

RECOMENDACIÓN UIT-R SF.358-5*

**VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE LA DENSIDAD DE FLUJO DE POTENCIA
PRODUCIDA EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA POR SATÉLITES DEL SERVICIO FIJO
QUE COMPARTEN LAS MISMAS BANDAS DE FRECUENCIAS SUPERIORES A 1 GHz,
CON LOS SISTEMAS DE RADIOENLACES CON VISIBILIDAD DIRECTA**

(1963-1966-1974-1982-1993-1995)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los sistemas del servicio fijo por satélite (SFS) y los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa comparten ciertas bandas de frecuencias;
- b) que es necesario asegurar, por ello, que las transmisiones de los satélites no causarán interferencias perjudiciales en los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa;
- c) que los sistemas de radioenlaces pueden protegerse de manera satisfactoria contra las emisiones de los satélites, si se imponen límites adecuados a la densidad de flujo de potencia producida en la superficie de la Tierra en una banda de referencia;
- d) que no obstante, la limitación de la densidad de flujo de potencia producida en la superficie de la Tierra no debería imponer restricciones excesivas sobre el diseño de los sistemas del SFS;
- e) que en los sistemas del SFS se podría recurrir a métodos de dispersión de la energía de la portadora para reducir la densidad espectral de flujo de potencia en radiofrecuencia de las transmisiones efectuadas por satélites;
- f) que los cálculos efectuados en estudios recientes han demostrado que, cuando la frecuencia aumenta, pueden admitirse límites más elevados de flujo de potencia sin que por ello se menoscabe la debida protección de los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa,

recomienda

1 que en las bandas de frecuencias de la gama de 2,5 a 27,5 GHz, compartidas entre los sistemas del SFS y los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa, la densidad máxima de flujo de potencia producida en la superficie de la Tierra por las emisiones de un satélite, incluida la procedente de un satélite reflector, cualesquiera que sean el método y las condiciones de modulación, no exceda:

1.1 En la banda 2,5 a 2,690 GHz, en cualquier banda de 4 kHz:

-152	dB(W/m ²)	para	$\theta \leq 5^\circ$
-152 + 0,75 ($\theta - 5$)	dB(W/m ²)	para	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
-137	dB(W/m ²)	para	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

1.2 En la banda 3,4 a 7,750 GHz, en cualquier banda de 4 kHz:

-152	dB(W/m ²)	para	$\theta \leq 5^\circ$
-152 + 0,5 ($\theta - 5$)	dB(W/m ²)	para	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
-142	dB(W/m ²)	para	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

1.3 En la banda de 8,025 a 11,7 GHz, en cualquier banda de 4 kHz:

-150	dB(W/m ²)	para	$\theta \leq 5^\circ$
-150 + 0,5 ($\theta - 5$)	dB(W/m ²)	para	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
-140	dB(W/m ²)	para	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

* Las Comisiones de Estudio 4 y 9 de Radiocomunicaciones efectuaron modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

1.4 En la banda 12,2 a 12,75 GHz, en cualquier banda de 4 kHz:

-148	dB(W/m ²)	para	$\theta \leq 5^\circ$
$-148 + 0,5 (\theta - 5)$	dB(W/m ²)	para	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
-138	dB(W/m ²)	para	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

1.5 En las bandas 17,7 a 19,7 GHz, 22,55 a 23,55 GHz, 24,45 a 24,75 GHz y 25,25 a 27,5 GHz en cualquier banda de 1 MHz:

-115	dB(W/m ²)	para	$\theta \leq 5^\circ$
$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	dB(W/m ²)	para	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$
-105	dB(W/m ²)	para	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$

siendo θ el ángulo de llegada de la onda radioeléctrica medido en grados sobre el horizonte;

2 que los valores arriba mencionados se supongan referidos a las densidades de flujo de potencia y ángulos de llegada que se obtendrían en las condiciones de propagación en el espacio libre;

3 que la información contenida en el Anexo 1 se utilice como guía para la utilización de esta Recomendación.

NOTA 1 – En el Cuadro S21-4 del Artículo S21 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) se establecen los límites definitivos aplicables en las bandas de frecuencias compartidas. Se prosiguen los estudios en esta materia que, en el futuro, podrán traducirse en la modificación de dichos límites.

NOTA 2 – Con arreglo al número S21.16.4 del RR los límites de densidad de flujo de potencia en bandas comprendidas entre 17,7 y 27,5 GHz se aplicarán hasta que éstos sean modificados por una Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones competente.

NOTA 3 – La Recomendación UIT-R SF.1005 trata de los valores máximos admisibles de la densidad de flujo de potencia que deben aplicarse a las bandas de frecuencias superiores a 10 GHz y que una futura conferencia mundial de radiocomunicaciones podría atribuir bidireccionalmente al SFS en régimen de compartición con el servicio fijo.

ANEXO 1

Protección de los sistemas de radioenlaces terrenales con visibilidad directa contra las interferencias causadas por emisiones de estaciones espaciales del servicio fijo por satélite en las bandas de frecuencias compartidas entre 1 y 27,5 GHz

1 Introducción

Las emisiones de estaciones espaciales pueden causar interferencias a sistemas de radioenlaces terrenales en las bandas de frecuencias compartidas. En función del ángulo de llegada puede penetrar energía interferente por el haz principal o los lóbulos laterales de las antenas de las estaciones terrenales de los sistemas de radioenlaces.

Si bien pueden calcularse los efectos interferentes debidos a las emisiones de una determinada estación espacial en un solo sistema de radioenlaces, es prácticamente imposible calcular los efectos acumulativos de numerosas estaciones espaciales en cada uno de los múltiples sistemas de radioenlaces existentes o en proyecto. Por consiguiente, teniendo en cuenta la uniformidad en las características de los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa, se ha encontrado la forma de proteger a estos sistemas, imponiendo restricciones generales a las emisiones de las estaciones espaciales.

Estas restricciones se refieren al valor de la densidad máxima admisible de flujo de potencia, en una anchura de banda de referencia, producida en la superficie de la Tierra por las emisiones de las estaciones espaciales en las condiciones de propagación en el espacio libre.

Al determinar los valores de la densidad máxima admisible del flujo de potencia, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- los valores han de ser suficientemente bajos, de modo que no se rebasen los límites recomendados de interferencia máxima admisible a los actuales y futuros sistemas de radioenlaces terrenales que utilizan las mismas frecuencias;
- los valores han de ser suficientemente altos de modo que puedan funcionar satisfactoriamente los sistemas de radiocomunicaciones espaciales.

2 Método para determinar la densidad máxima admisible de flujo de potencia

2.1 Criterio de interferencia

Para determinar los valores de densidad máxima admisible de flujo de potencia se han utilizado los límites de interferencia máxima admisible en un canal telefónico, señalados en la Recomendación UIT-R SF.357 para los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa empleados para telefonía multicanal analógica con modulación angular. Se ha demostrado que una anchura de banda de referencia de 4 kHz es suficiente para estos sistemas, que funcionan por lo general por debajo de unos 15 GHz, teniendo en cuenta los efectos de las señales interferentes a la entrada de los receptores en las estaciones terrenales del circuito ficticio de referencia de la UIT.

Los valores máximos de interferencia admisible indicados en la Recomendación UIT-R SF.357 son adecuados para proteger tales tipos de sistemas de radioenlaces empleados para televisión.

En la Recomendación UIT-R SF.615 figuran los valores admisibles máximos de la interferencia producida por el SFS en los sistemas de radioenlaces digitales. En el § 6 se trata el efecto de los límites de la densidad de flujo de potencia en el diseño de los sistemas de radioenlaces digitales.

Habiéndose mostrado que las señales moduladas digitalmente son afectadas por la totalidad de la potencia interferente en la anchura de banda ocupada, y dado que las anchuras de banda posibles son muy probablemente de gran extensión, se ha adoptado una anchura de banda de referencia de 1 MHz.

2.2 Modelos de sistemas

Para evaluar los efectos interferentes producidos por las emisiones de estaciones espaciales en los sistemas de radioenlaces terrenales con visibilidad directa, es necesario proponer, teniendo en cuenta la expansión y el desarrollo previsibles de los sistemas terrenales y espaciales, modelos apropiados para ambos tipos de sistemas.

2.2.1 Parámetros del modelo de sistemas de radioenlaces terrenales con visibilidad directa

En el Apéndice 1 figuran los parámetros que describen las características técnicas del modelo de sistema de radioenlaces con visibilidad directa.

Para los sistemas de telefonía multicanal analógica con modulación angular, puede suponerse que la potencia de interferencia y la del ruido térmico (tanto antes como después de la detección) se van sumando en todo el trayecto de transmisión del sistema. Esta hipótesis no puede admitirse para los sistemas de señales digitales.

2.2.2 Parámetros del modelo orbital para sistemas espaciales

Sólo interesan las características de las estaciones espaciales transmisoras. Dado que no varía la geometría entre un determinado sistema de radioenlaces terrenales y una estación espacial en la órbita de los satélites geoestacionarios, las condiciones de interferencia más rigurosas se producirán, o hay que suponerlo, cuando una o más estaciones espaciales en dicha órbita se encuentren en los haces principales de estaciones receptoras terrenales pertenecientes a un sistema de radioenlaces.

Se ha llegado, pues, a la conclusión de que lo mejor es representar el modelo de sistema espacial por estaciones espaciales transmisoras situadas a intervalos regulares (separaciones angulares geocéntricas de 3 y 6° de arco, que representan dos casos de distinta gravedad).

En el § 4 se estudian los efectos de las interferencias de emisiones de estaciones espaciales de satélites de órbita no geoestacionaria.

2.3 Relación entre el ángulo de llegada y los límites de densidad de flujo de potencia

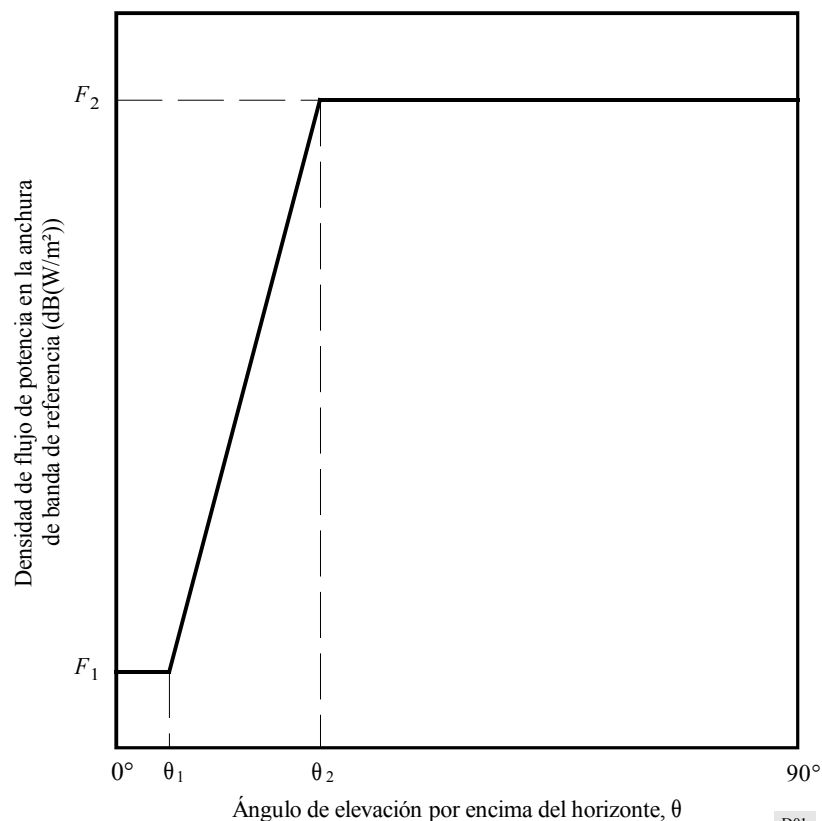
Las antenas de radioenlaces apuntan normalmente en una dirección cercana a la horizontal. Por ello, son particularmente sensibles al flujo de potencia interferente que llega en dirección tangencial (o casi tangencial) a la superficie de la Tierra. El esquema de radiación de las antenas de los radioenlaces presenta una discriminación tanto mayor cuanto mayor es el ángulo de llegada de la señal interferente. En consecuencia, se puede permitir que la densidad de flujo de potencia aumente con el ángulo de llegada. Al determinar la magnitud admisible de este aumento se han tenido debidamente en cuenta las características de ciertos tipos de antena de radioenlaces; por ejemplo, las antenas periscopio, que ofrecen una discriminación mediocre de lóbulos laterales en los ángulos de hasta 90° con relación al eje del haz principal.

Los diversos estudios efectuados demuestran que, para la protección de los sistemas de radioenlaces, es aceptable una relación de la forma ilustrada en la Fig. 1 entre la densidad admisible de flujo de potencia y el ángulo de llegada. En general, la mayor densidad de flujo de potencia permitida para los grandes ángulos de llegada es también útil para los sistemas del SFS que utilizan antenas de haz estrecho. Sin embargo, como el satélite debe respetar los límites de densidad de flujo de potencia con relación a todos los ángulos de llegada, no siempre es posible concebir antenas de satélite capaces de aprovechar al máximo la ampliación de los límites de densidad de flujo de potencia para los ángulos de elevación más grandes.

En la presente Recomendación se ha dado un valor de 5° al ángulo de llegada θ_1 indicado en la Fig. 1. Esto se debe a que las antenas de radioenlaces con ángulos de elevación de 2° ó 3° se utilizan frecuentemente y el valor de θ_1 tendría que ser lo suficientemente elevado para proteger adecuadamente estos sistemas de radioenlaces. Por otra parte, el efecto que los valores de θ_1 inferiores a 5° producen sobre el diseño de sistemas de satélites es mínimo. Por ejemplo, el ángulo de inclinación de un satélite geostacionario con respecto a la superficie de la Tierra y para un ángulo de llegada de 0° es de $8,688^\circ$ y de $8,655^\circ$ en el caso de un ángulo de llegada de 5° (véase la Fig. 2). Esta diferencia de $0,033^\circ$ es pequeña ($0,4\%$ del ángulo de inclinación), motivo por el cual resulta razonable asignar a θ_1 un valor de 5° .

FIGURA 1

Límite de densidad de flujo de potencia en función del ángulo de llegada



2.4 Análisis de la interferencia

Las características de los sistemas terrenales de radioenlaces con visibilidad directa se conocen bien o pueden predecirse con bastante aproximación; en cambio, es preciso estudiar más a fondo la forma específica y los niveles absolutos del diagrama de densidad de flujo de potencia de la Fig. 1, derivado genéricamente. Pueden definirse límites específicos en función de los siguientes parámetros:

- la gama de aumento (esto es, los valores reales de densidad de flujo de potencia máxima admisible para pequeños y grandes ángulos de elevación, representados respectivamente por los niveles F_1 y F_2 en la Fig. 1);
- la rapidez de aumento (esto es, la pendiente, en dB/grado, entre los ángulos de elevación θ_1 y θ_2 de la Fig. 1);
- los valores de los ángulos de llegada θ_1 y θ_2 ;
- el efecto de los límites de variación en posición Norte-Sur.

En el Apéndice 1 se dan las líneas generales del método empleado en los análisis estadísticos.

2.5 Relación entre la frecuencia y los límites de densidad de flujo de potencia

Cuando la frecuencia pasa de 4 a unos 27,5 GHz, hay que tener en cuenta varios factores para reducir los límites de densidad de flujo de potencia:

- Cabe esperar que las temperaturas de ruido, en los sistemas de recepción de los modelos terrenales, aumenten con la frecuencia. En la práctica, debido a restricciones de la anchura del haz, no es probable que las ganancias asociadas a la antena lleguen a ser muy superiores a los valores máximos que se utilizan actualmente en las frecuencias más bajas. Los desvanecimientos, en particular en las frecuencias superiores a 10 GHz, aumentarán más debido a la absorción por la lluvia durante pequeños porcentajes de tiempo. Cuando el desvanecimiento se deba a la lluvia, cabrá esperar cierta correlación entre la reducción de las señales deseada e interferente, en especial dentro del haz. Estos factores tienden a hacer aumentar la densidad admisible de flujo de potencia. Por otro lado, en los sistemas de radioenlaces, las pérdidas en la línea de alimentación pueden ser más bajas, y esto podría reducir el límite admisible de densidad de flujo de potencia. Como resultado de todo ello, los límites de densidad de flujo de potencia sólo son ligeramente superiores, en la gama de frecuencias de 10 a 15 GHz, a los indicados para las frecuencias inferiores a 10 GHz.
- En frecuencias superiores a unos 15 GHz, es probable que los sistemas terrenales utilicen modulación digital. Si bien en tales sistemas no es aplicable ya la característica aditiva de la interferencia de los sistemas para señales con modulación angular analógica, la generalmente menor sensibilidad de los sistemas digitales a la interferencia permite reducir considerablemente los valores máximos admisibles de la densidad de flujo de potencia. Además, en esas frecuencias, el desvanecimiento se debe sobre todo a la atenuación por la lluvia, y la correlación entre las señales deseada e interferente es apreciable. Por otro lado, puede haber una importante absorción atmosférica en el trayecto interferente de una estación espacial, en particular para pequeños ángulos de llegada que incluyen el caso del haz principal.

3 Límites de densidad de flujo de potencia

Habida cuenta de lo expuesto en los puntos precedentes, se estima que es pequeña la probabilidad de que las estaciones espaciales causen una interferencia inaceptable en los sistemas terrenales de radioenlaces con visibilidad directa con los límites indicados a continuación:

- En la gama de frecuencias comprendida entre 1 y 27,5 GHz (las bandas de frecuencias compartidas entre el servicio fijo por satélite y el servicio fijo se indican en el Artículo 8 del RR). Para las bandas de frecuencia compartidas entre sistemas del SFS y sistemas terrenales de radioenlaces con visibilidad directa, la densidad máxima de flujo de potencia producida en la superficie de la Tierra por las emisiones de cualquier estación espacial, no debe exceder los valores indicados en el Cuadro 1, cualesquiera que sean las condiciones y los métodos de modulación utilizados.

CUADRO 1

Límites de densidad de flujo de potencia*

Gama de frecuencias (GHz)	Límite de densidad de flujo de potencia (dB(W/m ²))			
	$\theta \leq 5^\circ$ ⁽¹⁾	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	Anchura de banda de referencia
1,7-2,5 ⁽²⁾	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	} En cualquier banda de 4 MHz } En cualquier banda de 1 MHz
2,50-2,69	-152	$-152 + 0,75 (\theta - 5)$	-137	
3-8	-152	$-152 + 0,5 (\theta - 5)$	-142	
8-11,7	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	
11,7-15,4	-148	$-148 + 0,5 (\theta - 5)$	-138	
15,4-27,5	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	

* Con arreglo al número S21.16.4 del RR, los límites de densidad de flujo de potencia en las bandas comprendidas entre 17,7 y 27,5 GHz se aplicarán hasta que éstos sean modificados por una Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones competente.

(1) θ : ángulo de llegada de la onda (grados por encima de la horizontal).

(2) Entre 1,7 y 2,5 GHz, el servicio fijo por satélite actualmente no tiene atribuida ninguna banda de frecuencias por el RR.

4 Interferencia causada por estaciones espaciales en órbitas no geoestacionarias

Para los sistemas que utilizan estaciones espaciales transmisoras en órbitas dispuestas al azar, y mientras el espacio orbital no esté densamente poblado de estas estaciones espaciales, las aportaciones de interferencia a sistemas terrenales de radioenlaces por los haces principales de sus antenas serán transitorias y, desde un punto de vista estadístico, de una magnitud pequeña aceptable.

El estudio de la interferencia que pueden producir estaciones espaciales en órbitas inclinadas elípticas de 12 h a 4 GHz indica que los límites especificados en la presente Recomendación, podrían ser adecuados.

Los resultados de un estudio sobre un posible modelo revelan que la interferencia potencial de estaciones espaciales en órbitas circulares bajas a sistemas de radioenlaces MDF en la banda compartida de 2 GHz produce niveles de ruido inferiores a los criterios establecidos en la Recomendación UIT-R SF.357. Se necesitan ulteriores estudios de interferencia a otros tipos de sistema.

Para otras órbitas inclinadas, es muy probable que resulten aplicables las conclusiones relativas a las órbitas dispuestas al azar, con las mismas garantías, siempre que las proyecciones de las órbitas sobre la Tierra no sean repetitivas a corto plazo. Dado su movimiento relativamente sistemático, es posible que las estaciones espaciales en órbitas ecuatoriales no geoestacionarias provoquen en los sistemas terrenales de radioenlaces una interferencia global excesiva por los haces principales de las antenas. Debe hacerse observar que, al seleccionar las ubicaciones de las estaciones de radioenlaces, no se tienen en cuenta los satélites que utilizan este tipo de órbitas; de lo contrario, surgirían limitaciones inaceptables.

5 Influencia de los límites de densidad de flujo de potencia en las características de funcionamiento de sistemas espaciales

A continuación se analiza brevemente la utilidad de las emisiones de las estaciones espaciales que se ajusten a los límites inferiores indicados en el § 3.

Se suponen las características del Cuadro 2 representativas de una estación terrena receptora relativamente sencilla:

CUADRO 2

Características de una estación terrena receptora

Bandas de frecuencias (GHz)	Diámetro de la antena (m)	Ganancia de la antena (dBi)	Temperatura de ruido del sistema receptor (K)
4	7,5	47	500
12	6,0	55	700
20	4,5	57	1 000

Suponiendo condiciones de propagación en el espacio libre y la densidad de flujo de potencia máxima admisible en los ángulos de elevación reducidos, se puede comparar la densidad de potencia recibida con la densidad de potencia del ruido térmico a la entrada del receptor de la estación terrena. Suponiendo, además, una modulación angular de gran excursión o una modulación digital (espectros gaussiano y en coseno alzado, respectivamente), hay que restar unos 4 dB de la relación portadora/densidad de ruido, con la relación portadora/ruido disponible no degradada, como se muestra en el Cuadro 3.

CUADRO 3

Relaciones portadora/ruido no degradadas

Bandas de frecuencias (GHz)	Densidad espectral de la portadora	Densidad espectral de ruido	Relación portadora/ruido (dB)
4	-137,5 dB(W/4 kHz)	-165,5 dB(W/4 kHz)	24
12	-137,0 dB(W/4 kHz)	-164,0 dB(W/4 kHz)	23
20	-104,5 dB(W/MHz)	-138,5 dB(W/MHz)	30

En las frecuencias inferiores a unos 15 GHz, donde se utilizan señales con modulación angular de gran excursión, el margen resultante parece ser muy adecuado. Por encima de los 15 GHz, en los sistemas que utilizan modulación digital, la utilidad de estas relaciones portadora/ruido es sólo marginal, habida cuenta de los parámetros supuestos del sistema.

En ciertos casos pueden ser convenientes relaciones portadora/ruido más elevadas. En ellos, los límites más elevados de densidad de flujo de potencia asociados a los ángulos de llegada más grandes son muy beneficiosos en relación con las antenas de haz estrecho de las estaciones espaciales (véase el Apéndice 2).

6 Efectos de los límites de densidad de flujo de potencia en el diseño de sistemas de radioenlaces digitales

La interferencia proveniente de estaciones espaciales en frecuencias por debajo de 10 GHz da lugar a un aumento de la degradación de la calidad de funcionamiento más pequeño relativo al ruido térmico exclusivamente. Dado que los límites admisibles de densidad de flujo de potencia han sido establecidos basándose en sistemas analógicos, y que la degradación admisible ha sido establecida de conformidad con la Recomendación UIT-R SF.615, cabe prever algunas limitaciones en el diseño de enlaces de radioenlaces digitales. El Apéndice 3 trata de cómo utilizar el denominado ángulo de evitación de la órbita.

7 Otras consideraciones

Lo anterior se basa, en parte, en el margen para interferencia de la Recomendación UIT-R SF.357, en la suposición de que este margen lo utilizarán en su totalidad las estaciones espaciales transmisoras, y en la suposición de que el número real de antenas de estación terrenal apuntadas hacia la órbita de los satélites geoestacionarios (OSG) sea pequeño y concuerde razonablemente con los modelos estadísticos.

Si se resuelve emplear las asignaciones de frecuencias para trayectos ascendente y descendente en los sistemas espaciales, como un modo de intercambio opcional, parte del margen para interferencia de la Recomendación UIT-R SF.357 tendría que atribuirse a la interferencia causada por estaciones terrenas, y esto entrañaría una reducción correspondiente de la densidad admisible de flujo de potencia producida por las estaciones espaciales.

Además, en los estudios a que se alude en el § 2.3 se partió de la hipótesis de la utilización de diagramas de radiación de antena del tipo descrito en la Recomendación F.699. Estos diagramas son adecuados para las aberturas circulares que presentan una simetría completa. Sin embargo, algunos tipos de antenas de sistemas de radioenlaces terrenales no presentan diagramas de radiación simétrica circular y sólo en el plano horizontal pueden considerarse semejantes a los diagramas de referencia de la Recomendación UIT-R F.699. Son necesarios nuevos estudios puesto que la interferencia procedente de las estaciones espaciales se recibe en todos los planos. Recientemente se realizaron estudios en los que se utilizó una caracterización tridimensional completa de un reflector de bocina piramidal. Las conclusiones fueron semejantes a las de los anteriores estudios. En especial, aunque los límites establecidos en el § 3 son adecuados para proteger debidamente los sistemas de radioenlaces, la interferencia admisible puede rebasarse en un pequeño porcentaje de sistemas sensibles.

Hay que advertir que, si se evita que los haces principales de las antenas terrenales apunten dentro de 1° de la OSG, se puede reducir en gran medida la interferencia potencial procedente de las estaciones espaciales.

APÉNDICE 1

AL ANEXO 1

Determinación de los límites de densidad de flujo de potencia en la banda de frecuencias comprendida entre 1 y 10 GHz

1 Introducción

Varias administraciones han adoptado un criterio estadístico para estudiar la influencia de diversos límites de densidad de flujo de potencia factibles de compartir con frecuencias entre estaciones espaciales transmisoras con diversos límites de mantenimiento en posición Norte-Sur en la OSG y sistemas terrenales de radioenlaces con visibilidad directa.

2 Método de evaluación

Los cálculos se basan en el supuesto de sistemas de radioenlaces situados al azar, con una longitud igual a la del circuito ficticio de referencia de la UIT. Se han introducido variaciones en la latitud media de los sistemas y, en ciertos casos, en el acimut de extremo a extremo del sistema, suponiéndose determinadas distribuciones del ángulo de elevación y del acimut de los haces principales de las antenas de las estaciones terrenales en torno del acimut medio del sistema.

Partiendo de diversos límites hipotéticos de densidad de flujo de potencia, se ha calculado, para modelos de sistemas terrenales, la interferencia combinada producida por satélites con diversos límites de mantenimiento en posición Norte-Sur y una separación de 3° y 6° , todos los cuales producen las densidades de flujo de potencia máximas supuestas, para todos los ángulos de llegada.

Los valores absolutos de la densidad de flujo de potencia se han elegido de manera que:

- pueda tolerarse un incremento razonable al aumentar los ángulos de llegada;
- puedan tenerse en cuenta estaciones espaciales, geoestacionarias y no geoestacionarias con los mismos límites de densidad de flujo de potencia;
- los valores de interferencia máxima admisible de la Recomendación UIT-R SF.357 se rebasen únicamente para fracciones relativamente pequeñas ($\approx 10\%$) de los modelos del sistema terrenal de «gran sensibilidad», y para porcentajes algo menores de los sistemas de «sensibilidad media».

3 Modelos de sistema

En el Cuadro 4 siguiente se muestran las características técnicas representativas de los sistemas de radioenlaces para los que se han efectuado los análisis:

CUADRO 4

Parámetros hipotéticos de los sistemas de radioenlaces

Frecuencia (GHz)	2,5	4	4
Tipo de sistema	Gran sensibilidad	Sensibilidad media	Gran sensibilidad
Longitud del tramo (km)	60	50	50
Ganancia de la antena (dBi)	38	40	42
Pérdida de la línea de alimentación (dB)	3	3	3
Temperatura de ruido del receptor (K)	750	1 750	750
Ruido térmico del canal por salto (pW0p)	25	25	10 y 25

Se han supuesto para las antenas de las estaciones terrenales los siguientes diagramas de radiación:

$$\begin{aligned}
 G(\varphi) &= G_1 - 25 \log \varphi && \text{dB} && \text{para } \varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1 \\
 &= G_2 && \text{dB} && \text{para } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde φ es el ángulo (grados) con relación al eje del haz principal.

4 Resultados de los cálculos

Los cálculos indican que los límites de densidad de flujo de potencia que figuran en el § 3 del Anexo 1 asegurarán una protección adecuada a los modelos de sistemas de radioenlaces de sensibilidad media, pero que, en ciertos casos, se rebasarán los valores admisibles de la Recomendación UIT-R SF.357 para los modelos de sistemas de alta sensibilidad.

Los cálculos muestran también que las órbitas de satélite inclinadas tienen un efecto mínimo sobre el nivel combinado de interferencia causada al servicio fijo en función de la exactitud del mantenimiento en posición Norte-Sur. Debe observarse, no obstante, que el método estadístico aquí utilizado para estudiar los efectos de la interferencia causada al servicio fijo por el servicio fijo por satélite, es adecuado para el servicio fijo por satélite con órbitas ecuatoriales pero deben seguirse examinando los elementos dependientes del tiempo para determinar la indisponibilidad del servicio fijo cuando los satélites del servicio fijo por satélite están en órbitas inclinadas.

5 Influencia de la variación en función del tiempo de los niveles de las señales deseada e interferente

Se ha tenido en cuenta, hasta cierto punto, la posibilidad de que las señales deseada e interferente varíen en función del tiempo. Por ejemplo, cálculos en la hipótesis de desvanecimiento de tipo Rayleigh durante la tercera parte del mes indican que los límites de densidad de flujo de potencia consignados en el Cuadro 1 para la gama de frecuencias 3 a 8 GHz darían lugar a un ruido de 50 000 pW0p en un canal telefónico de un modelo de sistema de radioenlaces en 4 GHz durante aproximadamente 0,003% a 0,02% del tiempo, según la latitud a que se halle el sistema. Se supuso que el modelo de sistema de radioenlaces disponía de una protección por diversidad de conmutación de 1:1 cada cinco saltos, y que los satélites del modelo de sistema espacial estaban separados 3° y producían el valor admisible de flujo de potencia en todos los ángulos de llegada.

APÉNDICE 2

AL ANEXO 1

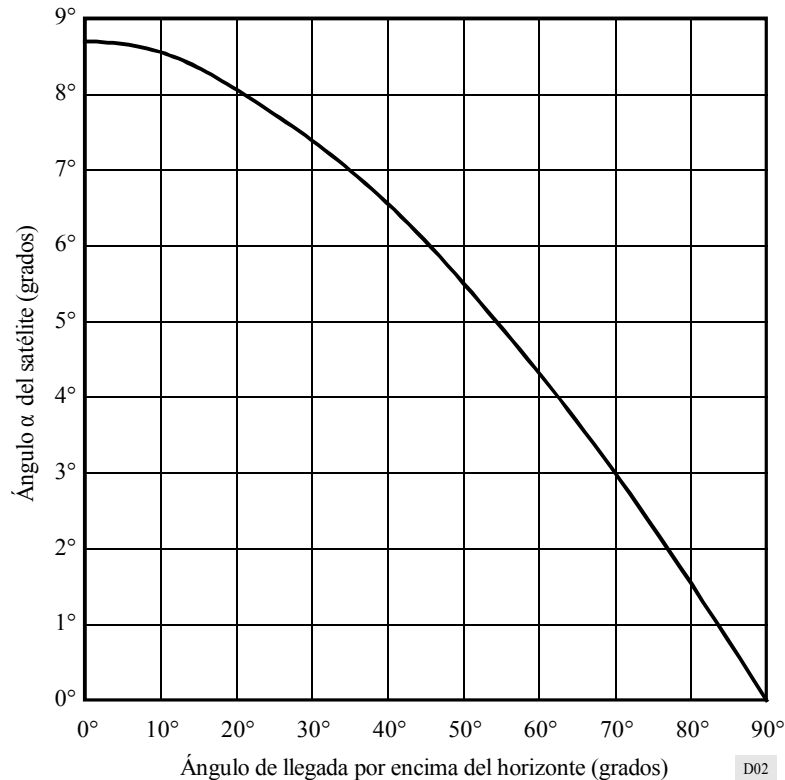
Utilización de antenas de haz estrecho en los satélites geostacionarios

Para poder sacar provecho del aumento de la densidad de flujo de potencia admitido para los ángulos grandes de elevación, hay que instalar en el satélite una antena de haz estrecho orientada hacia la Tierra. Cuando el haz estrecho no está apuntado hacia el punto subsatelital (y se encuentra así cerca del horizonte), se deben tomar precauciones especiales a fin de que las transmisiones del satélite se ajusten a los límites de la densidad de flujo de potencia en todos los ángulos de elevación.

Estas precauciones consisten principalmente en iluminar la superficie de la Tierra con una densidad de flujo de potencia menor que la del límite admisible en el centro del haz, para que las transmisiones que lleguen con todos los ángulos de elevación permanezcan dentro de los límites de la densidad de flujo de potencia.

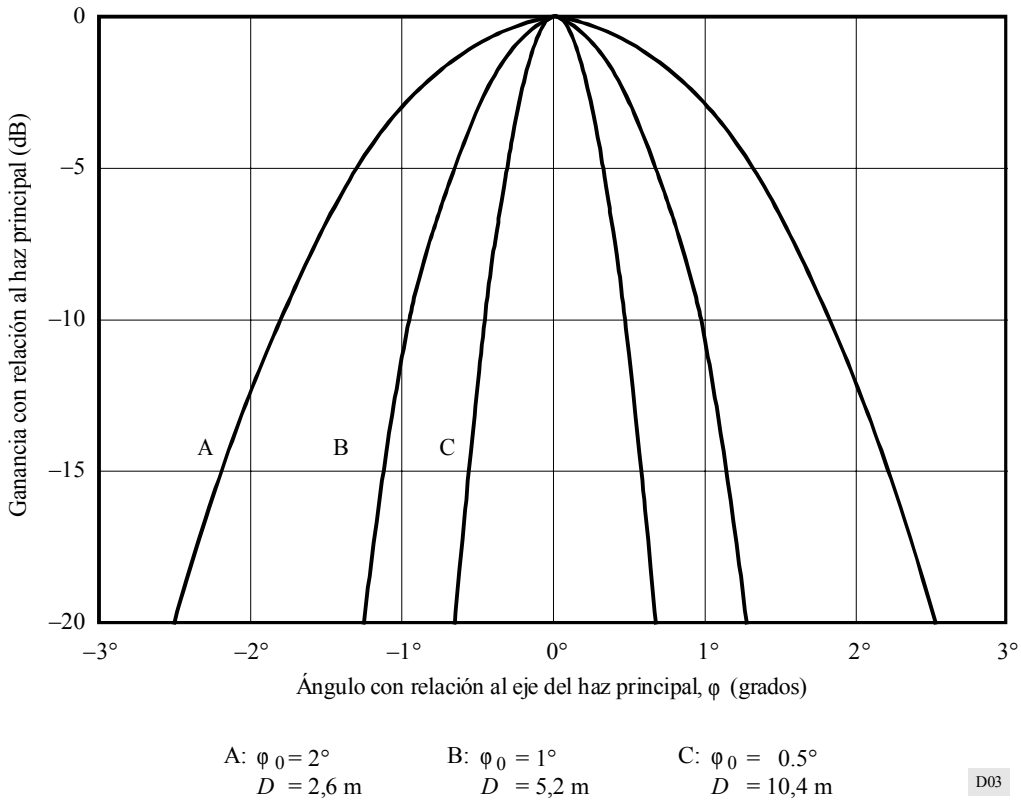
Por la Fig. 2 puede verse la relación entre el ángulo (ángulo α) de referencia del satélite (que por definición es el ángulo comprendido entre el radio vector al centro de la Tierra y el trayecto de un rayo hacia un punto de la superficie terrestre) y el ángulo de llegada correspondiente de las transmisiones del satélite por encima del horizonte. La Fig. 3 muestra diagramas tipo para el haz principal de antena de los satélites, y se indican tres aberturas distintas en el Cuadro 5.

FIGURA 2
Ángulo α del satélite en función del ángulo de llegada por encima del horizonte



D02

FIGURA 3
Diagramas tipo para el haz principal de las antenas de satélite



CUADRO 5
Aberturas de antena

Anchura del haz entre puntos a 3 dB (grados)	Diámetro de la antena (en la banda de 4 GHz) (m)
2	2,6
1	5,2
0,5	10,4

La fórmula general de los diagramas del haz principal es la siguiente:

$$10 \log (G/G_0) = -12 (\varphi/\varphi_0)^2 \quad \text{dB} \quad (2)$$

donde:

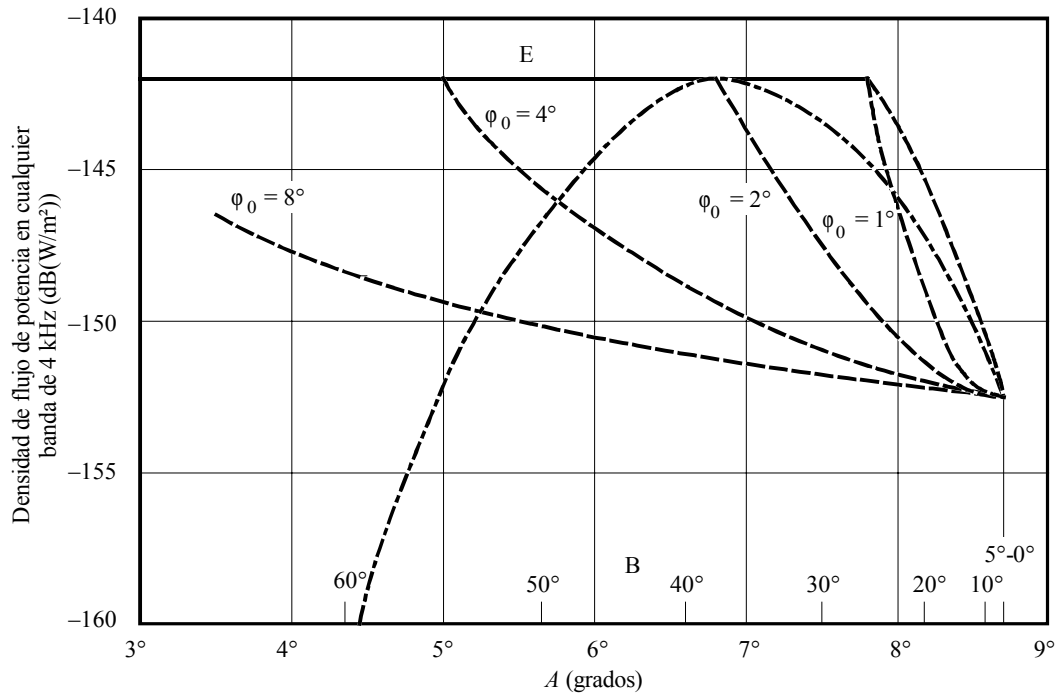
φ : ángulo medido a partir del eje del haz principal

φ_0 : anchura de haz de potencia mitad.

La curva de trazo continuo de la Fig. 4 indica la densidad de flujo de potencia en el centro del haz que se ajusta a los límites indicados para cualquier ángulo de elevación. Una antena de satélite con un anchura de haz de potencia mitad de $0,5^\circ$ se puede adaptar a las variaciones rápidas de este límite de la densidad de flujo de potencia para los ángulos de llegada pequeños, cuando la transmisión se acerca al horizonte. Los haces de satélite más anchos, orientados hacia cerca del horizonte, están limitados por la curva de densidad de flujo de potencia en el horizonte.

FIGURA 4

Densidad máxima de flujo de potencia en el centro del haz
sin exceder la curva E



- Lugar geométrico de los centros del haz de antenas de satélite para distintas anchuras angulares para las que se alcanza el límite impuesto por la curva E
- Ejemplo de un haz de 2° de anchura angular que se ajusta a la curva E
- E: límite de la densidad de flujo de potencia en la banda de 3-8 GHz
- A: escala del ángulo formado por la recta satélite-centro de la Tierra y la recta que une al satélite con un punto de la superficie de la Tierra
- B: escala del ángulo de llegada por encima del horizonte

D04

La Fig. 4 indica también el lugar geométrico de los centros del haz de antenas de satélite para anchuras angulares diferentes. Se señala que para un haz de determinada anchura, la densidad de flujo en el centro del haz debe estar limitada de conformidad con las curvas a fin de que ninguna parte del haz exceda el límite marcado por la curva de trazo continuo.

De estas curvas se desprende que quienes proyecten los sistemas de satélite quizá no puedan aprovechar plenamente la curva superior de flujo de potencia en cada satélite, para todos los ángulos de llegada.

APÉNDICE 3 AL ANEXO 1

Utilización del ángulo de evitación de la órbita en el diseño de sistemas de radioenlaces digitales

1 Introducción

La Recomendación UIT-R SF.615 permite, en efecto, un 10% de degradación de la calidad de funcionamiento en el trayecto digital ficticio de referencia (TDFR) de un sistema de radioenlaces digital, producida por interferencias de sistemas del servicio fijo por satélite. Al mismo tiempo, el Artículo S21 del RR y la presente Recomendación especifican las densidades admisibles de flujo de potencia producidas por estaciones espaciales del servicio fijo por satélite en diferentes bandas.

En este Apéndice se examinan las consecuencias de la necesidad de adoptar un ángulo de evitación de la órbita para los receptores de radioenlaces que funcionan en bandas compartidas con el servicio fijo por satélite por debajo de 15 GHz. Este Apéndice contiene una solución que puede utilizarse para determinar los límites del ángulo de evitación de la órbita en el diseño de sistemas de radioenlaces digitales.

2 Modelo de análisis de un sistema de radioenlaces digital

Para los fines de este análisis, se suponen los siguientes parámetros, basados en sistemas de radioenlaces digitales:

- Banda de frecuencias: 4 GHz
- Anchura de banda: 20 MHz
- Antena:

parabólica,	4 m de diámetro	
ganancia:	42 dBi	
diagrama:	$35 - 25 \log X$ dBi	para $1,8 \leq X < 25$
	0 dBi	para $X \geq 25$
	siendo X el ángulo con respecto al eje	
- Latitud: 50° N

Para determinar la degradación total de la calidad de funcionamiento causada por la densidad de flujo interferente constante de las estaciones espaciales, es necesario calcular la potencia interferente recibida en cada estación receptora. Este valor viene determinado por los parámetros anteriormente indicados y el ángulo de evitación de la órbita por parte de la antena receptora.

Se piensa que la siguiente clasificación de las estaciones no se apartará mucho de la generalidad de los casos:

- Categoría A: Estaciones de radioenlaces con pequeño ángulo de evitación orbital, es decir, de 2° a 10°.
- Categoría B: Estaciones de radioenlaces con gran ángulo de evitación orbital, es decir, superior a 10°.

Constituirá una simulación prudente de las estaciones de la categoría A una estación orientada con un ángulo de evitación de la órbita de 2° y de las estaciones de la categoría B una estación orientada con un ángulo de evitación de 10°. Para obtener una mayor precisión, pueden determinarse más categorías de estaciones para gamas angulares menores. Sin embargo, para ilustrar el principio, serán suficientes las anteriormente mencionadas.

En un trayecto digital ficticio de referencia, sea Q la parte de estaciones de la categoría A y $(1 - Q)$ la parte de la categoría B. Será entonces posible, como se indica en los párrafos que siguen determinar la degradación total en un trayecto digital ficticio de referencia, y relacionar esa degradación con el valor recomendado (Recomendación UIT-R SF.615); con ello se obtendrá el valor de Q .

3 Potencia interferente recibida

En el supuesto de que la separación orbital entre satélites sea de 3° y que se satisfagan los límites de densidad de flujo de potencia del Artículo S21 del RR, se obtiene que la densidad espectral de potencia interferente total recibida en una estación de la categoría A es de:

$$Pr_A / 4 \text{ kHz} = -158,1 \text{ dB(W/4 kHz)}$$

En el supuesto de que la señal interferente proveniente del satélite sea una portadora de televisión con dispersión de energía de 2 MHz, la densidad espectral de potencia interferente total dentro de la banda de paso de 20 MHz del receptor será:

$$Pr_A = -131,1 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

Las estaciones de la categoría B tienen una discriminación de antena de $25 \log 10/2 = 17,5$ dB al menos, por lo que la densidad espectral de potencia total máxima recibida será:

$$Pr_B = -175,6 \text{ dB(W/4 kHz)} \text{ ó } -148,6 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

4 Degradación de la calidad de funcionamiento debida a la interferencia

Se supone que la interferencia procedente de una estación espacial es una interferencia estable, que no experimenta incremento debido a la propagación por trayectos múltiples. Esto, por tanto, reducirá el margen de desvanecimiento del enlace de radioenlaces afectado, y consecuentemente influirá en la degradación de su calidad de funcionamiento. La densidad espectral de potencia del ruido térmico de un receptor típico ($T = 750$ K) es:

$$N_0 = -126,8 \text{ dB(W/20 MHz)}$$

Suponiendo que la interferencia tenga forma de ruido para determinada relación entre la interferencia y el ruido térmico, I/N_0 , la degradación de la calidad de funcionamiento estará determinada por un factor x_p , dado por:

$$x_p = 1 + 10^{(I/N_0)/10} \quad (3)$$

Para una estación de la categoría A, I/N_0 es $-4,26$ dB, y para una estación de la categoría B, $-21,8$ dB. De la ecuación (3) para las estaciones de la categoría A, $x_p = 1,38$; y para las estaciones de la categoría B, $x_p = 1,007$.

Suponiendo que haya n estaciones en el sistema, y que el 10% de la degradación total se deba a interferencia proveniente de los satélites, la degradación debida únicamente al ruido térmico en cada estación, viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{0T} = \frac{0,9 P_0}{n}$$

siendo:

P_0 : degradación total admisible, en porcentaje del tiempo (según la Recomendación UIT-R F.594).

Por tanto, con nQ receptores de la categoría A, y $(1 - Q)n$ receptores de la categoría B, la degradación total de P_0 será:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{0T} \times 1,38 \times nQ + P_{0T} \times 1,007 \times (1 - Q)n \\ &= 0,9 P_0 (0,38 Q + 1,007) \end{aligned}$$

De ahí que, $Q = 27\%$.

5 Examen de los resultados

Según el prudente análisis que antecede, aproximadamente el 27% de los receptores de sistemas terrenales de un trayecto digital ficticio de referencia pueden estar apuntados con un ángulo entre 2 y 10° con respecto a la órbita de los satélites geoestacionarios, si el resto de las estaciones están orientadas con más de 10° respecto a la órbita. Conviene que los países cuyas rutas principales van de Este a Oeste lo tengan en cuenta.

Se hace observar que en el análisis anterior la anchura de banda necesaria supuesta de dispersión de energía es de 2 MHz. Es posible que futuros sistemas necesiten una p.i.r.e. más alta y, por consiguiente, una mayor anchura de dispersión de energía, por ejemplo 4 MHz. El aumento resultante de 3 dB en la interferencia daría lugar a que la anterior cifra de 27% se convirtiese en 13%.

6 Conclusión

Este Apéndice muestra cómo puede acomodarse en el diseño de sistemas de relevadores radio-eléctricos digitales el 10% del margen de interferencia del servicio fijo por satélite, indicado en la Recomendación UIT-R SF.615. Señala que con este margen hasta el 27% de las estaciones de un sistema determinado pueden estar orientadas dentro de un ángulo de 2 a 10° con respecto de la órbita de los satélites geoestacionarios. En realidad, con las prudentes hipótesis adoptadas en la categorización de estaciones indicada, este porcentaje puede todavía acrecentarse más en la mayoría de los sistemas reales. Incluso con el uso de p.i.r.e. superiores en el futuro, las limitaciones siguen siendo razonables.