través de cada una de esas zonas de servicio no rebasa unos 20°. Para semejantes zonas de servicio, el vector *PL* local vertical (u horizontal) podría definirse en el centro de la zona, o desplazarse algo hacia una subzona de precipitaciones más intensas. La alineación rotacional de la polarización de cada antena transmisora de enlace de conexión dentro de la zona de servicio podría ajustarse, de conformidad con la ecuación del anexo I al Informe 814, de modo que se logre la colinealidad con la antena receptora del servicio de radiodifusión por satélite. Esta alineación podría mantenerse en ± 0,5° en el suelo. La tolerancia de rotación de la antena del satélite es de ± 1,0°. Podría reducirse más esta tolerancia, en caso necesario, mediante técnicas de seguimiento de polarización en el satélite.

Para zonas de servicio más extensas (por ejemplo, los territorios contiguos de los Estados Unidos de América), dentro de las cuales el ángulo de inclinación tiene una variación de muchas decenas de grados, el ángulo de inclinación de 20° podría rebasarse. El concepto de polarización lineal «progresiva» [Ohm, 1981], provee la base teórica para una antena receptora de satélite de enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite no sujeta a esa limitación del ángulo de inclinación. Ahora bien, mientras no se haya demostrado con éxito el funcionamiento de una antena de satélite basada en ese concepto, no conviene utilizarlo para la planificación de un servicio de radiodifusión por satélite. Podría obtenerse mecánicamente la misma ventaja del sistema utilizando en el satélite una antena receptora orientable de haz muy estrecho (por ejemplo, 0,5°) con su vector de polarización girado para que sea colineal con el vector local horizontal (o vertical) de las antenas transmisoras de enlace de conexión orientadas hacia cualquier posición visible desde el satélite.

Tanto el método con *PL* progresiva como el método de polarización del anexo I al Informe 814 proveerían una *XPD* adecuada dentro de una zona de servicio servida por su grupo de satélites. Para zonas de servicio contiguas o superpuestas sólo la antena del satélite con *PL* progresiva (ya sea mecánica o eléctrica) permitiría que una antena transmisora de enlace de conexión ubicada en el límite de la zona de servicio común estuviera adecuadamente alineada vista desde ambos grupos de satélites. No obstante, como se ha indicado en el § 4.1 para antenas transmisoras de enlace de conexión de 5 m de diámetro, existe ya un aislamiento adecuado (contrapolar o copolar) entre grupos de satélites con separación de 10° como mínimo.

9. Consideraciones generales relativas a la planificación

La planificación de los enlaces de conexión puede efectuarse simultáneamente con la planificación de los enlaces descendentes o realizarse por separado en una fecha ulterior. En el Informe 633 se examina la planificación simultánea. En la presente sección se trata de algunas características de la planificación de los enlaces de conexión que deben tomarse en cuenta en cualquiera de los dos casos.

9.1 *Frecuencias de los enlaces de conexión*

En general, para un tamaño dado de antena, cuanto más alta es la frecuencia, más direccional es la antena receptora del satélite y menor es la interferencia. Sin embargo, los efectos de la propagación, incluida la despolarización, serán más intensos en las frecuencias más altas. Según los estudios efectuados en el Japón [CCIR, 1978-82l], en lo que respecta a la relación portadora/interferencia más desfavorable, existe poca diferencia entre los dos sistemas de enlace de conexión que utilizan las bandas de frecuencias en 14 GHz y 17 GHz.

9.2 *Emplazamiento y tamaño de la antena*

En la planificación de los enlaces de conexión a satélites de radiodifusión, deben tomarse en consideración los requisitos de explotación del servicio de radiodifusión por satélite. La posibilidad de transmitir directamente un programa de televisión a un satélite de radiodifusión, a partir de ubicaciones en las que no hay medios prácticos de transmisión de la señal a la estación terrena transmisora permanente, tiene una importancia especialmente grande en el caso de zonas de servicio amplias o montañosas. En este sentido debe estudiarse el empleo de estaciones terrenas relativamente pequeñas y transportables para los enlaces de conexión a los satélites de radiodifusión.

En los países pequeños, los sistemas de radiodifusión por satélite pueden tener un solo haz de enlaces de conexión y descendente. Es posible que se quiera tener acceso al sistema de satélite desde uno o algunos emplazamientos o desde cualquier punto del país. Si las ubicaciones se conocen antes que se elabore el plan, pueden planificarse zonas de servicio del enlace de conexión más pequeñas que la zona de servicio del enlace descendente y puede equiparse el satélite con una antena receptora de haz puntual. Si no se conoce el emplazamiento de las estaciones terrenas antes de la elaboración del plan, y si se desea el acceso desde cualquier parte dentro de la zona de servicio del enlace descendente utilizando pequeños terminales transportables, es necesario planificar una zona de servicio del enlace de conexión de cobertura nacional.

Las condiciones geográficas (por ejemplo, zonas horarias) de un país y/o la diversidad cultural de su población pueden imponer la necesidad de un enlace descendente de haces múltiples. En este caso, la antena del enlace de conexión para cada haz puede estar situada dentro de cada zona de servicio del enlace descendente respectivo, en emplazamientos específicos dentro del país, o situadas en cualquier parte dentro del país. Si se desea emplazar la estación terrena solamente dentro de cada zona de servicio del enlace descendente respectivo, pueden planificarse las zonas de servicio del enlace de conexión y del enlace descendente de modo que coincidan. Sin embargo, puede ser necesario distribuir por sistemas terrestres o por sistemas del servicio fijo por satélite los programas provenientes de puntos fuera de las zonas de servicio del enlace descendente, para su radiodifusión dentro de la zona de servicio del enlace descendente.

Si se desea situar la estación terrena en cualquier parte dentro de un país servido por varios haces, el acceso directo al satélite de radiodifusión puede lograrse con la planificación de la zona de servicio del enlace de conexión de cobertura nacional. Los programas que se originen fuera de la zona de servicio del enlace descendente tendrían acceso directamente al satélite de radiodifusión utilizando las bandas de frecuencia del enlace de conexión planificado.

La planificación de los enlaces de conexión basada en un tamaño determinado de estaciones terrenas y en un valor de la potencia máxima de transmisión, favorecería una mayor homogeneidad entre enlaces de conexión. Para un determinado tamaño de la antena y una relación de protección dada, existe una separación orbital por encima de la cual la interferencia de estaciones de enlace de conexión no deseadas es insignificante y no se tiene en cuenta en la planificación de los enlaces de conexión. A título de ejemplo, para una antena de 5 m de diámetro y una envolvente de lóbulos laterales que satisfaga el diagrama de referencia de $29 - 25 \log \varphi$ (dBi), se requiere una separación mínima entre satélites de 7,5° para obtener un aislamiento de 40 dB en presencia de una atenuación diferencial debida a la lluvia de 10 dB, para permitir la reutilización de frecuencias. En este ejemplo, están aseguradas las transmisiones copolares y no se considera ninguna discriminación de la antena de recepción del satélite, estando situada la estación del enlace de conexión en la misma zona de servicio.

En el caso de que las dos transmisiones cocanal sean contrapolares, la separación orbital requerida es menor, ya que parte del aislamiento de 40 dB es proporcionado por la discriminación por polarización de la antena de la estación terrena transmisora y de la antena receptora del satélite. Análogamente, si las zonas de servicio de los enlaces de conexión no son adyacentes, la antena receptora del satélite puede proporcionar una parte de la relación de protección de 40 dB gracias a la separación angular. En consecuencia, puede reducirse la separación orbital necesaria hasta el punto de que los satélites estén casi coubicados.

En el caso de interferencia del canal adyacente, la separación orbital necesaria se reduce aún más en comparación con los casos mencionados más arriba, puesto que el aislamiento requerido en este caso es típicamente inferior en 16 dB. En el § 9.4 se examina un caso particular en el que la separación orbital requerida para canales adyacentes de polarización cruzada transmitidos desde la misma zona de servicio con un desvanecimiento debido a la lluvia de 10 dB es tan sólo una fracción de grado. Este concepto fue ampliamente utilizado en la planificación de los enlaces de conexión en la Región 2.

Dado el tamaño relativamente mayor de las antenas de transmisión de las estaciones terrenas, en condiciones normales se logrará el aislamiento requerido de los enlaces de conexión mediante separaciones orbitales y/o separaciones de las zonas de servicio menores que las requeridas para los enlaces descendentes, excepto para el caso en que la zona de servicio del enlace de conexión es mayor que la zona de servicio del enlace descendente correspondiente o cae fuera de ésta.

En los planes de enlaces de conexión para las Regiones 1 y 3 y para la Región 2, se consideró conveniente un diámetro de antena nominal de 5 m y se utilizó en la planificación. Además de desacoplar totalmente los enlaces de conexión de satélites con una separación de unos 10°, se demostró que una antena de 5 m cabía dentro de la gama de dimensiones que cabe aplicar en estaciones transportables. Además, puede lograrse fácilmente la potencia transmitida requerida para un enlace de conexión viable. En los Planes se admitió el uso de antenas más pequeñas, de hasta un diámetro mínimo de unos 2,5 m, y se tuvieron en cuenta al desarrollar el diagrama de referencia (véase el § 5.2), con el objeto de que su utilización no aumentara el nivel de interferencia a otros enlaces de conexión calculado en los Planes. En satélites con una separación superior a 0,55°, la utilización de antenas de 2,5 m no puede producir interferencia adicional. Sin embargo, es evidente que con la utilización de estas antenas más pequeñas se obtienen valores inferiores de la C/N y la C/I que con el tamaño de antena utilizado como base para la planificación.

9.3 *Potencia transmitida*

Con objeto de evitar un grado excesivo de interferencia en los satélites adyacentes y en los servicios terrenales y debido a que las envolventes de lóbulos laterales fuera del eje de la antena del enlace de conexión se definen en términos de la ganancia absoluta referida a una fuente isotrópica, así como también para simplificar la planificación de enlaces de conexión, la aplicación de una potencia máxima admisible a la antena de un enlace de conexión de un satélite de radiodifusión constituye el método más adecuado de especificar las características de interferencia de la estación transmisora del enlace de conexión junto con el diagrama de referencia de la antena. Este límite máximo de potencia se aplicaría a todas las condiciones y tamaños de la antena.

Otra ventaja de fijar un límite a la potencia de transmisión del enlace de conexión reside en que, si la planificación se hace con un tamaño nominal de antena, se aplica el principio de densidad de flujo de potencia homogénea en la órbita, lo que permite la mejor utilización del recurso órbita-espectro. Conviene advertir no obstante que la inhomogeneidad de la p.i.r.e. depende únicamente de la diferencia de potencia transmitida, y no de la ganancia de antena, cuando los satélites están separados por más de una fracción de grado.

9.4 *Satélites coubicados*

Los casos más críticos de interferencia entre enlaces de conexión se presentan con los satélites coubicados. Como se ha visto en el § 4.6, existen dos situaciones en la práctica:

- los satélites coubicados utilizan el mismo canal, pero tienen polarizaciones cruzadas y sus zonas de servicio están separadas, y
- los satélites coubicados tienen zonas de servicio comunes o adyacentes y operan en canales adyacentes con polarización cruzada.

Existen varios métodos para contrarrestar las bajas relaciones C/I, pero todos tienen algún inconveniente. La diversidad de emplazamientos combinada con una p.i.r.e. del enlace de conexión uniforme puede utilizarse con un costo elevado y poca flexibilidad operacional. Podría aceptarse una degradación de la característica de interferencia para los pequeños porcentajes de tiempo correspondientes a elevadas pérdidas por precipitación. El control de potencia combinada con compensación de despolarización es una posible solución, pero estas técnicas aún no han llegado a un nivel adecuado de desarrollo.

Cuando los canales son adyacentes, existen otros varios métodos que podrían utilizarse. Podría aumentarse la separación entre canales a costa de un menor número total de canales de televisión. Podrían reducirse las anchuras de banda de cada canal, pero con repercusión negativa en aplicaciones tales como la televisión de alta definición, que requiere una gran anchura de banda.

Otra solución para reducir la interferencia sería separar los satélites «coubicados» en un pequeño arco orbital. Este método se adoptó para elaborar el Plan de enlaces de conexión para la Región 2, y se describe más adelante.

Otros factores que es preciso considerar cuando los satélites están coubicados son la probabilidad de colisión y la interferencia potencial de los enlaces del servicio de operaciones del vehículo espacial.

9.4.1 *Agrupaciones de satélites y reducción de la interferencia*

Un grupo de satélites, tal como se define en la CARR SAT-83 en el Plan para la Región 2 está formado por los satélites situados en dos posiciones orbitales separadas por no más de 0,4° en el Plan y que tienen asignados canales adyacentes con polarización cruzada en cada una de las dos posiciones orbitales. Como quiera que existen otros métodos para combatir la interferencia de enlace de conexión entre primeros canales adyacentes con polarización cruzada, se consideró necesario contar con una flexibilidad significativa para fijar la posición orbital de los satélites a la hora de la realización práctica. En el Plan de la Región 2, los satélites de un mismo grupo pueden encontrarse en cualquier posición dentro del grupo de 0,4° de anchura, previo acuerdo de las demás administraciones que comparten ese grupo de satélites. En estas condiciones, la separación orbital óptima entre los satélites puede elegirse en el momento de la realización práctica y depende:

- de la zona hidrometeorológica,
- del ángulo de elevación,
- del diámetro de la antena de la estación terrena y
- de la diversidad de emplazamientos.

La CARR SAT-83 adoptó una separación mínima de 0,9° entre los centros de los grupos de satélites comprendidos en el Plan.

9.4.2 *Probabilidad de colisión*

Otra ventaja más de separar los satélites «coubicados» es que se reduce la probabilidad de colisiones. Valiéndose del método de cálculo indicado en [Hechler y Van der Ha, 1980], la probabilidad de colisiones anuales aumentará de 9×10^{-7} a 5×10^{-5} cuando aumente de 2 a 12 el número de satélites con sendas secciones transversales de 100 m^2 que compartan el mismo arco de 0,1°. Si bien seguiría habiendo un 99% de probabilidades de que no se produzca ninguna colisión en unos 200 años, la probabilidad de que haya alguna colisión en la órbita de los satélites geoestacionarios aumentaría de manera importante si los satélites fuesen coubicados exactamente en muchas posiciones de la órbita. De ocurrir una colisión, los fragmentos secundarios acrecentarían considerablemente la probabilidad de que se produzcan otras colisiones más. Quizá sea por ello preferible reducir al mínimo el riesgo de colisiones separando ligeramente a los satélites «coubicados».

9.4.3 *Interferencia causada a los enlaces del servicio de operaciones de los vehículos espaciales*

Una pequeña separación orbital entre satélites puede utilizarse también para mantener el nivel de interferencia causada a los canales de telemedida, telemando y seguimiento (TTS) de los satélites a un nivel aceptablemente bajo.

La separación de frecuencias entre el borde del canal de televisión del extremo de la banda y el canal TTS más próximo será del orden de 2 MHz y se supone que la pendiente de caída de la emisión por satélite del filtro del canal de televisión será de 2 dB por MHz, en la hipótesis de filtrado típico.

El aislamiento entre el canal de televisión del extremo de la banda y los canales TTS que asegura el filtro del canal de televisión puede ser de 4 dB como mínimo y de unos 23 dB como máximo en el caso de bandas de guarda de 12 MHz. La transmisión de canales TTS con polarización opuesta a la del canal de televisión del extremo de la banda aumentaría el aislamiento entre 25 y 44 dB en condiciones de cielo despejado y entre 15 y 34 dB si la atenuación causada por la lluvia en el trayecto deseado fuera de 10 dB. La separación nominal de los satélites coubicados aumentaría el aislamiento y daría mayor flexibilidad en la elección de la polarización de los canales TTS.

9.4.4 Método para resolver incompatibilidades en el plan de enlaces de conexión

Después de planificar los enlaces de conexión, pueden quedar ciertos casos de incompatibilidad. Después de la coordinación, las administraciones interesadas podrían utilizar los medios mencionados a continuación para resolver estas situaciones. La estación interferente podría transmitir con una potencia inferior al valor nominal en condiciones de cielo despejado, manteniendo una calidad suficiente y un nivel de interferencia aceptable. En el caso de atenuación debida a la lluvia, la estación interferente podría aumentar su p.i.r.e., lo cual podría disminuir la relación C/I en el enlace afectado por la interferencia, aunque no por debajo de los límites indicados en el plan.

9.5 *Traslación de frecuencias*

Para la Región 2, el Plan de enlaces de conexión se ha basado en el uso de una sola traslación de frecuencias entre los canales de los enlaces de conexión en 17 GHz y los canales de los enlaces descendentes en 12 GHz.

La CAMR-ORB(88) aceptó, en general, para las Regiones 1 y 3, el principio de una sola frecuencia de traslación, (5 600 MHz) para la banda 17,3 - 18,1 GHz, excepto para los casos en los que era necesario solucionar incompatibilidades en el Plan.

Dado que la anchura de banda máxima disponible para la banda de enlaces de conexión de 14,5 - 14,8 GHz es de tan sólo 300 MHz, en comparación con los 800 y los 500 MHz del Plan de enlaces descendentes de las Regiones 1 y 3, respectivamente, si se usan varias frecuencias de traslación, permitirían utilizar cualquiera de los canales del Plan. Por consiguiente, se asignó simultáneamente un determinado canal de enlaces de conexión a varios canales del plan del Servicio de Radiodifusión por Satélite (SRS).

Para la banda de enlaces de conexión 14,5-14,8 GHz se supondrán 14 canales y dos bandas de guarda adecuados.

La selección de frecuencias de traslación para este fin y esta banda es una tarea compleja, a causa de dos factores existentes en la posible gama de frecuencias de traslación que podrían crear productos de mezcla no esenciales en ciertos canales. Por lo tanto, es necesario optimizar las frecuencias de traslación. Las relaciones entre las frecuencias de traslación y cualquier otra frecuencia que se encuentre dentro de la anchura de banda necesaria de un canal de enlaces de conexión que han de evitarse son 1/6 y 2/11.

Se utilizarán los siguientes parámetros para la planificación de enlaces de conexión en la banda de frecuencias 14,5-14,8 GHz:

Anchura de banda necesaria de un canal:	27 MHz
Separación entre canales:	19,18 MHz
Número de canales:	14
Frecuencia central del canal más bajo (1):	14 525,30 MHz
Frecuencia central del canal más alto (14):	14 774,64 MHz
Banda de guarda inferior:	11,80 MHz
Banda de guarda superior:	11,86 MHz

Frecuencias de traslación:

a) para los canales SRS 1 a 14	2797,82 MHz
b) para los canales SRS 15 a 28	2529,30 MHz
c) para los canales SRS 29 a 40	2260,78 MHz

En el cuadro IV se indican los números de canal y las frecuencias correspondientes asignadas a los enlaces de conexión y las que el Plan CAMR-RS-77 de las Regiones 1 y 3 asigna para las tres frecuencias de traslación.

CUADRO VI – *Cuadro indicativo de la correspondencia entre los números de canal y las frecuencias asignadas para los enlaces de conexión en la banda de frecuencias 14,5-14,8 GHz y su relación con las asignaciones del Plan SRS para las Regiones 1 y 3*

Asignaciones para enlaces de conexión		Frecuencias de traslación (MHz)					
		2 797,82		2 529,30		2 260,78	
		Asignaciones del Plan SRS para las Regiones 1 y 3					
N.° del canal	Frecuencia (MHz)	N.° del canal	Frecuencia (MHz)	N.° del canal	Frecuencia (MHz)	N.° del canal	Frecuencia (MHz)
1	14 525,30	1	11 727,48	15	11 996,00	29	12 264,52
2	14 544,48	2	11 746,66	16	12 015,18	30	12 283,70
3	14 563,66	3	11 765,84	17	12 034,36	31	12 302,88
4	14 582,84	4	11 785,02	18	12 053,54	32	12 322,06
5	14 602,02	5	11 804,20	19	12 072,72	33	12 341,24
6	14 621,20	6	11 823,38	20	12 091,90	34	12 360,42
7	14 640,38	7	11 842,56	21	12 111,08	35	12 379,60
8	14 659,56	8	11 861,74	22	12 130,26	36	12 398,78
9	14 678,74	9	11 880,92	23	12 149,44	37	12 417,96
10	14 697,92	10	11 900,10	24	12 168,62	38	12 437,14
11	14 717,10	11	11 919,28	25	12 187,80	39	12 456,32
12	14 736,28	12	11 938,46	26	12 206,98	40	12 475,50
13	14 755,46	13	11 957,64	27	12 226,16	–	–
14	14 774,64	14	11 976,82	28	12 245,34	–	–

9.6 *Anchura de banda total necesaria para los enlaces de conexión*

Los valores derivados de los estudios para la relación de anchura de banda entre el enlace de conexión y el enlace descendente varían de 1 : 1 a 1,5 : 1, dependiendo de las características supuestas del enlace de conexión [CCIR, 1978-82m]. No son convenientes los valores inferiores a 1 : 1, principalmente porque entrañan la utilización de repetidores de tratamiento de señales en el satélite, haciéndolo más complejo, costoso y más propenso a fallos.

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

9.7 *Independencia entre posiciones orbitales en el Plan de las Regiones 1 y 3*

Estudios efectuados en Francia [CCIR, 1978-82n, o] han mostrado que, con una separación de 6° en las Regiones 1 y 3, puede efectuarse independientemente la planificación para cada posición orbital con la alternancia de la polarización de una posición orbital a la contigua, y de un canal al siguiente, adoptando las siguientes hipótesis:

- diámetro de la antena de las estaciones terrenas: 3 m como mínimo;
- diagrama y aberturas angulares de las antenas receptora y transmisora del satélite, las mismas que se indican en el Plan de la CAMR-RS-77;
- relaciones de protección: cocanal 40 dB; canales adyacentes 24 dB;
- traslación de frecuencias como en el Plan de la CAMR-RS-77;
- la densidad de flujo de potencia en el satélite es esencialmente la misma;
- discriminación por polarización de 30 dB en los lóbulos laterales;
- la posición de cada estación terrena se encuentra en el centro del haz del enlace descendente correspondiente;
- la despolarización producida por la lluvia se tomará igual a −20 dB.

Se necesitan estudios adicionales sobre otras hipótesis de planificación para las Regiones 1 y 3.

9.8 *Consideraciones relativas a la zona de servicio y efecto sobre la reutilización de frecuencias*

Como se ha indicado más arriba, existen varios motivos por los que puede ser ventajoso considerar una zona de servicio del enlace de conexión que pueda ser distinta de la zona o las zonas de servicio del enlace descendente correspondiente. Desde el punto de vista de la interferencia es útil estrechar los haces del enlace de conexión situados cerca de los respectivos centros de los correspondientes enlaces descendentes [CCIR, 1978-82h]. Sin embargo, esa situación puede limitar la flexibilidad operacional. En ciertas circunstancias, los requisitos operacionales pueden obligar a un acceso simultáneo a varios satélites situados en distintas posiciones o a varios haces del enlace descendente a partir de la misma posición orbital. Las transmisiones de los enlaces de conexión pueden proceder de una sola posición, que puede hallarse o no en una de las zonas del enlace descendente, o proceder de cualquier punto situado dentro de algunas de las zonas del enlace descendente [Bouchard, 1982]. Esto se aplicaría, por ejemplo, a un país grande o a una agrupación de administraciones que necesariamente deben disponer de múltiples haces para el enlace descendente. En esta última situación, la posibilidad de reutilización de una adjudicación de frecuencias no debe hallarse limitada por el plan de enlaces de conexión si se establecen criterios técnicos para la protección contra la interferencia de enlaces de conexión.

La capacidad de reutilización de frecuencias puede expresarse en términos de la separación orbital requerida entre los satélites de los sistemas interferentes en función de la separación entre las zonas de servicios respectivos para las cuatro combinaciones de cocanal y canales adyacentes y copolaridad y polaridad cruzada. En el caso de países grandes que están servidos por varios haces de enlace descendente adyacentes y donde hay demandas de acceso en todo el país a cada uno de esos haces, la reutilización de frecuencias puede hallarse limitada cuando las dimensiones de la zona de servicio del enlace de conexión son significativamente mayores que las dimensiones de cualquiera de los haces descendente en determinadas condiciones de:

- separación orbital,
- diámetro de antena de la estación terrena del enlace de conexión,
- inhomogeneidades entre los enlaces de conexión,
- relación de protección del enlace de conexión [CCIR, 1978-82p].

Sin embargo, siempre pueden elegirse valores apropiados de tales parámetros para tener la seguridad de que la capacidad de reutilización de frecuencias de los enlaces de conexión es por lo menos igual o mayor a la del enlace descendente.

Por consiguiente, se necesita un método de planificación integrado para los enlaces de conexión y los enlaces descendentes a fin de apoyar la planificación de una zona de servicio de enlace de conexión que sea distinta de la zona de servicio del enlace descendente. La planificación simultánea de los enlaces de conexión y los enlaces descendentes en la CARR SAT-83 hace factible ese método. En el Canadá se efectuó un estudio en el que se daban por supuestos los siguientes parámetros técnicos:

- diagrama de referencia de lóbulos laterales de la antena transmisora del enlace de conexión: $(32 - 25 \log \varphi)$ (dB);
- diagrama de radiación de la antena receptora del satélite: es el dado en las Actas Finales de la CAMR-RS-77 para la antena transmisora del satélite;
- relaciones de protección del enlace de conexión: se hallan comprendidas entre 35 y 45 dB;
- relación de protección del enlace descendente: 35 dB con una sola fuente de interferencia;
- anchura de banda del canal: 18 MHz;
- separación de canales: 13 a 17 MHz.

En el supuesto de un diámetro de antena transmisora de 8 m para enlaces de conexión que tienen inhomogeneidades entre sistemas de 8 dB, una relación de protección en el mismo canal de 40 dB y una relación de protección en el canal adyacente de 20 dB, el estudio ha mostrado que es factible la planificación de las zonas de servicio del enlace de conexión en todo el país siempre que el satélite de haces múltiples de grandes países y los satélites de sus países vecinos estén:

- separados por más de 6° cuando las adjudicaciones de copolaridad en el mismo canal están destinadas a enlaces de conexión procedentes de cualquier punto situado dentro de los países;
- separados por más de 1° cuando las adjudicaciones de copolaridad en canales adyacentes o de polarización cruzada en el mismo canal estén destinadas a enlaces de conexión procedentes de cualquier punto situado dentro de los países.

Tales conclusiones se aplican a las antenas receptoras de satélites de todo el país y a las antenas receptoras de satélite de haces puntuales orientables.

10. Compartición en las bandas de los enlaces de conexión

10.1 *Consideraciones generales*

Como resultado de las atribuciones de bandas de referencias adoptadas por la CAMR-79, la utilización de las bandas de frecuencias que figuran en el § 2 de este Informe por el servicio fijo por satélite (Tierra-espacio) se limita a los enlaces de conexión con los satélites de radiodifusión (notas 835, 863 y 869 del Reglamento de Radiocomunicaciones).

El asunto de la compartición de frecuencias entre los enlaces de conexión de los satélites de radiodifusión y otros servicios se examina también en el Informe 561.

La banda 17,3-18,1 GHz es una de las bandas escogidas por la CAMR ORB-85 para planificar los enlaces de conexión en las Regiones 1 y 3. La parte inferior de dicha banda, 17,3-17,8 GHz ha sido planificada para los enlaces de conexión de la Región 2 (CARR SAT-83). En este punto figura información sobre las diversas situaciones de compartición que se darán en la porción 17,7-18,1 GHz de esta banda. Se producirán situaciones de compartición, con la consiguiente posibilidad de interferencia, entre los enlaces de conexión con satélites de radiodifusión, el Servicio Fijo (SF) y el Servicio Fijo por Satélite (SFS) en todas las Regiones [CCIR, 1982-86f].

En las Comisiones de Estudio 4 y 9 se están examinando algunos casos de compartición.

10.2 *Situaciones de compartición en la banda 17,7-18,1 GHz*

Las situaciones de compartición que se darán en el segmento de banda comprendido entre 17,7 y 18,1 GHz aparecen en la fig. 20. Como las atribuciones a esos tres servicios son de orden mundial, hay posibilidad de interferencia entre los enlaces de conexión del servicio de radiodifusión por satélite y los servicios fijo y fijo por satélite en todas las Regiones. En los puntos siguientes se examinarán la magnitud de la interferencia y las técnicas para reducir ésta en el caso de cada una de las situaciones indicadas en la fig. 21.

10.2.1 *Interferencia causada por transmisores de estaciones espaciales del servicio fijo por satélite a receptores de estaciones espaciales del servicio de radiodifusión por satélite*

Este tipo de interferencia puede revestir dos formas (casos 1A y 1B de la fig. 20). Una es la producida por los lóbulos laterales de la antena transmisora de la estación espacial del servicio fijo por satélite en los lóbulos laterales de la antena receptora de la estación espacial del servicio de radiodifusión por satélite que ocupe una posición próxima. Otra es la producida por el haz principal de la antena transmisora de la estación espacial del servicio fijo por satélite en el haz principal de la antena receptora de una estación espacial del servicio de radiodifusión por satélite que ocupe una posición casi antipodal.

10.2.1.1 *Estaciones espaciales de los servicios fijo por satélite y de radiodifusión por satélite que ocupan posiciones muy próximas (caso 1A)*

La interferencia causada por una estación espacial del servicio fijo por satélite a una estación espacial próxima del servicio de radiodifusión por satélite será desdeñable, a menos que ambos satélites estén muy cerca el uno del otro, debido a que la interferencia se transmitirá y recibirá en los lóbulos laterales lejanos de ambas antenas. Las pequeñas separaciones entre satélites del orden de 0,1°, esto es, de unos 74 km, proporcionan una atenuación de la señal (pérdida en el espacio) suficiente para reducir la interferencia a niveles despreciables.

10.2.1.2 *Estaciones espaciales de los servicios fijo por satélite y de radiodifusión por satélite que ocupan una posición casi antipodal (caso 1B)*

Si dos estaciones espaciales del servicio fijo por satélite y del servicio de radiodifusión por satélite ocupan una posición casi antipodal, podría haber interferencia en casos raros. Normalmente, la presencia de los satélites del servicio de radiodifusión habría de imponer una restricción despreciable a la ubicación de los satélites del servicio fijo. Sin embargo, quizá haya que tomar ciertas precauciones cuando la separación entre los satélites sea del orden de 160 a 162,5°.

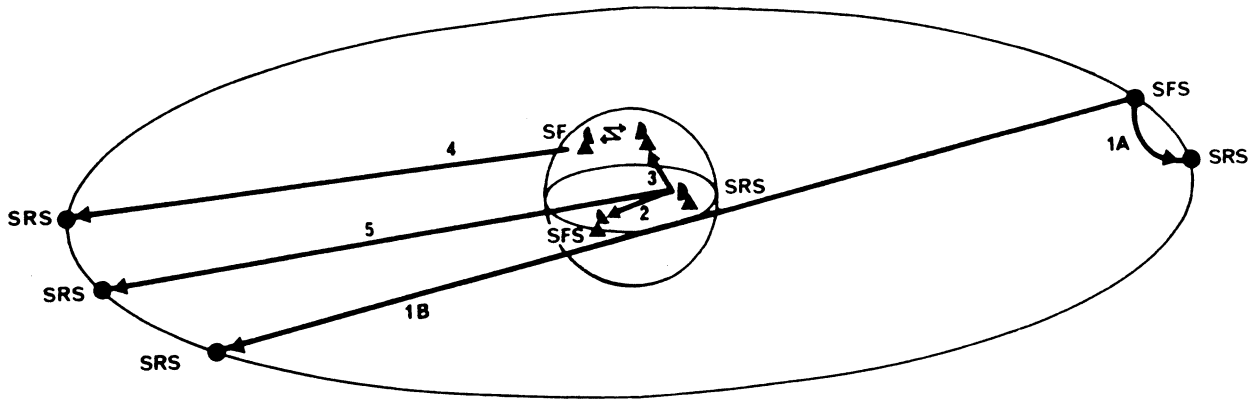


FIGURA 21

Caso	*De*	*A*	*Comentarios*
1A	SFS (espacio-Tierra)	Satélite próximo del SRS	Pequeñas separaciones entre satélites reducirán la interferencia a niveles admisibles
1B	SFS (espacio-Tierra)	Satélite antipodal del SRS	Situación rara; apéndice 29 del RR (aumento del 10% en ΔT para la Región 2)
2	Enlace de conexión del SRS	Estación terrena receptora del SFS	Procedimiento de coordinación del tipo del apéndice 28 del RR
3	Enlace de conexión del SRS	Receptor del SF	Coordinación del tipo del apéndice 28 del RR
4	Transmisor del SF	Receptor del satélite del SRS	Situación rara, pero véase la Recomendación N.° 4 (CARR SAT-83)
5	Enlace de conexión del SRS en una Región	Receptor del satélite del SRS en otra Región	Coordinación del tipo del apéndice 29 del RR (aumento del 10% en ΔT para la Región 2)

10.2.1.3 *Casos 1A y 1B en la Región 2*

La CARR SAT-83 (parte II, anexo 4, primer párrafo de las Actas Finales) aplicó a esta situación el apéndice 29 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), pero modificó el criterio que hace necesaria la coordinación con un aumento del 10% en ΔT. En el caso de satélites casi antipodales, sólo se necesita la coordinación del apéndice 29 cuando la DFP en el limbo de la Tierra rebasa -123 dB(W/(m^2 · 24 MHz)), y la separación de satélites geocéntricos es superior a 150°.

10.2.2 *Interferencia causada por un transmisor del enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite a una estación terrena receptora del servicio fijo por satélite*

Puede haber interferencia causada por un transmisor del enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite (en el sentido Tierra-espacio de la transmisión) al receptor de una estación terrena del servicio fijo por satélite (que emplee el mismo segmento de banda de frecuencia en el sentido espacio-Tierra de la transmisión) (caso 2, fig. 21). La magnitud de la interferencia potencial puede determinarse utilizando una adaptación de procedimientos de cálculo de la interferencia descritos en los Informes 557, 448, 388 y 382. La probabilidad y el nivel de las interferencias pueden reducirse a valores admisibles separando ambas estaciones o ubicándolas de modo que haya una protección suficiente del terreno o mediante barreras artificiales.

La CARR SAT-83 aplicó a esta situación la coordinación del apéndice 28 (Actas Finales, parte II, anexo 4, § 3), modificada para tener en cuenta las características de la estación terrena y las condiciones de propagación en este segmento de la banda.

10.2.3 *Interferencia causada por un transmisor del enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite a un receptor del servicio fijo*

Las transmisiones del enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite pueden causar interferencia al receptor de una estación terrenal del servicio fijo (caso 3, fig. 21).

La determinación de la zona de coordinación alrededor de la estación terrena transmisora del enlace de conexión y de los receptores del servicio fijo, donde esos contornos existen en distintos países, debe basarse en el apéndice 28 del RR. En el Informe 382 se determina un procedimiento conexo, pero no idéntico, que refleja los datos de propagación más recientes, aunque en algunos casos provisionales, de los Informes 724, 563 y 569. Para calcular el nivel de interferencia previsto, pueden también utilizarse en esta situación los métodos de cálculo de la interferencia más detallados descritos en los ya mencionados Informes 448 y 388. Al igual que en la precedente situación, la interferencia puede reducirse a niveles admisibles mediante una separación física adecuada de las estaciones o el recurso a una protección natural o artificial. En la parte II, anexo 1, tercer párrafo de las Actas Finales de la CARR SAT-83 se confirma que dicho apéndice 28 proporciona el método para determinar si una estación terrenal puede resultar afectada.

10.2.4 *Interferencia causada por un transmisor del servicio fijo al receptor de una estación espacial del servicio de radiodifusión por satélite*

En ciertos casos raros, las transmisiones de una estación terrenal del servicio fijo pueden causar interferencia al receptor de una estación espacial del servicio de radiodifusión por satélite (caso 4, fig. 21). Al igual que en la situación de interferencia descrita en el § 10.2.1.2, la antena receptora de la estación espacial del servicio de radiodifusión por satélite debe tener una ganancia considerable en la dirección del limbo de la Tierra. En último extremo, puede haber muchas estaciones terrenales en el segmento de banda comprendido entre 17,7 y 18,1 GHz, y lo típico es que sus antenas estén apuntadas a un grado más o menos del horizonte. Por consiguiente, en este caso puede haber más situaciones de interferencia potencial que en el de los satélites antipodales que se describió en el § 10.2.1.2. Sin embargo, sólo habrá interferencia si la estación del servicio fijo emplea la p.i.r.e. máxima admisible de 55 dBW en la dirección de la órbita de los satélites geoestacionarios y utiliza anchuras de banda de transmisión no mucho mayores que las utilizadas por el enlace de conexión del servicio de radiodifusión por satélite. Habida cuenta de los planes típicos de disposición de canales para el servicio fijo en esta banda, y de los valores de p.i.r.e. actualmente en uso, se considera que esta situación de interferencia se dará rara vez. Sin embargo, la CARR SAT-83 adoptó la Recomendación N.° 4, en que se pide al CCIR que siga estudiando esta situación con carácter de urgencia con el fin de considerarla en la CAMR ORB-85.

10.2.5 *Interferencia causada por las estaciones de los enlaces de conexión del servicio de radiodifusión por satélite de una Región a los receptores de satélite del mismo servicio en otra Región*

Las transmisiones por los enlaces de conexión de una Región pueden causar interferencia a los receptores de estaciones espaciales de satélites de radiodifusión de otra Región (caso 5, fig. 21). Elaborando los respectivos planes regionales y modificando los procedimientos contenidos en cada uno de ellos puede limitarse o impedirse la interferencia dentro de una Región. La parte II, anexo 4, segundo párrafo de las Actas Finales de la CARR SAT-83 aplica el apéndice 29 para limitar la interferencia causada por enlaces de conexión de las Regiones 1 y 3 (cuya planificación se hará en la CAMR ORB) a los receptores del servicio de radiodifusión por satélite en la Región 2 que utilizan un aumento del 10% en ΔT como elemento determinante de la coordinación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUCHARD, M. [1982] Planning of feeder links for broadcasting satellites at the RARC 1983. AIAA 8th Communications Satellite Systems Conference, Orlando, Fl., Estados Unidos de América.

BRADFORD UNIVERSITY [1981] Studies on broadcast satellite feeder-link power control and forward adaptive cross-polar cancellation techniques. (Se publicará.)

BRAJAN, B., [1986]: Opca metoda za proracun sveukupne ekvivalentne zastitne marze u analizi plana za radiodifuziju posredstvom satelita (Método general para el cálculo de los márgenes de protección global equivalente en el análisis del Plan del SRS). Proceedings of ETAN, Zadar.

FROMM, H. H. y McEWAN, N. J. [mayo de 1981] Direct broadcast satellite feeder links: an example of possible implications of the Regions 1 and 3 plan for feeder links to European broadcast satellite. ITU/Canada Seminar on RARC, 1983, Ottawa, Ontario, Canadá.

HECHLER, M. y VAN DER HA, J. C. [1980] The probability of collisions on the geostationary ring. *ESA J.*, Vol. 4, 277-286.

OHM, E. A. [noviembre de 1981] Multi-fixed-beam satellite antenna with full area coverage and a rain tolerant polarization distribution. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-29, **6**, 937-943.

OHMI, K., [1985] - Power control of feeder links to broadcasting satellites considering the interference problem. Actas del 15 Simposio internacional sobre Tecnología y Ciencias Espaciales, Tokio (Japón), Vol. 1, 1011-1018.

SHELSWELL, P. [1984] Satellite Broadcasting. The performance of C-MAC in a hardware simulation of a DBS-transmission chain. BBC Research Department, Report BBC RD, 1984/9.

SHIMOSEKO, S., YAMAMOTO, M., KAJIKAWA, M. y ARAI, K. [septiembre de 1981] Satellite broadcasting experiments and in-orbit performance of BSE. IAF 32nd Congress, Roma, Italia. Documento N.° 81-75.

STRICKLAND, J. J. [1974] *J. de Recherches Atm.*, Vol. III, **1-2**.

Documentos del CCIR

[1978-82]: **a.** 10-11S/43 (Canadá); **b.**10-11S/159 (UER); **c.** 10-11S/175 (Canadá); **d.** 10-11S/151 (Francia)); **e.** 10-11S/118 (Japón); **f.** 10-11S/158 (UER); **g.** Grupo Interino de Trabajo 10-11/1-25; **h.** 10-11S/127 (Francia); **i.** 10-11S/152 (Francia); **j.** 10-11S/9 (UER); **k.** 10-11S/129 (Japón); **l.** 10-11S/21 (Japón); **m.** 10-11S/120 (Grupo Interino de Trabajo 10-11/1); **n.** 10-11S/67 (Francia); **o.** 10-11S/128 (Francia); **p.** 10-11S/148 (Canadá).

[1982-86]: **a.** 10-11S/12 (Francia); **b.** 10-11S/24 (Estados Unidos de América); **c.** 10-11S/134 (Japón); **d.** 10-11S/27 (Estados Unidos de América); **e.** 10-11S/36 (ESA); **f.** 10-11S/25 (Estados Unidos de América).

[1986-90]: a. 10-11S/105 (Japón), b. 10-11S/22 (Japón).

BIBLIOGRAFÍA

Documentos del CCIR

[1978-82]: 10-11S/123 (UER).

ANEXO I

CARACTERÍSTICAS DE LOS LÓBULOS LATERALES DE LA ANTENA TRANSMISORA DEL ENLACE DE CONEXIÓN

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

En este anexo se presentan los resultados de algunas mediciones de antenas adecuadas para enlaces de conexión con satélites de radiodifusión.

Se midió en Canadá una antena del tipo Gregorian de 8 m construida en 1979. Los resultados de medida aparecen en la fig. 22 Esta antena con polarización lineal fue optimizada para el funcionamiento en transmisión/recepción a 14/12 GHz. Se determinó que su eficacia era del 78%. Se indican resultados para tres frecuencias de cada banda (los bordes y el centro de la banda) y dos cortes acimutales (planos E y H). Esta antena, que se considera representativa de la nueva generación de antenas, satisface la envolvente de lóbulos laterales de 29 − 25 log φ. Es probable que las antenas de enlace de conexión que tengan que optimizarse para una sola banda de frecuencias cumplan también esta envolvente a 17 GHz.

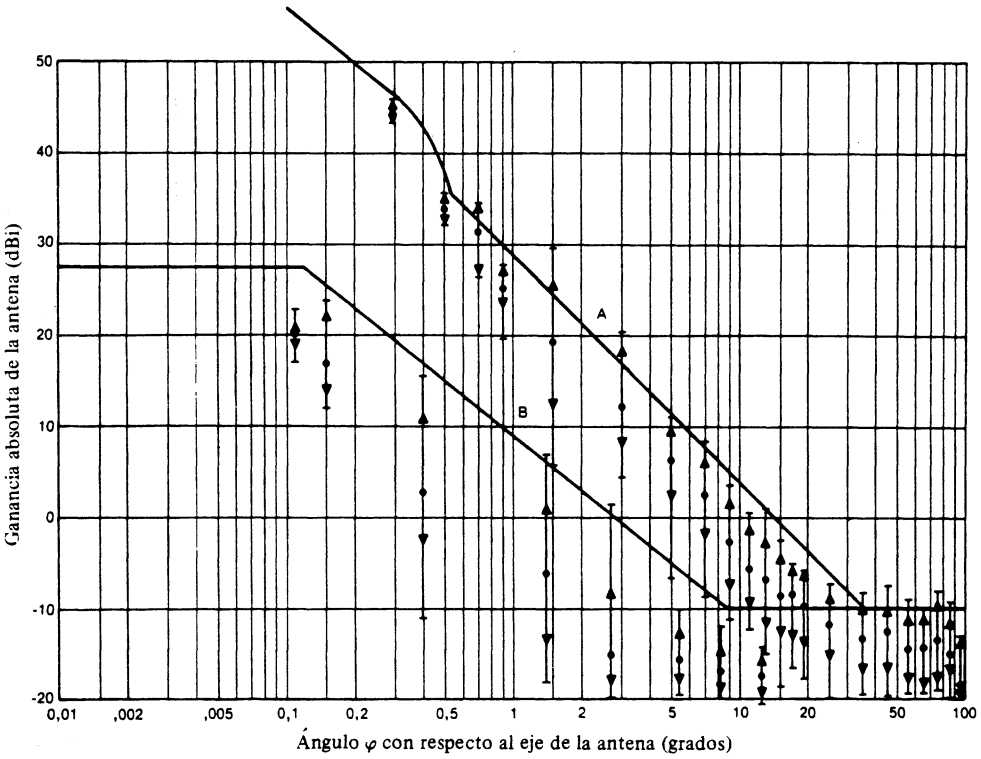


FIGURA 22 – *Diagramas copolar y contrapolar medidos en una antena Gregorian de 8 m a 14/12 GHz*

Curvas A: Componente copolar

B: Componente contrapolar

: Límite superior

: Punto del 10% superior

: Valor mediano

: Punto del 10% inferior

: Límite inferior

ANEXO II

CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES Y TÉCNICAS DE LOS ENLACES DE CONEXIÓN

1. Introducción

En la CAMR-ORB(2) celebrada en 1988 se estableció un Plan de enlaces de conexión y disposiciones asociadas para el servicio de radiodifusión por satélite de las Regiones 1 y 3. Para estudiar con mayor detalle las características técnicas de los enlaces de conexión a fin de lograr un funcionamiento óptimo, es necesario disponer de información adicional basada en las condiciones operativas reales, en particular sobre la posibilidad de superar los problemas de atenuación debida a lluvia intensa y sobre el aumento de la eficacia de las estaciones terrenas transportables.

2. Explotación de los enlaces de conexión en condiciones de lluvia

En Japón, el enlace de conexión del satélite de radiodifusión BS-2, que funciona desde 1984, opera en la banda 14,0 - 14,5 GHz. Casi todos los programas de televisión se transmiten desde la estación terrena principal, pero se utilizan estaciones terrenas transportables y secundarias para otros fines diversos.

En el Cuadro VII se indican las características técnicas y la utilización de las estaciones terrenas NHK del sistema de radiodifusión por satélite BS-2.

La estación terrena principal utiliza una antena de 8 m con una p.i.r.e. nominal de 80 dBW en condiciones de cielo despejado para obtener una relación portadora/ruido (C/N) de enlace de conexión de aproximadamente 30 dB. Cuando la atenuación debida a la lluvia en el enlace de conexión está comprendida entre 3 y 6 dB, la p.i.r.e. se aumenta en 3 dB (Paso 1), y cuando es superior a 6 dB, la p.i.r.e. se aumenta en 6 dB (Paso 2).

La estación terrena principal puede pasar en todo momento al modo de funcionamiento de reserva, en función de los datos meteorológicos y de otras informaciones procedentes de una amplia variedad de fuentes, como radares de corto y largo alcance, detectores de rayos, información pluviométrica local, información sobre las condiciones meteorológicas locales y datos obtenidos por observación directa del cielo.

En la actualidad, las estaciones terrenas secundarias están ubicadas a varios centenares de kilómetros de la estación terrena principal. Sin embargo, a fin de asegurar una explotación de reserva segura, se proyecta construir otra estación terrena a 50 km de la principal, que conectará por medio de un enlace terrenal adecuado para la transmisión de televisión.

En la Figura 23 se muestra un ejemplo de la atenuación debida a la lluvia, relativamente pequeña, que puede ser compensada mediante las operaciones de los Pasos 1 y 2.

La Figura 25 ilustra, a modo de ejemplo, una situación en la que una gran nube de tormenta, de suficiente tamaño como para oscurecer la zona aun en horas del mediodía, se acerca a la estación terrena principal y produce una precipitación medida superior a 50 mm/hora. En este caso, la atenuación debida a la lluvia alcanza valores de 20 a 30 dB.

3. Sistemas de estaciones terrenas transportables

En el sistema de radiodifusión por satélite BS-2 es cada vez más necesario utilizar estaciones terrenas pequeñas, con antenas de diámetro reducido y bajo consumo, con fines económicos y para facilitar su explotación.

El progreso tecnológico ha permitido construir antenas con lóbulos laterales de menor nivel. Se utilizan estaciones terrenas transportables con antenas de 2,5 m de diámetro y una p.i.r.e. de 74 a 77 dBW que resultan eficaces para la transmisión de diversas clases de programas de televisión. Las estaciones terrenas transportables no tienen control de potencia.

Para el futuro, se prevé que a medida que se generalice el servicio de radiodifusión por satélite, aumentará la cantidad de estaciones terrenas transportables, para atender a la creciente diversificación de los programas de televisión.

CUADRO VII

Características técnicas y aplicaciones de las estaciones terrenas de conexión del sistema de radiodifusión por satélite BS-2

Características	Estación terrena principal	Subestación terrena	Estaciones terrenas transportables	
			Tipo B	Tipo C
Diámetro de la antena (m)	8	8	2,5	2,5
p.i.r.e[1] (dBW)	86	84 u 81	77	74
Ubicación	Tokio	Osaka, Fukuoka[2] y Sapporo[3]	Tokio	Ciudades principales
Ejemplos de objetivos de transmisión[4]	A, F	B, D	C, F, E	B, C, E

Notas

*1 La p.i.r.e. de una estación terrena transportable no supera la respectiva p.i.r.e. de una estación terrena de referencia (5 m de diámetro, 1 kW) en los ángulos de 6, 12 y 18 grados con relación al eje de la antena.

*2 Ciudad importante a 1.000 km al Oeste de Tokio.

*3 Ciudad importante a 1.000 km al Norte de Tokio.

*4 La notación utilizada en esta línea es la siguiente:

A: Transmisión de programas regulares (2 canales, todo el día)
B: Transmisión de programas regulares originados en las estaciones locales principales de la NHK
C: Transmisión desde el lugar de acontecimientos especiales
D: Funcionamiento en modo de reserva
E: Noticias urgentes
F: Transmisiones experimentales de televisión de alta definición (MUSE) y otras señales.

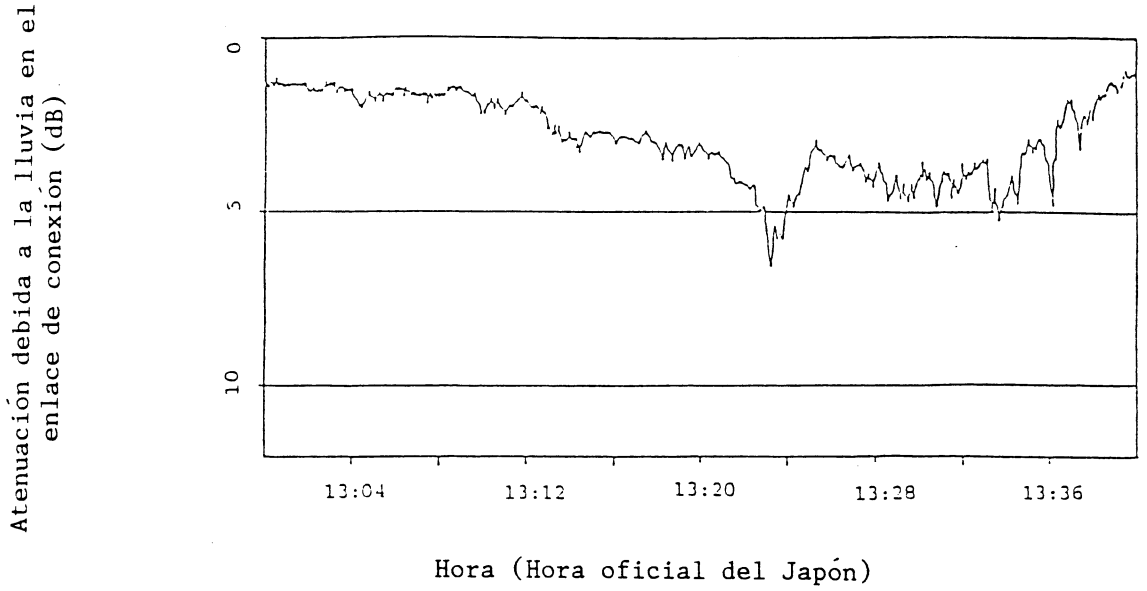


FIGURA 23

Atenuación debida a lluvia moderada en el enlace de conexión del satélite BS-2

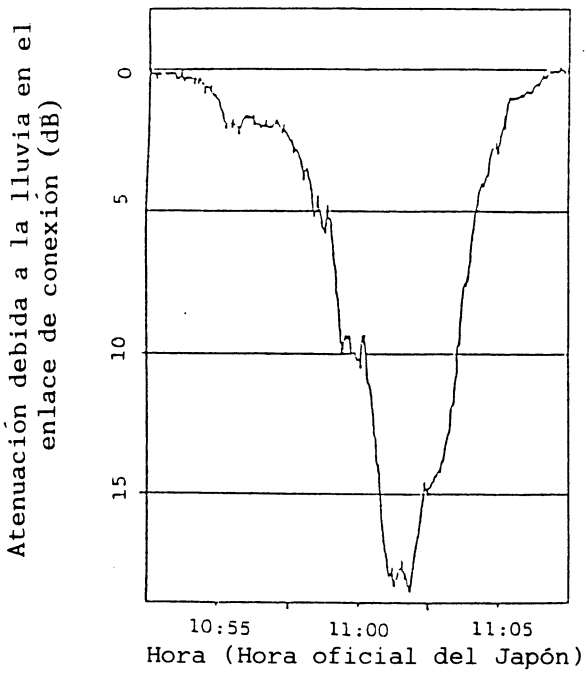


FIGURA 24

Atenuación debida a lluvia fuerte en el enlace de conexión del satélite BS-2

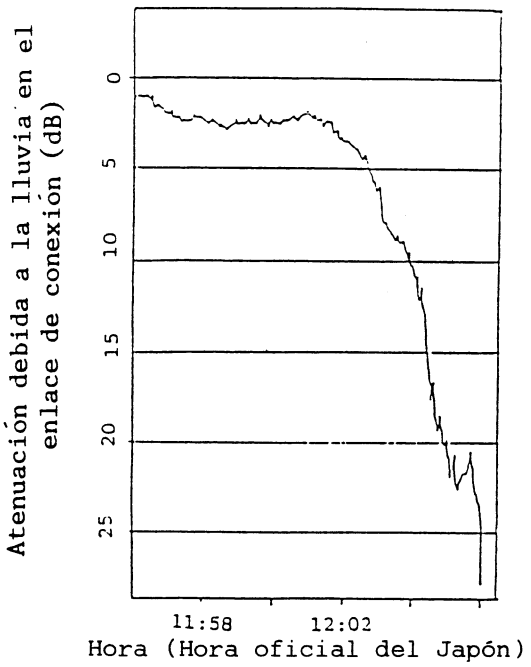


FIGURA 25

Atenuación debida a lluvia muy intensa en el enlace de conexión del satélite BS-2

ANEXO III

MÉTODOS DE CONTROL DE LA COMPENSACIÓN DE LA LLUVIA EN EL ENLACE ASCENDENTE

1. Supervisión de una baliza de satélite

El control de potencia puede ajustarse de acuerdo con la atenuación medida de la señal de una baliza de satélite. Estas señales suelen ser de baja potencia con objeto de ahorrar energía primaria en el satélite. Para recibir las señales de la baliza se utiliza un receptor de seguimiento de banda estrecha con un margen de desvanecimiento razonable.

El nivel de salida de los transmisores de baliza típicos varía a causa de los cambios de temperatura. Normalmente, la estabilidad se mantiene dentro de un margen de ±1 dB, pero esta variación puede añadir errores a los inherentes a la medición del nivel de la baliza.

2. Procesamiento en el satélite

Las mediciones del nivel de potencia recibido en el satélite o, cuando se utiliza, la tensión de control del CAG, pueden codificarse y transmitirse de vuelta a la estación terrena de origen vía un circuito de datos de baja velocidad y recibirse en un receptor de seguimiento de banda estrecha.

Este método puede tener dos inconvenientes:

- la fiabilidad del equipo de medición del segmento espacial debería ser muy grande, y tendrían que efectuarse mediciones individuales de cada uno de los enlaces de conexión recibidos. Esto añade complejidad y peso al segmento espacial, y debe evitarse en la medida de lo posible;

- deberían tenerse en cuenta las pérdidas del enlace ascendente causadas por errores de puntería en lugar de la atenuación debida a la lluvia.

3. Medición de la potencia del enlace descendente

Este método puede ser muy simple, pero tiene varios inconvenientes:

- no es seguro que el haz del enlace descendente pueda recibirse en el punto del enlace ascendente;

- dadas las características no lineales de los repetidores cerca de su punto de saturación, un pequeño error de medición podría ocasionar un error grave en la potencia del enlace ascendente, con los problemas de interferencia que ello supone;

- no sería posible utilizar CAG en el satélite.

4. Radiómetros

Se supone que existe una relación simple entre la atenuación que sufre un trayecto que lo atraviesa y el ruido térmico generado a lo largo de ese trayecto.

La precisión del radiómetro presenta deficiencias debidas a:

- las pérdidas en la línea de alimentación de la antena y un diagrama de alimentación de la antena que no es el ideal;

- el hecho de que no existe un equilibrio termodinámico en todas partes, por lo que el medio no es puramente absorbente y por ende la temperatura física de la atmósfera no es constante.

Cuando en el diagrama de la antena se integra el ruido celeste, pueden producirse errores de hasta 1 dB.