

RECOMENDACIÓN UIT-R SA.364-5*

**ANCHURAS DE BANDA Y FRECUENCIAS PREFERIDAS PARA SATÉLITES
DE INVESTIGACIÓN ESPACIAL PRÓXIMOS A LA TIERRA,
TRIPULADOS O NO TRIPULADOS**

(Cuestión 132/7)

(1963-1966-1970-1978-1986-1992)

El CCIR,

considerando

- a) que las frecuencias de explotación adecuadas y la anchura de las bandas en radiofrecuencias requeridas en las misiones de investigación espacial cerca de la Tierra están determinadas por factores de propagación y por consideraciones técnicas;
- b) que numerosos satélites próximos a la Tierra necesitan comunicación en ambos sentidos y que ésta es vital en el caso de satélites tripulados;
- c) que es preciso satisfacer la fiabilidad de las comunicaciones durante los periodos en que se experimentan condiciones atmosféricas adversas;
- d) que es práctico y aconsejable efectuar las funciones de telecomunicación con un solo enlace;
- e) que para conseguir un seguimiento de precisión es aconsejable utilizar un par de frecuencias Tierra-espacio y espacio-Tierra coherentemente relacionadas;
- f) que para el funcionamiento simultáneo en transmisión/recepción con una sola antena, las frecuencias Tierra-espacio y espacio-Tierra apareadas deben tener una diferencia mínima del 7%;
- g) que las telecomunicaciones espacio-espacio y Tierra-espacio de los satélites de retransmisión son necesarias para acomodar el crecimiento y desarrollo de las investigaciones espaciales cerca de la Tierra en el marco del servicio de investigación espacial;
- h) que se pueden necesitar técnicas especiales de modulación y de codificación para ciertos enlaces con objeto de no exceder los límites de densidad de flujo de potencia o como protección contra los efectos de interferencia o de la propagación por trayectos múltiples,

recomienda

1. que las bandas de frecuencias para misiones cercanas a la Tierra del servicio de investigación espacial estén situadas, teniendo debidamente en cuenta la fiabilidad del enlace y la posibilidad de compartición, en las gamas de frecuencias preferidas que figuran en el cuadro 1 del anexo 1;
2. que la anchura de cada una de las bandas atribuidas en las frecuencias preferidas satisfaga la condición de anchura de banda del enlace concreto enumeradas en el cuadro 2 del anexo 1 para dar cabida a las telecomunicaciones próximas a la Tierra, presentes y futuras, en los sistemas multisatélite y multimisión del servicio de investigación espacial.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1, 4, 7, 8, 9, 10 y 11.

**Procedimiento para la selección de las bandas de frecuencia preferidas
para la transmisión hacia y desde vehículos espaciales
tripulados y no tripulados de investigación
espacial cerca de la Tierra**

1. Generalidades – Efectos de propagación

En este anexo se examina el procedimiento utilizado para la selección de las frecuencias preferidas para misiones cerca de la Tierra sobre la base de consideraciones técnicas y de propagación en la gama de 100 MHz-350 GHz. La calidad de funcionamiento del enlace depende de manera crítica de las condiciones de propagación, que vienen determinadas ante todo por los gases atmosféricos y las precipitaciones. Los parámetros utilizados para modelar estos efectos proceden de los textos de la Comisión de Estudio 5. Se han obtenido valores típicos de atenuación y de ruido celeste para condiciones de cielo despejado y para intensidades de lluvia de 20, 50, 100 y 140 mm/h con ángulos de elevación de 5° y 20°. Se producen efectos ionosféricos a causa de la interacción entre la onda radioeléctrica transmitida, la densidad de electrones libres en la Tierra, que varía en función de la latitud geomagnética, el ciclo diurno, el ciclo anual y solar, etc., y los campos magnéticos de la Tierra. Por encima de 10 GHz, los efectos ionosféricos son generalmente pequeños y no se consideran significativos. En ausencia de precipitaciones, es poco probable que los efectos troposféricos produzcan desvanecimientos importantes en los sistemas de telecomunicaciones espaciales a frecuencias inferiores a 10 GHz. La atenuación de la señal debida, por un lado, a la absorción por el oxígeno molecular y el vapor de agua, y por otro, a la absorción y la dispersión por la lluvia, puede afectar seriamente la calidad de funcionamiento del enlace y, por consiguiente, a la selección de frecuencias.

2. Consideraciones técnicas y operacionales

Las consideraciones técnicas pueden dividirse en dos categorías: exigencias de la misión y factores relativos al equipo.

2.1 Exigencias relativas a la frecuencia de apoyo a la misión

2.1.1 Telemando y teledada de mantenimiento

La exigencia fundamental de cualquier misión es la seguridad y el éxito de la misma. Para que se cumpla tal exigencia, el enlace de telemando y de teledada de mantenimiento deben funcionar cualquiera que sea la orientación del vehículo espacial. Como esto sólo puede conseguirse mediante el uso de una antena de haz ancho, omnidireccional, a bordo del vehículo espacial, habrá que tener en cuenta el empleo de ese tipo de antenas al escoger las frecuencias.

Para la mayoría de las misiones serán adecuadas anchuras de banda de telemando de 10 a 50 kHz, si bien los vehículos espaciales más perfeccionados es posible que precisen anchuras de banda del enlace del orden de 500 kHz o más. Las anchuras de banda de enlace de teledada de mantenimiento varían desde varios kHz a varios cientos de kHz.

2.1.2 Teledada de la misión

La teledada, en la mayoría de las misiones, se recoge y almacena para su retransmisión hacia la Tierra. En el caso de algunas misiones, es posible que el vehículo espacial tenga una sola oportunidad de transmitir los datos registrados por lo que esta retransmisión deberá funcionar cualesquiera que sean las condiciones meteorológicas. Para las misiones en las que no sea necesario satisfacer tal exigencia, se podrá elegir una frecuencia con la que pueda emplearse la máxima velocidad de transmisión de datos en condiciones de atmósfera despejada.

Las anchuras de banda del enlace dependen del grado de complejidad y de perfeccionamiento del vehículo espacial. Para enlaces directos entre el vehículo espacial y la estación terrena habrá que prever anchuras de banda del orden de 100 kHz a 100 MHz. Las anchuras de banda para los enlaces espacio-Tierra vía satélite retransmisor varían en la actualidad desde 225 MHz a 650 MHz. No obstante, está previsto que aumente esa banda de frecuencias por encima de 1 GHz para poder satisfacer futuras exigencias.

* *Nota del Director del CCIR – Este anexo es una versión abreviada del Informe 984 (Düsseldorf, 1990).*

Las anchuras de banda de los enlaces espacio-espacio varían actualmente de 5 a 225 MHz en el caso de comunicaciones directas entre satélite de usuario y satélite relevador. Las anchuras de banda de los enlaces entre satélites relevadores habrán de ser notablemente más anchas, posiblemente superiores a 1 GHz.

2.1.3 Seguimiento

El servicio de investigación espacial en las proximidades de la Tierra emplea diversos métodos para obtener la información orbital del vehículo espacial. En el caso de seguimiento por interferómetro, la presencia de factores tales como una antena omnidireccional de buena calidad en el vehículo espacial, la eficacia del transmisor y la anchura del haz de la antena de la estación terrena, favorecen por lo general el empleo de una frecuencia por debajo de 1 GHz. Se han fabricado interferómetros de antena móvil más elaborados para frecuencias superiores a 5 GHz, pero la atenuación atmosférica y el ruido limitan por lo general su calidad de funcionamiento a frecuencias superiores a 6 GHz. Las anchuras de banda características varían desde varios cientos de Hz a varios kHz.

Los sistemas de medida de distancia y de variación de distancia cuya explotación exige un mínimo de perturbaciones debidas a los efectos ionosférico y transatmosférico, emplean la banda de 1 a 8 GHz en el seguimiento de precisión. El principal factor determinante de la anchura de banda máxima necesaria por canal unidireccional es la gama de resolución que se precisa. Pueden conseguirse gamas de resolución de algunos metros utilizando modulación adecuada con anchuras de banda de aproximadamente 1 a 3 MHz.

También se emplea el seguimiento por radar, si bien la atenuación atmosférica limita normalmente el uso de frecuencias por debajo de unos 6 GHz para el seguimiento mediante sistemas de radar primario. Para muchos de estos sistemas, basta normalmente una anchura de banda de 1 a 10 MHz.

La determinación bilateral de la distancia permite obtener información precisa sobre la ubicación del satélite retransmisor, de modo tal que su movimiento pueda ser tenido en cuenta al determinar los parámetros orbitales del vehículo espacial del usuario a través del satélite retransmisor. Los enlaces típicos deben ser independientes de las condiciones meteorológicas, y han de tener anchuras de banda de aproximadamente 5 a 6 MHz.

2.2 Factores relativos al equipo

Los factores relativos al equipo que influyen en la calidad de funcionamiento del enlace y cuyas características dependen en cierta medida de la frecuencia, son la potencia del transmisor, la ganancia de la antena y la temperatura de ruido del receptor. De estos tres factores, la ganancia de la antena es función directa del cuadrado de la frecuencia mientras que la potencia del transmisor y el ruido del receptor dependen de manera indirecta de la frecuencia de explotación. Es por ello por lo que se considera la calidad de funcionamiento del equipo uniforme en una amplia gama de frecuencias.

También deben tenerse en consideración los sistemas y equipos espaciales existentes y experimentados al seleccionar las bandas de frecuencias, a fin de lograr conseguir una explotación coherente.

Debido a limitaciones de tipo práctico de los diplexores, los pares de bandas de frecuencias Tierra-espacio y espacio-Tierra deben estar separados por lo menos un 7% para que sea posible el funcionamiento simultáneo en transmisión y recepción utilizando la misma antena.

3. Calidad de funcionamiento del enlace

En el presente anexo se ha tenido en cuenta la influencia de los efectos de propagación en la intensidad de señal y en el ruido del sistema en la ecuación fundamental del enlace, estableciéndose como criterio de selección de frecuencia un indicador de la calidad de funcionamiento del enlace determinado por el cociente entre la potencia de la señal recibida y la densidad espectral de ruido (P_r/N_0).

Los análisis de enlaces presentados a continuación se basan en un diámetro fijo de la antena de la estación terrena y consideran tanto un diámetro fijo, como una anchura de haz fija para la antena de la estación espacial. Se incluye la antena de la estación espacial de diámetro fijo para tener en cuenta el caso en que se utiliza en el vehículo espacial una antena grande y no existen limitaciones de puntería. El caso de anchura de haz fija se incluye para tener en cuenta las situaciones en que la precisión de la puntería de antena determina la anchura de haz mínima, o cuando una antena debe proporcionar una cobertura lo suficientemente ancha como para permitir la comunicación con independencia de la orientación del vehículo espacial, tal como en el caso de un enlace de telemando o de telemedida de emergencia.

En estos análisis, se toman en consideración los efectos de las precipitaciones sólo para frecuencias por debajo de aproximadamente 22 GHz. Los efectos de las precipitaciones por encima de esta frecuencia no se tienen en cuenta porque incluso para intensidades de lluvia bajas, los efectos de las precipitaciones pueden degradar notablemente las comunicaciones en los enlaces transatmosféricos. Por consiguiente, sólo se supone su uso en tiempo claro por encima de 22 GHz. Los resultados se aplican a un ángulo de elevación de 5°, que representa una situación «de caso más desfavorable».

La capacidad máxima de transmisión de datos se obtiene utilizando bandas de frecuencias en las que el cociente P_r/N_0 tiene el valor máximo para las condiciones meteorológicas y las limitaciones de la antena de la estación espacial consideradas. En el cuadro 1 se presentan de manera concisa las bandas de frecuencia preferidas obtenidas a partir de las curvas P_r/N_0 normalizadas que figuran en esta Recomendación. La anchura general de las bandas se determinó tomando las frecuencias correspondientes a los niveles situados aproximadamente 1 dB por debajo de las crestas de las curvas. Al determinar en el cuadro 1 la anchura de las bandas de frecuencias para cualesquiera condiciones meteorológicas, se supuso una elevada intensidad de lluvia, a fin de que los resultados fuesen aplicables en todo el mundo. Las bandas situadas fuera de esa gama pueden ser adecuadas para zonas con intensidades de lluvia inferiores.

3.1 Cálculo de la calidad de funcionamiento del enlace en función de la frecuencia

El indicador de la calidad de funcionamiento del enlace, relación entre potencia recibida y densidad espectral de ruido, viene dado por la ecuación fundamental del enlace:

Error! dB

donde:

P_r : potencia recibida (W)

N_0 : densidad espectral de ruido (W/Hz)

P_t : potencia del transmisor (W)

G_t : ganancia de la antena transmisora

L_s : pérdida en el espacio libre

L_a : pérdida de transmisión debida a la atenuación atmosférica con atmósfera despejada

L_r : pérdida de transmisión debida a la atenuación producida por la lluvia

G_r : ganancia de la antena receptora (dBi)

k : constante de Boltzmann (J/K)

T : temperatura de ruido total del sistema (K).

Suponiendo que no hay pérdida en los guías de onda, T viene dada por:

donde:

T_r : temperatura de ruido del receptor (K)

T_s : contribución del cielo (debida a los efectos de la atmósfera y de las precipitaciones) a la temperatura de ruido de la antena (K)

T_g : contribución del terreno a la temperatura de ruido de la antena (K).

Aislado los términos dependientes de frecuencia en la ecuación (1), dicha ecuación puede escribirse como a continuación se indica para una separación fija entre estaciones espacial y terrena:

Caso 1: Diámetros fijos de las antenas de las estaciones espacial y terrena:

Error! dB

Caso 2: Diámetro fijo de la antena de la estación terrena y abertura angular fija del haz de la antena de la estación espacial:

Error! dB

En las ecuaciones (2) y (3) C y C_1 expresadas en dB, son constantes, y los términos que figuran entre llaves son los términos dependientes de la frecuencia. Cualquier modificación en el valor de la constante aumentará o disminuirá simplemente el valor de la relación P_r / N_0 de las curvas, permaneciendo inalterada la forma de las mismas.

3.2 Aplicación en misiones de investigación espacial cerca de la Tierra

En las figs. 1 y 2 se muestran, respectivamente, las temperaturas de ruido supuestas del sistema y del receptor para las estaciones espacial y terrena. Las temperaturas de ruido se representan como una función en escalera debido a la hipótesis de que la temperatura de ruido del receptor no cambiará de modo significativo con la frecuencia de operación, sino que permanecerá bastante constante en las gamas de frecuencias previstas.

FIGURA 1

Temperatura de ruido supuesta del sistema por satélite

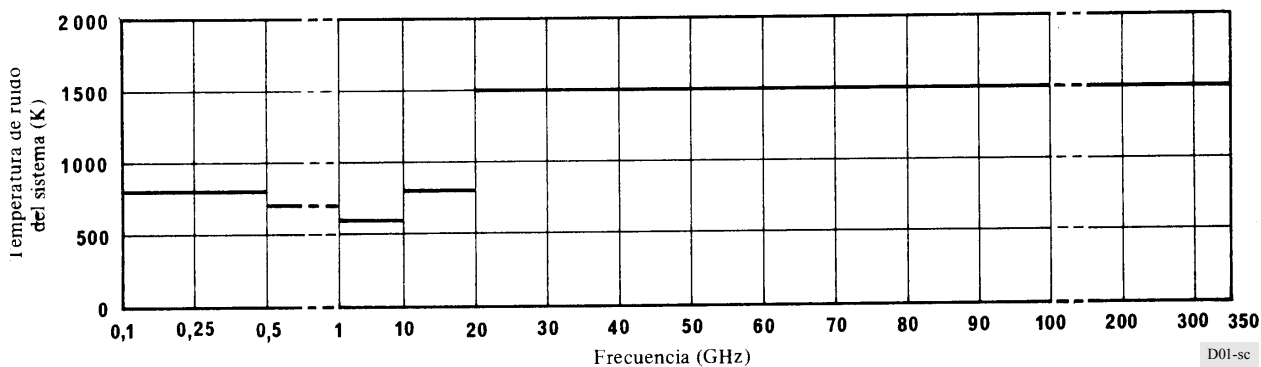
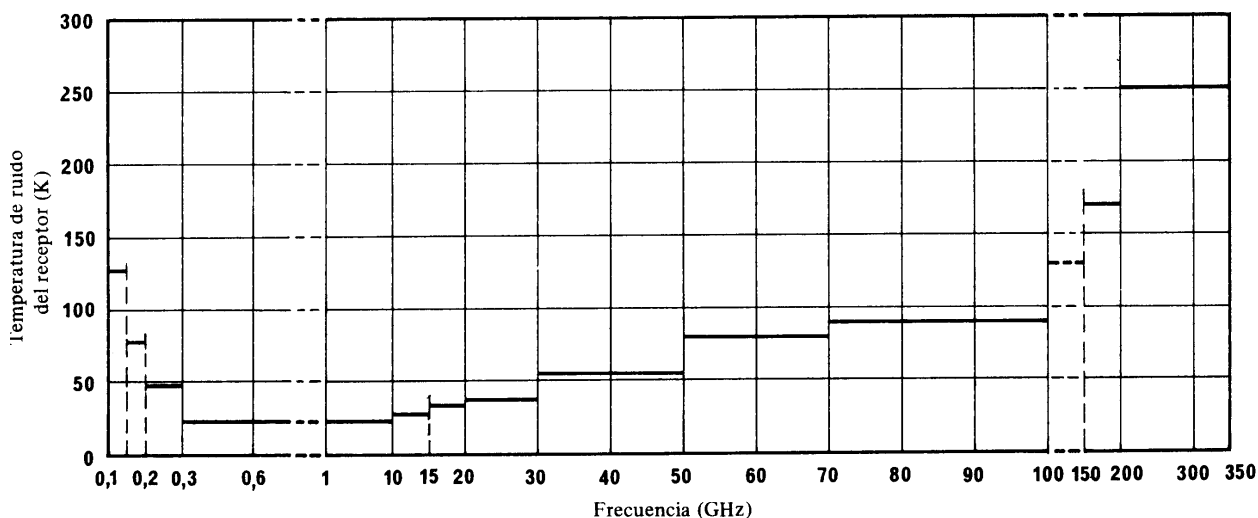


FIGURA 2

Temperatura de ruido supuesta del receptor de la estación terrena

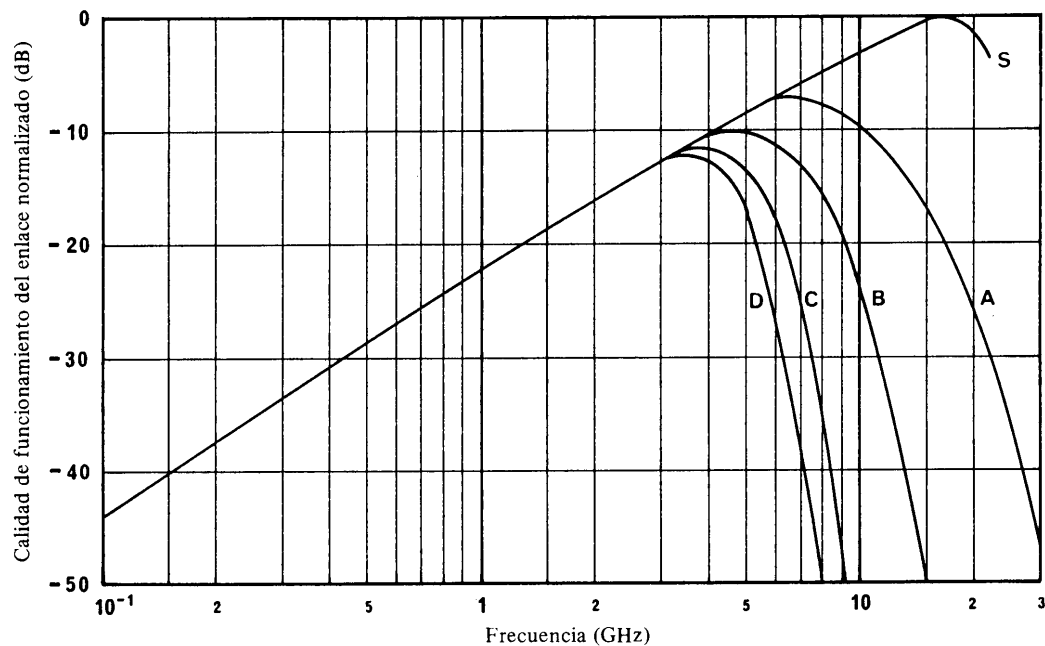


Nota 1 – Los valores incluidos en las figs. 1 y 2 se han sacado de varios documentos técnicos de referencia. Estos valores son típicos de los equipos existentes en las bandas de frecuencias inferiores a aproximadamente 20 GHz y se han obtenido por extrapolación para las bandas superiores a 20 GHz.

Utilizando los datos anteriores, junto con los datos de propagación pertinentes de la Comisión de Estudio 5 y las fórmulas establecidas en el § 3.1, se calculó un conjunto de valores de calidad de funcionamiento del enlace normalizado para la propagación bidireccional a través de la atmósfera y para los dos casos de antena previamente considerados. En las figs. 3 a 6 se ilustran dichos valores para la gama de frecuencias 0,1-22 GHz y, en las figs. 7 a 10, para la gama 22-350 GHz.

FIGURA 3

**Calidad de funcionamiento del enlace normalizado Tierra-espacio.
Antena de diámetro fijo en la estación espacial**



Curvas A: Intensidad de lluvia = 20 mm/h
 B: Intensidad de lluvia = 50 mm/h
 C: Intensidad de lluvia = 100 mm/h
 D: Intensidad de lluvia = 140 mm/h
 S: Atmósfera despejada

D03-sc

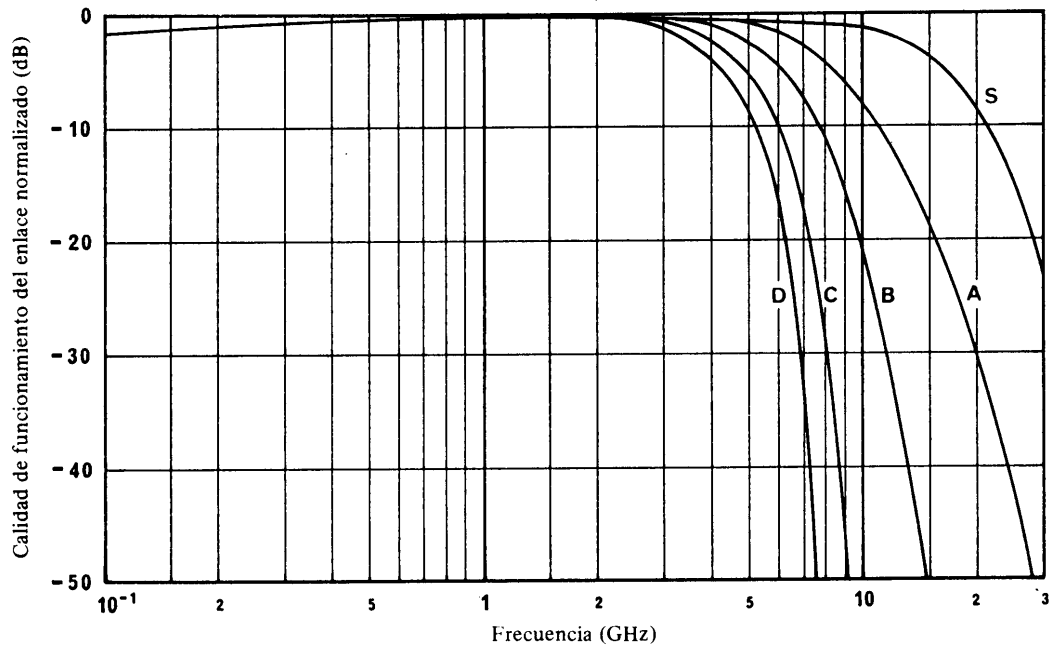
4. Discusión y conclusiones

En cada una de las figs. 3 a 6, se muestra un conjunto de curvas paramétricas para condiciones de precipitación con intensidades de lluvia de 20, 50, 100 y 140 mm/h y para condiciones de cielo despejado. Puede verse que la lluvia tiene un efecto importante en la gama óptima de frecuencias, acortando y desplazando la gama óptima hacia las frecuencias más bajas para las intensidades de lluvia más altas. Para los países situados en regiones de alta intensidad de lluvia, la elección de frecuencias adecuadas es crítica si ha de mantenerse una alta calidad de funcionamiento pese a condiciones atmosféricas adversas. Para la gama de frecuencias 22-250 GHz, las figs. 7 a 10 muestran una serie de curvas de calidad de funcionamiento de enlace normalizado para condiciones de cielo despejado únicamente.

Las características importantes de las curvas de calidad de funcionamiento del enlace son las ubicaciones de los máximos y el efecto de la meteorología en la gama óptima de frecuencias. Esta gama se determinó tomando las frecuencias, a cada lado del máximo de una curva, que corresponden a un valor de calidad de funcionamiento del enlace de aproximadamente 1 dB por debajo del máximo. Una disminución del orden de 1 dB por debajo del máximo de una curva se consideró suficiente para representar una porción relativamente plana de la curva alrededor de su máximo.

FIGURA 4

Calidad de funcionamiento del enlace normalizado Tierra-espacio.
Antena de abertura de haz fija en la estación espacial

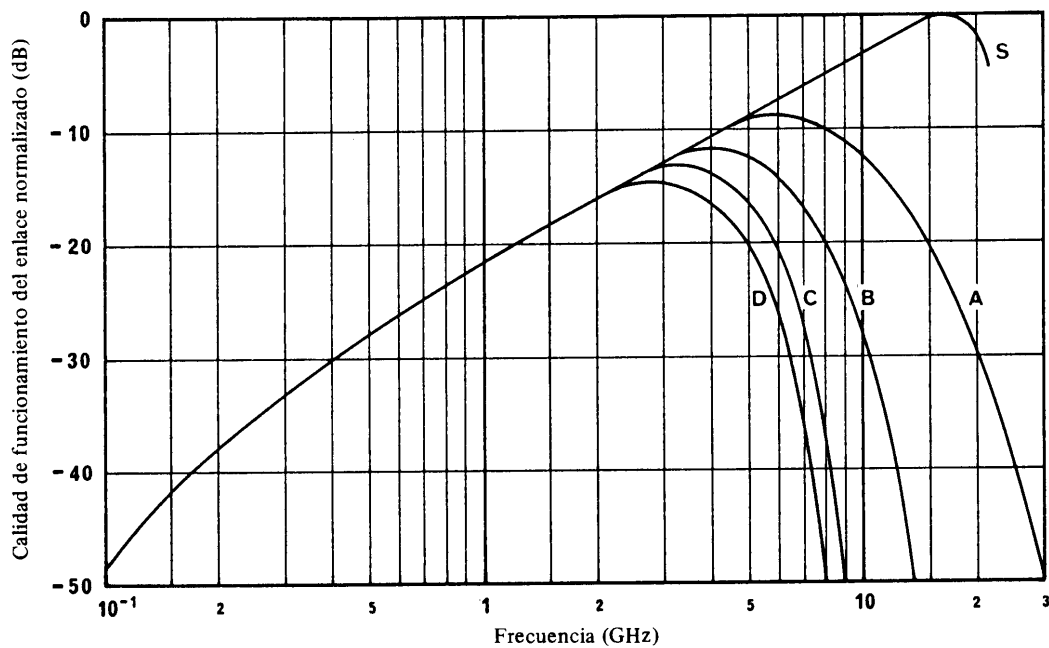


Curvas A: Intensidad de lluvia = 20 mm/h
 B: Intensidad de lluvia = 50 mm/h
 C: Intensidad de lluvia = 100 mm/h
 D: Intensidad de lluvia = 140 mm/h
 S: Atmósfera despejada

D04-sc

FIGURA 5

Calidad de funcionamiento del enlace normalizado espacio-Tierra.
Antena de diámetro fijo en la estación espacial

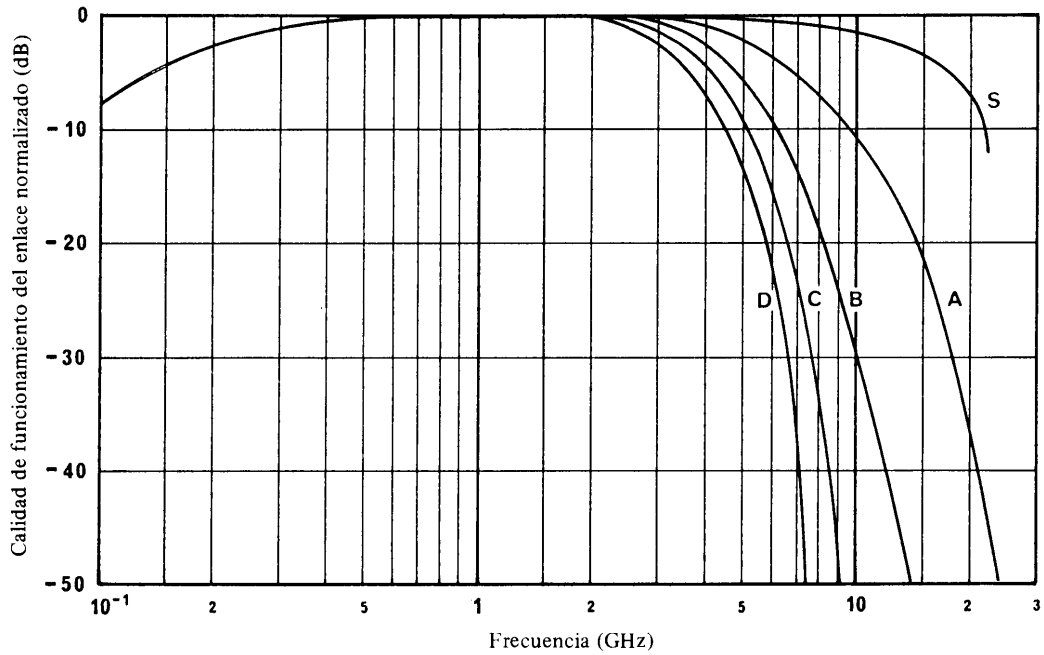


Curvas A: Intensidad de lluvia = 20 mm/h
 B: Intensidad de lluvia = 50 mm/h
 C: Intensidad de lluvia = 100 mm/h
 D: Intensidad de lluvia = 140 mm/h
 S: Atmósfera despejada

D05-sc

FIGURA 6

**Calidad de funcionamiento del enlace normalizado espacio-Tierra.
Antena de abertura de haz fija en la estación espacial**

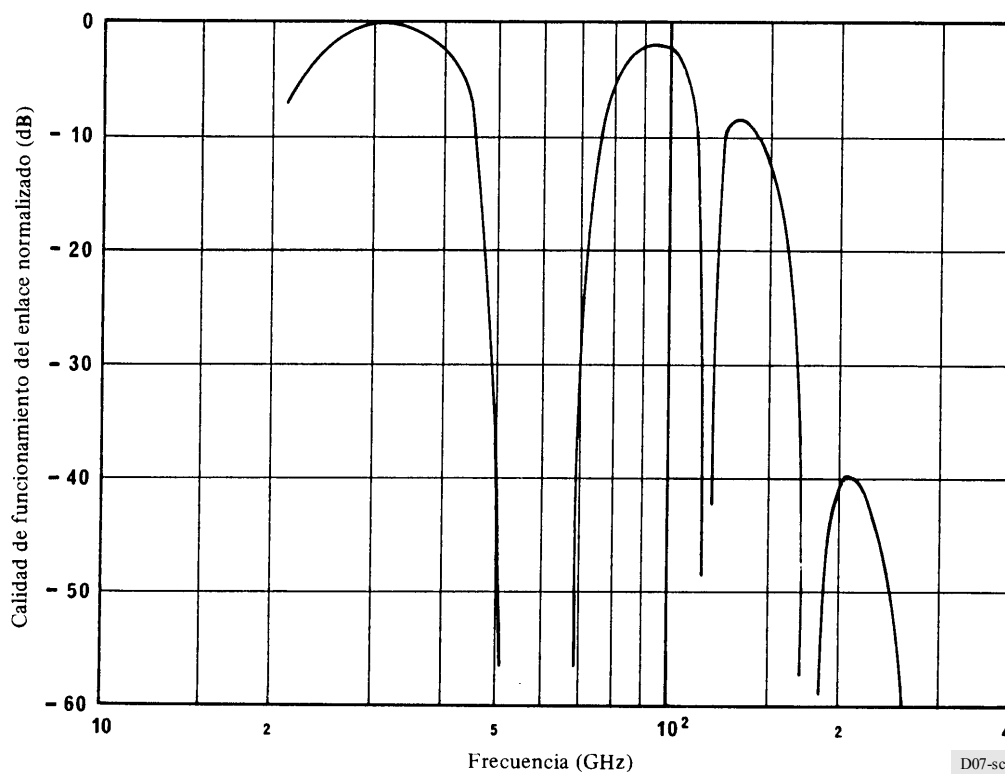


Curvas A: Intensidad de lluvia = 20 mm/h
 B: Intensidad de lluvia = 50 mm/h
 C: Intensidad de lluvia = 100 mm/h
 D: Intensidad de lluvia = 140 mm/h
 S: Atmósfera despejada

D06-sc

FIGURA 7

**Calidad de funcionamiento del enlace normalizado Tierra-espacio.
Antena de diámetro fijo en la estación espacial**



D07-sc

FIGURA 8

Calidad de funcionamiento del enlace normalizado Tierra-espacio.
Antena de abertura de haz fija en la estación espacial

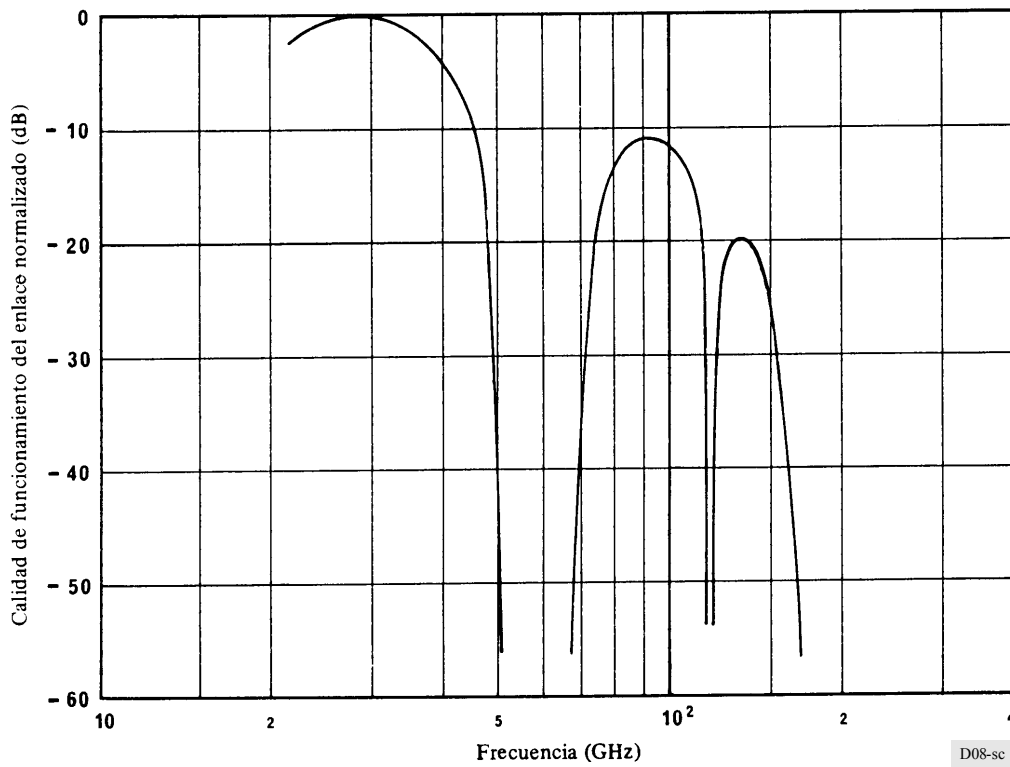


FIGURA 9

Calidad de funcionamiento del enlace normalizado espacio-Tierra.
Antena de diámetro fijo en la estación espacial

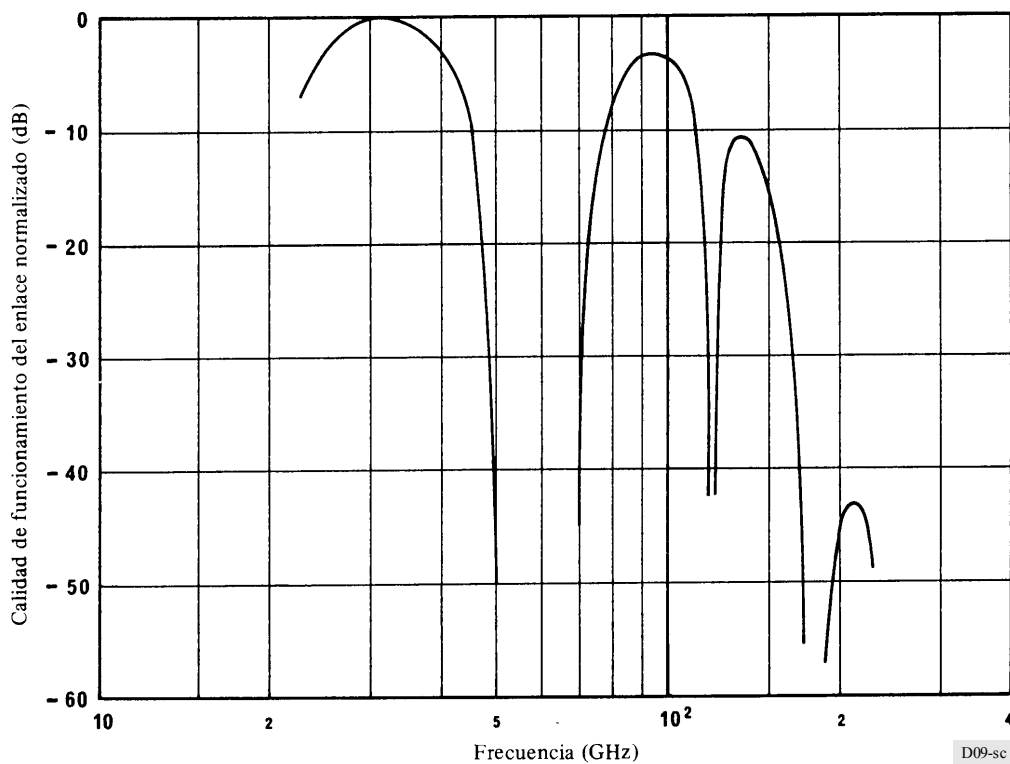
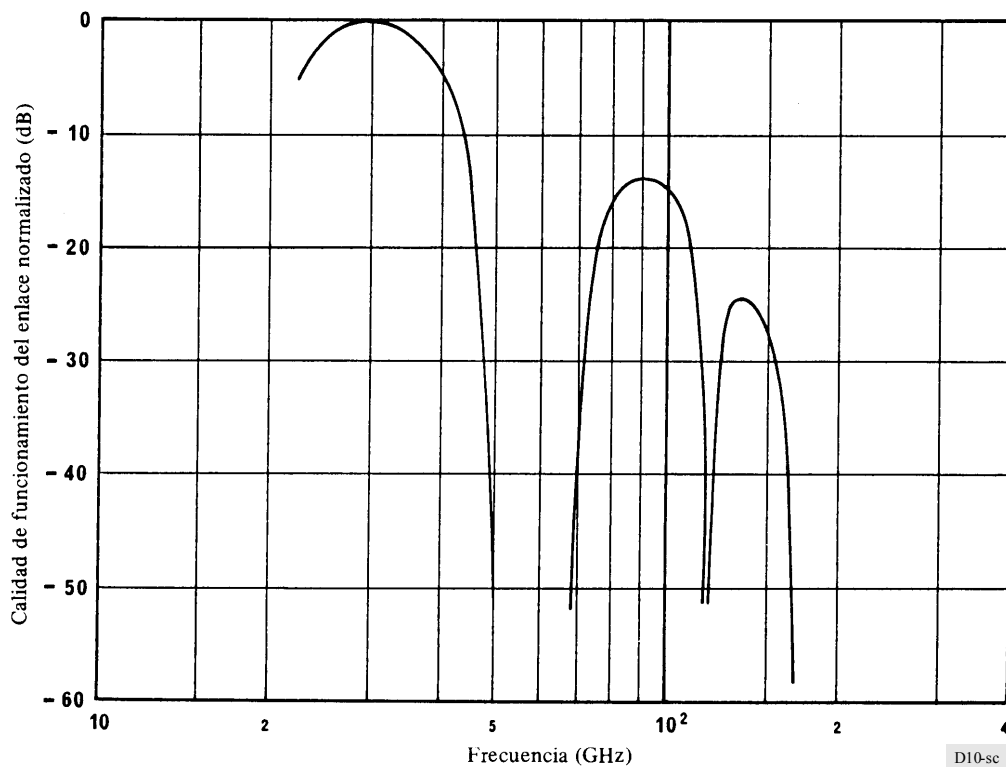


FIGURA 10

**Calidad de funcionamiento del enlace normalizado espacio-Tierra.
Antena de abertura de haz fija en la estación espacial**



La capacidad máxima de velocidad de datos se obtiene utilizando las bandas de frecuencia en que P_r/N_0 es un máximo para las condiciones meteorológicas y las limitaciones de antena de estación espacial consideradas. En el cuadro 1 se resumen las bandas de frecuencia preferidas para varias aplicaciones. Se supuso una alta intensidad de lluvia al determinar la anchura de las bandas de frecuencia en cualesquiera condiciones atmosféricas a fin de que los resultados fuesen aplicables en todo el mundo. Las bandas fuera de esta gama pueden resultar adecuadas para zonas de intensidades de lluvia más bajas.

Los enlaces espacio-espacio funcionan mejor en la gama de frecuencias de alta atenuación atmosférica que elimina prácticamente cualquier problema de interferencia hacia y desde las instalaciones de los sistemas terrenales. Estas gamas, situadas en los espacios entre máximos sucesivos ilustrados en las figs. 7 a 10, corresponden a la región en torno a las crestas de absorción del oxígeno y del vapor de agua.

Por encima de unos 150 GHz, las comunicaciones transatmosféricas están sujetas a un elevado nivel de atenuación de la señal cuando el ángulo de elevación es bajo. Sin embargo, puede tenerse en cuenta la gama de frecuencias superiores a 150 GHz para los enlaces transatmosféricos en los que el ángulo de elevación de explotación no es bajo.

La lista de banda de frecuencias que figura en el cuadro 1 tiene por objeto la identificación de bandas de frecuencias preferidas desde un punto de vista técnico. La inclusión de una banda en el cuadro no significa que la anchura de banda o el margen de enlace disponibles resultarán suficientes. Asimismo, la exclusión de otras frecuencias del cuadro no impide necesariamente el funcionamiento en esas bandas cuando consideraciones relativas a la compartición de frecuencias y limitaciones del equipo actualmente existente impongan su utilización.

La lista de las diferentes anchuras de banda de enlace típicas dada en el cuadro 2 trata de reflejar las anchuras de banda de enlace que permite utilizar la tecnología actual. La inclusión de una anchura de banda de enlace en el cuadro no está destinada a indicar la banda de frecuencias en la que puede exigirse que funcione el enlace en cuestión ni a limitar el número de esos enlaces que puede exigirse que presten apoyo a cualquier misión o vehículo espacial particular.

CUADRO 1

Bandas de frecuencias preferidas y sus utilizaciones

| Banda de frecuencias (GHz) | Dirección | Observaciones |
|---|--|---|
| 0,3-2,5 0,1-3,0 | E-T T-E | Un enlace para cualesquiera condiciones meteorológicas, óptimo incluso cuando las comunicaciones deben establecerse con independencia de la orientación del vehículo espacial |
| 0,3-10 0,1-10 | E-T T-E | Un enlace para atmósfera despejada, óptimo cuando se requiere en el vehículo espacial una antena con abertura angular del haz de valor fijo o elevado |
| 2-4 2-5 | E-T T-E | Un enlace para cualesquiera condiciones meteorológicas, para trabajar con antenas directivas |
| 2-3 13,5-23 | E-E E-E | Bandas necesarias para proporcionar comunicaciones espacio-espacio con tecnología y equipo espacial existente y experimentado. También necesarias para asegurar la continuidad del servicio hasta que se demuestre la utilidad práctica y técnica de otras bandas |
| 12-20 14-20 28-35 27-32 85-100 127-137 | E-T T-E T-E E-T T-E y E-T T-E y E-T | Un enlace para atmósfera despejada, óptimo con antena de ganancia alta o media en el vehículo espacial |
| 54-70 117-120 178-188 318-328 | E-E E-E E-E E-E | Bandas que proporcionan máxima protección a los enlaces espacio-espacio, contra interferencias procedentes de aplicaciones terrenales, en condiciones de atmósfera despejada, óptimas con antenas de vehículo espacial de ganancia alta o media |

CUADRO 2

Anchuras de banda de enlaces individuales típicas y sus utilizaciones

| Utilización | Dirección | Anchura de banda típica | Observaciones |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|--|
| Telemando | T-E | 10-500 kHz | |
| Telemedida de mantenimiento | E-T | 5-500 kHz | |
| Telemedida | E-T (directa) | 100 kHz-100 MHz | Satélite directo hacia la Tierra |
| Telemedida | E-T (relevo) | 225-650 MHz | Satélite relevador a estación terrena, datos procedentes de uno o más satélites de usuario |
| Telemedida | E-E | 5-225 MHz | Satélite de usuario a satélite relevador |
| Telemedida | E-E | > 1 GHz | Satélite relevador a satélite relevador |
| Seguimiento | E-T | 500 Hz-500 kHz | Interferometría |
| Seguimiento | T-E | 1-3 MHz | Sistemas de medida de distancia y de variación de distancia |
| Seguimiento | T-E | 1-10 MHz | Radar |
| Seguimiento | T-E | 5-6 MHz | Determinación bilateral de la distancia |