

RECOMENDACIÓN UIT-R RS.1259*

VIABILIDAD DE LA COMPARTICIÓN ENTRE SENSORES PASIVOS A BORDO DE VEHÍCULOS ESPACIALES Y EL SERVICIO FIJO DE 50 A 60 GHz**

(Cuestión UIT-R 216/7)

(1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las bandas únicas de oxígeno atmosférico se hallan situadas en torno a los 50 a 65 GHz, permitiendo una vigilancia «con cualquier tiempo» de la atmósfera de la Tierra a escala mundial;
- b) que las mediciones de la temperatura a diferentes alturas de la atmósfera utilizando sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales son fundamentales para las previsiones meteorológicas y los estudios del clima (por ejemplo, el del «cambio climático a escala mundial»);
- c) que bastan unos pocos eventos de interferencia no detectados para producir un efecto sumamente perjudicial en la predicción numérica del tiempo;
- d) que las mediciones con precisión suficiente sólo se pueden obtener en sub-bandas de frecuencias precisas de en torno a 50 a 60 GHz debido a los procesos físicos de la espectroscopia del oxígeno;
- e) que el § 1.9.4.3 del orden del día de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (Ginebra, 1997) (CMR-97) se refiere a las atribuciones de frecuencias existentes cerca de 60 GHz y, de ser necesario, la reatribución de las mismas para proteger los sistemas del servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo);
- f) que, en torno a los 55 GHz, el «sondeo» de la temperatura es altamente sensible a la interferencia proveniente de fuentes terrenales;
- g) que las bandas de frecuencias de 50,2-50,4 GHz y 54,25-58,2 GHz son compartidas a título primario con igualdad de derechos entre sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales y el servicio fijo;
- h) que las frecuencias preferidas y las anchuras de banda necesarias para la teledetección pasiva por satélite figuran en la Recomendación UIT-R RS.515;
- j) que se han llevado a cabo intensos estudios sobre la compartición, según se indica de manera resumida en el Anexo 1;
- k) que sería necesario aplicar restricciones al funcionamiento de los enlaces fijos en la banda de 55,2-55,78 GHz, como se detalla en el Anexo 1;
- l) que, dada la alta vulnerabilidad de los sondeos de temperatura pasivos a la interferencia, el cumplimiento estricto de las restricciones en la banda de 55,2-55,78 GHz a nivel mundial resulta fundamental para una protección adecuada de los sensores pasivos;
- m) que la imposición del cumplimiento estricto a escala mundial de las restricciones requeridas no es factible,

recomienda

- 1** que se considere viable la compartición entre sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales y el servicio fijo entre 55,78 GHz y 60 GHz;
- 2** que no se considere practicable la compartición entre sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales y el servicio fijo entre 50 GHz y 55,78 GHz y que los sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales y el servicio fijo no funcionen en la misma banda de frecuencias dentro de esta gama.

* La Comisión de Estudio 7 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación.

** A lo largo de esta Recomendación los «sensores pasivos a bordo de vehículos espaciales» incluyen los sensores a bordo de satélites que funcionan en los servicios de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y los servicios de investigación espacial (pasivo), ya que las características de estos dos servicios son básicamente idénticas en las bandas de frecuencias consideradas.

Compartición entre el servicio fijo y los sensores de teledetección pasiva en la gama de 50,2-58,2 GHz

1 Introducción

El servicio fijo y los servicios de exploración de la Tierra por satélite pasivo y los servicios de investigación espacial (pasivo) tienen atribuciones primarias con igualdad de derechos en las bandas de 50,2-50,4 GHz y 54,25-58,2 GHz. El propósito de este Anexo es examinar la conveniencia de esas atribuciones y, donde sea necesario, establecer límites a aplicar al servicio fijo de modo que se garantice una protección adecuada de los sensores de teledetección pasiva.

La absorción del oxígeno en las gamas de frecuencia que interesan varía considerablemente, con un gran número de líneas de absorción, en torno a los 60 GHz. El nivel de absorción utilizado en los estudios de compartición se ha calculado a partir de la Recomendación UIT-T P.676. Se puede demostrar que el nivel de absorción influye de manera notable en la viabilidad de la compartición. La Fig. 1 muestra la absorción total en un trayecto vertical Tierra-espacio. La absorción en el trayecto suelo-espacio se reduce a medida que aumenta la altura del suelo con respecto al nivel del mar. Los transmisores de enlaces fijos podrían funcionar desde emplazamientos con diversas altitudes. A lo largo de este Anexo se supone, haciendo una estimación conservadora, que los transmisores del servicio fijo se hallan a 1 000 m por encima del nivel del mar.

A las frecuencias relativamente altas que aquí interesan, los efectos de la propagación indirecta pueden constituir un importante mecanismo de propagación. Como caso más desfavorable representativo de los mecanismos de propagación indirecta, los estudios han considerado el de la reflexión desde los tejados de los edificios.

2 Enlaces fijos

En algunos países, los enlaces fijos han estado funcionando en las bandas de 50,2-50,4 GHz y 57,2-58,2 GHz. La máxima potencia de transmisor que se puede conseguir actualmente es de unos -17 dBW. Los parámetros de compartición del servicio fijo se han obtenido a partir de determinados detalles de los sistemas que se utilizan en la actualidad. Para hacer posibles futuros avances en la tecnología de las microondas, se ha supuesto una potencia de transmisor superior a la que puede conseguirse en nuestros días. Los análisis de compartición iniciales han utilizado los parámetros de enlaces fijos que figuran en el Cuadro 1.

CUADRO 1

Parámetros de compartición del servicio fijo

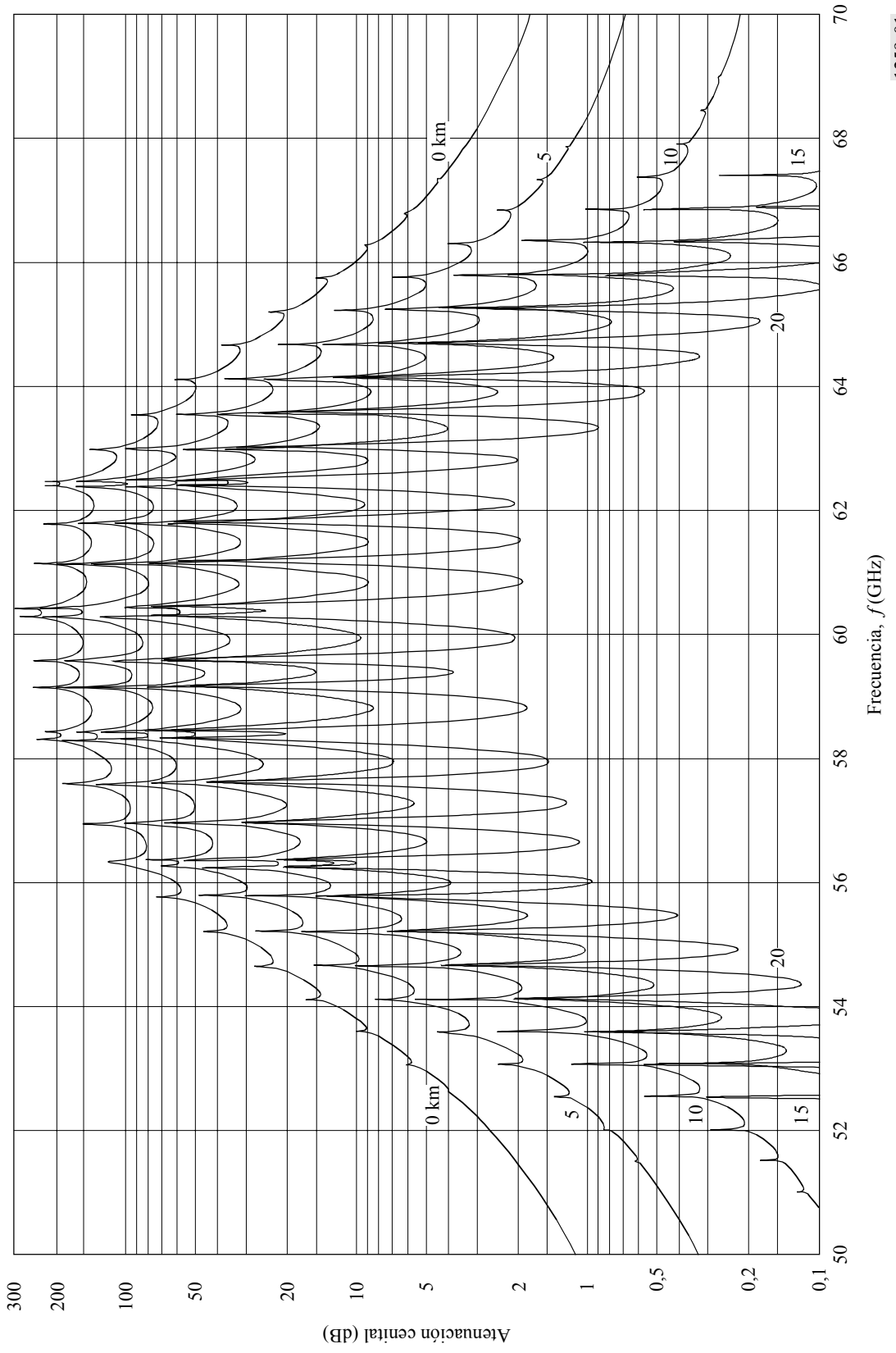
Potencia de transmisor (dBW)	-10
Anchura de banda mínima (MHz)	14
Pérdida de la línea de alimentación (dB)	0
Ganancia de antena (dBi):	
- eje de puntería	41
- 90° con respecto al eje de puntería	-10
Ángulo de elevación de la antena (grados)	0
Altura de la antena con respecto al nivel del mar (m)	1 000

3 Sensores pasivos

3.1 Sistemas actuales y futuros

Varias organizaciones explotan, o están desarrollando, actualmente sensores pasivos que funcionan en las bandas en torno a los 55 GHz. Estos sensores emplean un diseño de exploración mecánica. En la próxima generación de sensores pasivos probablemente se utilice el concepto de exploración por barrido transversal que permite una resolución radiométrica y espacial mejoradas. La utilización del sensor de tipo barrido transversal no está prevista para antes del año 2005.

FIGURA 1
Absorción del oxígeno central para algunas alturas iniciales



3.2 Parámetros de compartición

El sensor de tipo barrido transversal será más susceptible a la interferencia que los sensores de tipo exploración mecánica empleados actualmente. Por ello, en los estudios se ha supuesto un sensor de tipo barrido transversal ficticio. Los parámetros se muestran en el Cuadro 2:

CUADRO 2

Parámetros de compartición de sensor pasivo

Diámetro de la antena (cm)	45
Abertura angular de -3 dB (grados)	1,1
Límites de la exploración (grados)	± 50 (transversal a la trayectoria)
Ganancia de antena (dBi)	45
Resolución radiométrica (K)	0,1
Anchura de la zona explorada (km)	2 300
Tamaño de pixel (nadir) (km)	16 de diámetro
Número de pixels/línea	90
Altitud de la órbita (circular) (km)	850
Inclinación de la órbita (sincronismo solar) (grados)	98,8

3.3 Criterio de interferencia

La Recomendación UIT-R RS.1029 describe los criterios de interferencia para sensores de teledetección pasiva por satélite. Para sensores de barrido transversal que funcionan en la gama de 50 a 66 GHz, el nivel de interferencia admisible es de -166 dBW en una anchura de banda de referencia de 100 MHz. Dadas las importantes consecuencias que tiene cualquier interferencia para los usuarios de los datos obtenidos en estas bandas, los estudios de compartición que siguen se basan en el no rebasamiento del límite en las células de medición.

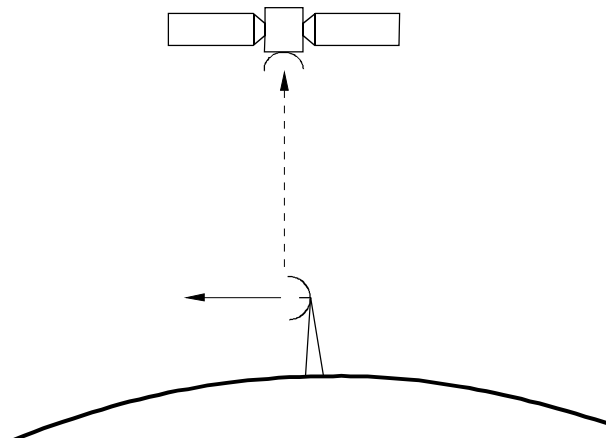
4 Análisis de la compartición

4.1 Análisis preliminar

Si se supone que los enlaces fijos van a funcionar con un ángulo de elevación de antena de alrededor de 0° , el trayecto de interferencia directa del caso más desfavorable es el trayecto cenital del enlace fijo al trayecto, como se muestra en la Fig. 2.

FIGURA 2

Trayecto de interferencia directa del caso más desfavorable



La absorción del oxígeno en el trayecto cenital, a partir de una altura inicial de 1 000 m, varía de 1,3 dB a 50,2 GHz a más de 100 dB a 58,2 GHz. Las bandas consideradas en esta Recomendación se dividen en varias ranuras (como se muestra en el Cuadro 3), definidas por los límites de las bandas de frecuencias compartidas y las crestas de la absorción cenital. En cada ranura, se utiliza la absorción atmosférica mínima para determinar la máxima potencia radiada verticalmente desde la Tierra y, a partir de ese dato, el número máximo de interferidores en el mismo canal.

CUADRO 3

Número máximo de transmisores cocanal

Número de ranura	1	2	3	4	5	6	7	8
Gama de frecuencias (GHz)	50,2-50,4	54,25-54,67	54,67-55,22	55,22-55,78	55,78-56,26	56,26-56,36	56,36-56,96	56,96-57,20
Potencia máxima del transmisor del enlace fijo (dBW)	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
Ganancia de antena del enlace fijo (cenit) (dBi)	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10
p.i.r.e. máxima del enlace fijo hacia el cenit (dBW)	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Frecuencia de absorción mínima (GHz)	50,2	54,25	54,74	55,31	55,89	56,29	56,57	57,19
Altitud del satélite (km)	850	850	850	850	850	850	850	850
Pérdida en el espacio libre (dB)	185,0	185,7	185,8	185,9	186,0	186,0	186,1	186,2
Absorción del oxígeno desde 1 000 m (dB)	1,3	12,8	20,3	32,2	50,5	79,3	71,1	86
Ganancia de antena del sensor (dBi)	45	45	45	45	45	45	45	45
Anchura de banda del canal del sensor (MHz)	15	15	15	15	15	15	15	15
Umbral de interferencia en 100 MHz	-166,0	-166,0	-166,0	-166,0	-166,0	-166,0	-166,0	-166,0
Densidad umbral (dB(W/15 MHz))	-174,2	-174,2	-174,2	-174,2	-174,2	-174,2	-174,2	-174,2
p.i.r.e. máxima desde el suelo (dB(W/15 MHz/pixel))	-32,9	-20,7	-13,1	-1,2	17,2	46,1	37,9	52,9
p.i.r.e. vertical transmitida por enlace fijo (dB(W/15 MHz))	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7	-19,7
Margen (dB)	-13,2	-1,0	6,6	18,5	36,9	65,8	57,6	72,6
Número máximo de enlaces fijos por canal de sensor y por pixel	0	0	4	71	4 940	3 801 943	581 186	18 356 222

Para determinar la viabilidad de la compartición, hay que tener en cuenta la probabilidad de que el número de transmisores de enlace fijo en un mismo canal dentro de un pixel de 16 km de diámetro y en una anchura de banda de 15 MHz sobrepase las cifras que se indican en el Cuadro 3:

- en las ranuras 1 y 2, un solo transmisor podría provocar un alto nivel de interferencia. Por ello, la compartición no parece viable;
- en la ranura 3, sólo harían falta unos pocos transmisores en un mismo canal para rebasar el umbral de interferencia, por lo que la compartición no parece viable;
- en la ranura 4, podría funcionar un número razonable de enlaces fijos, especialmente si se emplean potencias de transmisor bajas;
- en las ranuras 5 a 8, podría funcionar un número sumamente elevado de enlaces fijos, con lo que la compartición resulta factible.

En el § 4.2 se presenta un estudio de la compartición más detallado para determinar, con mayor precisión, la viabilidad de la compartición en la banda de 55,22-55,78 GHz.

4.2 Análisis detallado de la compartición en la banda de 55,2-55,78 GHz

En este punto se hace un análisis más detallado de la potencia del transmisor de los enlaces fijos, la densidad máxima de enlaces a la que puede llegarse, los efectos de la propagación indirecta y el efecto que tiene un ángulo de elevación de antena del enlace fijo superior a 0° .

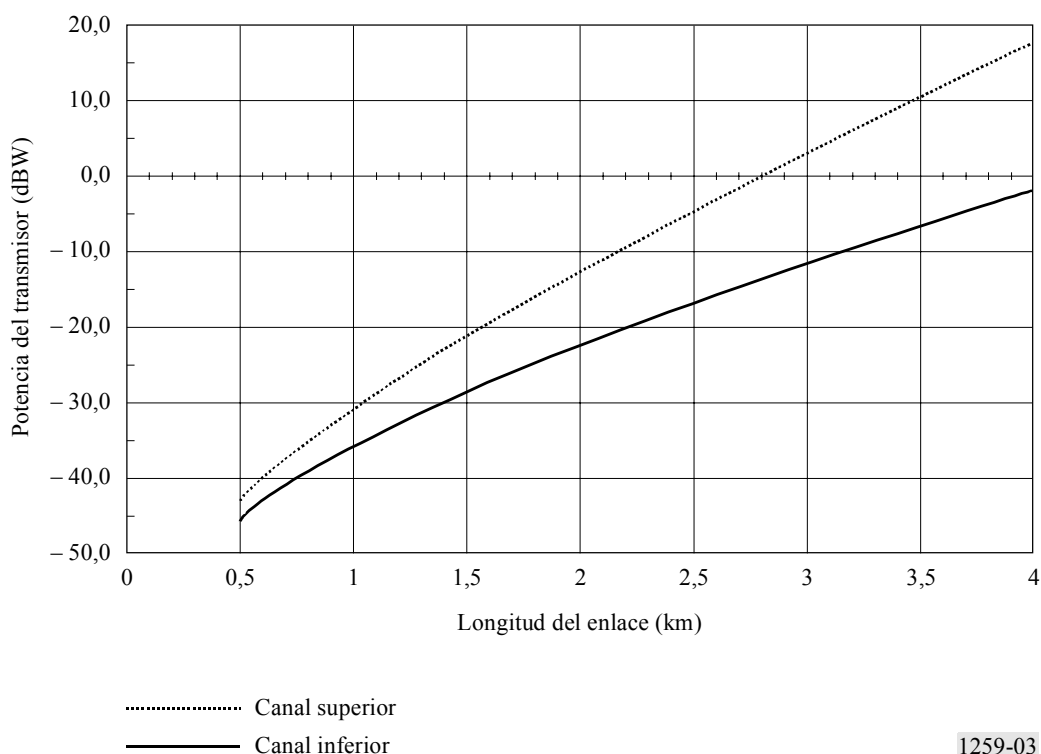
Se puede considerar que la banda es de 55,20-55,78 GHz, ya que la absorción cenital mínima es la misma que para la banda de 55,22-55,78 GHz.

4.2.1 Potencia máxima de enlace fijo

El plan de canales de enlaces fijos existente para esta banda, que figura en la Recomendación UIT-R F.1100, comprende la banda de 54,25-57,2 GHz, por lo que se utilizó un plan teórico revisado. Dicho plan se basó en la banda de 55,2-57,2 GHz con una banda de guarda inferior de 68,5 MHz, un intervalo central de 70 MHz y una separación dúplex de 966 MHz.

Las bandas de enlaces fijos están dispuestas en dos mitades, de tal manera que un canal de «ida» en la mitad inferior se halla siempre asociado a un canal de «retorno» en la mitad superior. Los cálculos del balance del enlace basados en parámetros de equipo típicos muestran que un nivel de potencia de -10 dBW da lugar a un límite superior de ~ 2 km en la longitud del enlace, debido al alto nivel de atenuación en la mitad superior de la banda. La potencia del transmisor requerida para abarcar esta distancia en la mitad inferior de la banda es de $-23,3$ dBW (si se permiten 3 dB de pérdidas de línea de alimentación en cada extremo), debido a la atenuación reducida. La Fig. 3 muestra la potencia del transmisor necesaria para diversas longitudes de enlace.

FIGURA 3
Potencia del transmisor en función de la longitud del enlace



1259-03

4.2.2 Densidad máxima de enlaces fijos

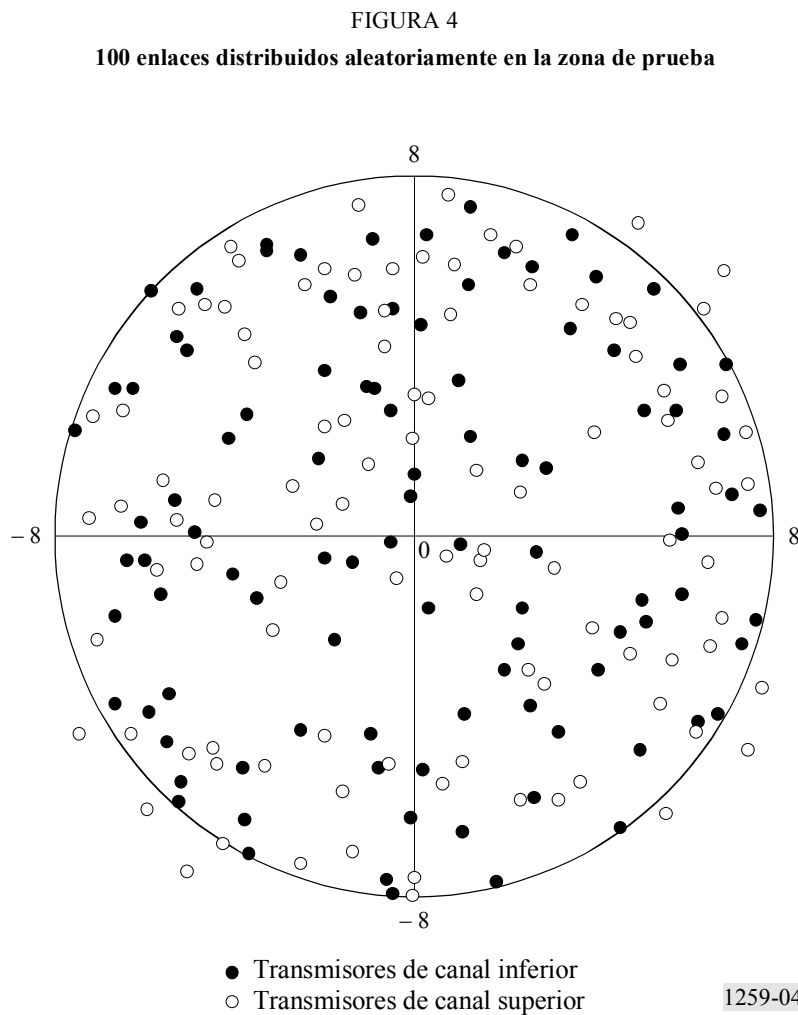
Se ha llevado a cabo una simulación para determinar el número máximo teórico de enlaces fijos que podrían instalarse en un zona de 16 km de diámetro. Los únicos criterios utilizados se basaron en la interferencia hacia y desde los enlaces fijos del entorno circundante. De esta manera se modeló la situación en la que los usuarios podrían instalar enlaces sin tener en cuenta ningún límite de densidad impuesto.

4.2.2.1 Metodología de la simulación

Las posiciones, longitudes y direcciones de los enlaces se eligieron al azar pero limitados por una longitud máxima de enlace de 2 km. La simulación utilizó un modelo de propagación con pérdida de trayecto en el espacio libre. El umbral de interferencia con un solo interferidor se fijó en una relación I/N de -10 dB.

En el proceso de simulación se situaron enlaces en la zona de prueba. Con cada enlace se comprobó la interferencia que provocaba en los otros enlaces y la que recibía de ellos, confirmando el nuevo enlace cuando los niveles de interferencia estaban por debajo del umbral y considerándolo fallido cuando dichos niveles se encontraban por encima del umbral. Este proceso continuó hasta que se produjo un número predeterminado de enlaces fallidos. En este punto se consideró que se había alcanzado la densidad máxima de enlaces en la práctica para la zona de prueba, por lo que se refiere a la interferencia de enlace a enlace.

El número máximo de enlaces fallidos se fijó en 20 y la simulación se efectuó varias veces. En cada caso, el número de enlaces fijos atribuidos en la zona de prueba fue de unos 100 a 120 enlaces confirmados satisfactoriamente. La Fig. 4 es una representación gráfica de cómo una de las simulaciones confirmó de manera satisfactoria un centenar de enlaces en la zona de prueba.



Una banda en la que hayan fallado 20 enlaces de 21 intentos se considera que está llena. Así pues, una cifra estimada de unos 150 enlaces parece ser la densidad máxima teórica de enlaces bidireccionales de este tipo en la zona de prueba. La Fig. 4 avala esta estimación ya que, según muestra, apenas hay sitio en la zona de prueba para más transmisores dentro de la banda, una vez que ya se ha confirmado un centenar de ellos.

En la práctica, incluso esta cifra sería muy difícil de alcanzar en una situación real de asignaciones. Los enlaces tienden a agruparse en torno al centro de las ciudades, en donde se acaban alcanzando los límites de congestión, mientras que otras zonas del pixel permanecen relativamente vacías. Ulteriores reducciones de la densidad teórica podrían producirse como consecuencia de:

- enlaces en el mismo canal fuera del pixel;
- enlaces por canales adyacentes;
- instalación nodal de los enlaces.

4.2.2.2 Obtención de los límites

Se puede considerar que 150 enlaces es una estimación conservadora de la densidad máxima de enlaces fijos en el mismo canal. La p.i.r.e. máxima desde el suelo es de $-1,2$ dB(W/15 MHz/pixel) (véase el Cuadro 3). Dividiendo esta cifra por 150 y escalando a diversas anchuras de banda se obtienen los límites indicados en el Cuadro 4.

CUADRO 4

p.i.r.e. máxima vertical

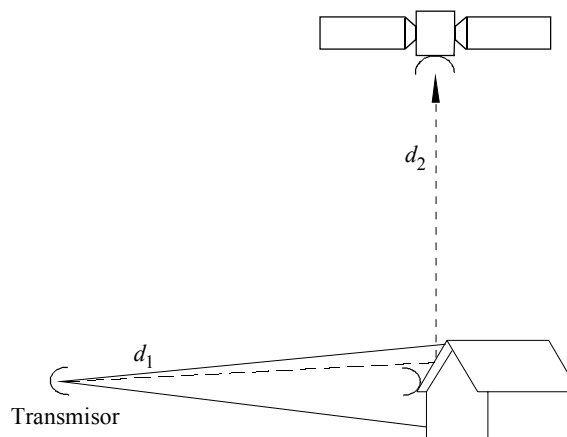
p.i.r.e. máxima hacia el cenit	$-23,0$ dB(W/15 MHz)
	$-13,3$ dB(W/140 MHz)
	$-23,3$ dB(W/14 MHz)
	$-34,7$ dB(W/MHz)

Aplicando este límite de p.i.r.e. vertical a cada transmisor de enlace fijo en la banda de 55,2-55,78 GHz y teniendo en cuenta que el número máximo previsible de transmisores en el mismo canal es de 150, se puede tener la seguridad de que la interferencia por propagación directa no va a rebasar el umbral del sensor y de que es posible un funcionamiento sin obstáculos de los enlaces fijos.

4.2.3 Efectos de la propagación indirecta

Como caso más desfavorable representativo del efecto de la propagación indirecta se considera el de la reflexión de un tejado, que se ilustra en la Fig. 5. Se supone que el tejado tiene una elevación de 45° y que la normal del tejado y el rayo incidente se hallan en un plano vertical. Para polarización vertical, la reflexión especular desde el tejado puede tener un coeficiente de reflexión, σ , de hasta -10 dB. A las frecuencias que aquí se consideran, el tamaño de la zona de Fresnel proyectada sobre un tejado tendrá normalmente unos pocos metros de ancho, por lo que es posible obtener reflexión especular de un haz de enlace fijo con un coeficiente de reflexión de -10 dB. Se supone que se produce reflexión de Fresnel total y que el haz incidente es reflejado verticalmente y recibido por el sensor de satélite que está encima.

FIGURA 5
Reflexión de tejado



El efecto de estas reflexiones podría ser más importante que la interferencia directa considerada más arriba. No obstante, tales alineaciones probablemente sean excepcionales.

A la frecuencia de 55,22 GHz, la atenuación específica a nivel del mar es de 4,5 dB/km. Para valores pequeños de d_1 , se puede pasar por alto la pérdida geométrica y por absorción en el trayecto d_1 .

La p.i.r.e. máxima viene dada entonces por:

$$p.i.r.e.máx = I_{th} - \sigma + 20 \log \left[\frac{4\pi d_2}{\lambda} \right] + \gamma_2 - G_s \quad (1)$$

donde:

I_{th} : umbral de interferencia
= -166 dB(W/100 MHz)

γ_2 : absorción del gas mínima
= 32,2 dB (1 000 m de altitud)

G_s : ganancia de antena del sensor de teledetección
= 45 dBi.

Escalando a diversas anchuras de banda, se obtienen los siguientes límites de p.i.r.e. indicados en el Cuadro 5.

CUADRO 5

p.i.r.e. máxima de enlace fijo

p.i.r.e. máxima	8,8 dB(W/15 MHz)
	18,5 dB(W/140 MHz)
	8,5 dB(W/14 MHz)
	-2,9 dB(W/MHz)

Teniendo presente la baja probabilidad de tales alineaciones, cabe confiar en que, con la aplicación de estos límites de p.i.r.e. a cada transmisor del servicio fijo, el sensor pasivo no sufrirá una interferencia inaceptable provocada por mecanismos de propagación indirecta. Esos límites permitirían que la longitud de la máxima llegara a ser de aproximadamente 1,5 km.

4.2.4 Efecto del ángulo de elevación de la antena de enlace fijo

Los sensores de teledetección exploran $\pm 50^\circ$ a partir del nadir siguiendo un esquema transversal a la trayectoria. En el límite de la exploración, el haz incide en la superficie de la Tierra con un ángulo de elevación de 30° . Normalmente, la pérdida de trayecto incrementada y la absorción en el trayecto oblicuo dan como resultado un nivel de interferencia más bajo que en el trayecto cenit/nadir. Si, no obstante, una antena de enlace fijo tuviera un gran ángulo de elevación, la interferencia en el trayecto oblicuo podría rebasar la interferencia en el trayecto cenit/nadir.

Es posible determinar el ángulo de elevación al que la interferencia por trayecto b) supera la interferencia por trayecto a), que se muestran en la Fig. 6.

Considérese un enlace a 1 000 m de altitud que transmite con una frecuencia de 55,22 GHz. Para el trayecto cenit/nadir, la pérdida en el espacio libre, FSL_a , es de 185,9 dB y la absorción del gas mínima, γ_a , es de 32,2 dB. Para el trayecto oblicuo, la pérdida en el espacio libre, FSL_b , es de 190,7 dB y la absorción del gas, γ_b , es de 63,9 dB.

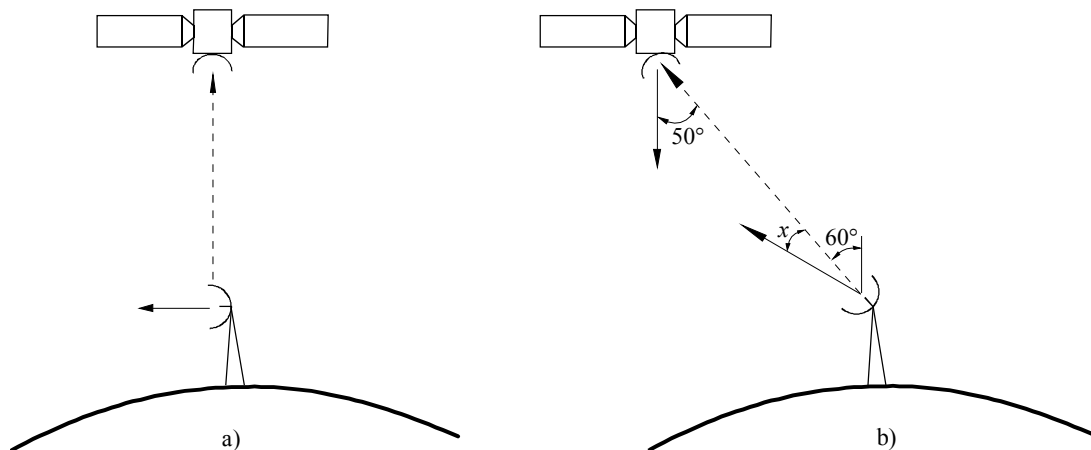
Si la potencia del transmisor del enlace fijo es P_T , la ganancia de antena del enlace fijo con un ángulo ϕ es $G(\phi)$, y la ganancia de antena del sensor del satélite es G_S , la interferencia causada en cada alineación viene dada por:

$$I_b = P_T + G(x) - FSL_b - \gamma_b + G_S \quad (2)$$

y

$$I_a = P_T + G(90) - FSL_a - \gamma_a + G_S \quad (3)$$

FIGURA 6
Trayecto cenit/nadir a) y trayecto oblicuo b)



1259-06

Igualando I_a a I_b se obtiene:

$$G(x) = G(90) - FSL_a + FSL_b - \gamma_a + \gamma_b \quad (4)$$

En el caso de una antena típica de alto rendimiento que funcione en esta banda, se puede suponer que $G(90) = -10$ dBi. De este modo:

$$G(x) = 26,5 \text{ dBi}$$

Con ángulos que no se aparten más de 5° respecto al eje de puntería, es posible prever una ganancia de antena de 26,5 dBi. Así pues, si el ángulo entre el eje de puntería de la antena del terminal del enlace fijo y el rayo hacia la antena del satélite es superior a 5° , se puede tener la seguridad de que la interferencia por el trayecto a) supera a la interferencia por el trayecto b).

Puesto que el haz del sensor del satélite incide en la Tierra con una elevación mínima de 30° , estableciendo un límite al ángulo de elevación de la antena de 25° se tiene la garantía de que la interferencia directa no supera el nivel supuesto en el análisis de interferencia directa del § 4.2.1.

5 Conclusiones

Las conclusiones pueden establecerse banda por banda:

50,2-50,4 GHz	La compartición no es viable
54,25-55,2 GHz	La compartición no es viable
55,2-55,78 GHz	La compartición es viable con las siguientes restricciones: p.i.r.e. máxima: $-2,9$ dB(W/MHz) p.i.r.e. máxima hacia el cenit: $-34,7$ dB(W/MHz) ⁽¹⁾ Ángulo de elevación máximo: 25°
55,78-58,2 GHz	La compartición es viable sin restricciones en el servicio fijo

⁽¹⁾ Si se supone que no hay más de 150 canales en un mismo canal por pixel (16 km de diámetro), puede funcionar debido a la interferencia intraservicios.

Las restricciones en la banda de 55,2-55,78 GHz permitirían que el servicio fijo funcionara con una longitud del enlace máxima de aproximadamente 1,5 km.

Debido a la vulnerabilidad de la teledetección pasiva a la interferencia, las restricciones anteriores en la banda de 55,2-55,78 GHz se han de observar estrictamente en toda la superficie de la Tierra. La posibilidad de asegurar un estricto cumplimiento de estas restricciones a escala mundial es algo que provoca serias dudas.

