

RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1046-1

**DEFINICIÓN DE LA EFICACIA EN LA UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO
POR UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES**

(Cuestión UIT-R 47/1)

(1994-1997)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el espectro es un recurso natural limitado de gran valor económico y social;
- b) que la demanda de utilización del espectro está creciendo rápidamente;
- c) que existen diversos factores, tales como utilización de distintas bandas de frecuencias para determinados servicios de radiocomunicaciones, métodos de gestión del espectro pertinentes para las redes de dichos servicios, características técnicas de los transmisores, receptores y antenas empleados en los servicios, etc., que influyen de forma notable en la utilización eficaz del espectro y la optimización de dichos factores, especialmente mediante tecnologías nuevas o mejoradas, puede traducirse en importantes economías de espectro;
- d) que es necesario definir el grado y la eficacia de utilización del espectro (EUE) como método de comparación y análisis para evaluar las ventajas obtenidas con el empleo de tecnologías nuevas o mejoradas, especialmente por las administraciones en la planificación nacional a largo plazo de la utilización del espectro y el desarrollo de las radiocomunicaciones;
- e) que la comparación de la utilización eficaz del espectro entre sistemas de radiocomunicaciones reales sería muy útil a la hora de desarrollar tecnologías nuevas o mejoradas y de evaluar el comportamiento de los sistemas existentes,

recomienda

- 1** que, como concepto básico, se utilice el dominio combinado anchura de banda-espacio-tiempo como medida de la utilización del espectro, el «factor de utilización del espectro», como se indica en el Anexo 1 para los equipos radioeléctricos de transmisión y recepción;
- 2** que, como concepto básico, se mida la EUE, o la eficacia espectral de manera más breve, como la relación entre el volumen de información transferida a una distancia (o comunicaciones establecidas) y el factor de utilización del espectro, como se indica en el Anexo 1. En el Anexo 2 aparecen algunos ejemplos de utilización de este concepto;
- 3** que, para comparar las eficacias espectrales entre diversos sistemas de radiocomunicaciones, se utilice el concepto básico de eficacia relativa del espectro como se indica en el Anexo 1;
- 4** que las comparaciones entre las eficacias espectrales se lleven a cabo únicamente entre tipos similares de sistemas radioeléctricos que proporcionan servicios de radiocomunicaciones idénticos, como se indica en el § 4 del Anexo 1;
- 5** que para determinar la EUE se consideren las interacciones de diversos sistemas y redes de radiocomunicaciones dentro de un entorno electromagnético particular.

ANEXO 1

**Criterios generales para evaluar el factor de utilización del espectro
y grado de eficacia de utilización****1 Factor de utilización del espectro**

La utilización eficaz del espectro se logra (entre otros métodos) mediante el aislamiento obtenido gracias a la directividad de la antena, la separación geográfica, la compartición de frecuencias o la utilización de frecuencias ortogonales y la compartición en el tiempo o división en el tiempo, reflejándose estas consideraciones en la definición de

utilización del espectro. Por consiguiente, la medida de utilización del espectro, factor de utilización del espectro, U , se define como el producto de la anchura de banda de frecuencia por el espacio geométrico (geográfico) y por el tiempo denegado a otros usuarios potenciales:

$$U = B \cdot S \cdot T \quad (1)$$

siendo:

B : anchura de banda de frecuencia

S : espacio geométrico (normalmente una superficie)

T : tiempo.

El espacio geométrico de interés también puede ser un volumen, una línea (por ejemplo, la órbita de los satélites geoestacionarios) o un sector angular alrededor de un punto. La cantidad de espacio denegado depende de la densidad espectral de potencia. En muchas aplicaciones, la dimensión del tiempo puede ignorarse puesto que el servicio funciona de manera continua. Pero en algunos servicios, por ejemplo, radiodifusión y servicio móvil por un solo canal, es importante compartir el factor tiempo y los tres factores deben considerarse de forma simultánea y optimizarse.

La medida del espectro puede calcularse multiplicando la anchura de banda que limita la emisión (por ejemplo, la anchura de banda ocupada) por su zona de interferencia, o puede tener en cuenta la forma real de la densidad espectral de potencia de la emisión y las características de radiación de la antena.

Tradicionalmente, se han considerado a los transmisores radioeléctricos como los usuarios del recurso espectro. Utilizan el espectro-espacio llenando parte del mismo con potencia radioeléctrica; tanta potencia, en algunos casos, que los receptores de otros sistemas no pueden funcionar en ciertas ubicaciones, horas y frecuencias debido a la aparición de interferencia inaceptable. Cabe señalar que los transmisores niegan el espacio únicamente a los receptores. El simple hecho de que en el espacio haya potencia no impide en modo alguno a otro transmisor emitir potencia en la misma ubicación; es decir, un transmisor no impide el funcionamiento de otro transmisor.

Los receptores utilizan el espectro-espacio porque lo niegan a los transmisores. El simple funcionamiento físico del receptor no provoca ninguna interferencia (salvo si actúa de forma inopinada como transmisor o fuente de potencia). Aún en ese caso, el espacio utilizado físicamente es relativamente pequeño. Sin embargo, las autoridades niegan licencias de explotación a los transmisores a fin de garantizar la recepción libre de interferencias. La protección puede ser en espacio (distancia de separación, distancia de coordinación), en frecuencia (bandas de guarda) o incluso en tiempo (en Estados Unidos de América, algunas estaciones de radiodifusión en ondas hectométricas tienen limitado su funcionamiento en horas diurnas). Esta denegación constituye la «utilización» del espacio por parte del receptor. Las bandas de radioastronomía son un ejemplo típico de reconocimiento de utilización del espacio espectral por el receptor.

Una forma de incorporar estas circunstancias a una unidad de medida del espectro-espacio es dividir el recurso en dos espacios, el espacio del transmisor y el espacio del receptor, y definir unidades duales para medir la utilización de cada uno de ellos. Cuando la sencillez sea el factor más importante, ambas unidades pueden recombinarse en una sola medida para utilización del sistema.

En el Capítulo 6 del Manual sobre Gestión nacional del espectro (Ginebra, 1995) aparece más información relativa al método general de cálculo del factor de utilización del espectro.

2 Eficacia de utilización del espectro (EUE)

De acuerdo con su definición, la EUE (o eficacia del espectro como término abreviado) de un sistema de radiocomunicaciones puede expresarse por la fórmula siguiente:

$$EUE = \frac{M}{U} = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} \quad (2)$$

siendo:

M : cantidad de información transferida a una cierta distancia.

3 Eficacia relativa de utilización del espectro (ERE)

El concepto de ERE puede utilizarse para comparar las eficacias espectrales de dos tipos similares de sistemas de radiocomunicaciones que proporcionen el mismo servicio.

Esta eficacia relativa se define como la relación entre dos eficacias espectrales, una de las cuales puede ser la eficacia de un sistema utilizado como patrón de comparación. Es decir,

$$ERE = EUE_r / EUE_p \quad (3)$$

siendo:

ERE : eficacia relativa del espectro, es decir la relación entre las EUE

EUE_p : eficacia de utilización del espectro de un sistema «patrón»

EUE_r : eficacia de utilización del espectro de un sistema real.

Los candidatos más adecuados para un sistema patrón son los siguientes:

- el sistema más eficaz teóricamente,
- un sistema que puede ser definido y comprendido fácilmente,
- un sistema ampliamente utilizado que constituya, de hecho, un patrón en la industria.

La ERE será un número positivo con valores entre cero e infinito. Si el sistema patrón elegido es el sistema más eficaz teóricamente, la ERE variará normalmente entre cero y uno.

A modo de ejemplo, el sistema teóricamente más eficaz puede caracterizarse de acuerdo con los principios de la teoría de la información. La capacidad de comunicación de un canal de comunicaciones a través del cual un abonado o un oyente recibe la comunicación deseada viene determinada por la relación:

$$C_0 = F_0 \ln(1 + \rho_0)$$

siendo:

F_0 : anchura de banda de la comunicación deseada

ρ_0 : relación señal ruido a la salida del receptor.

Si esta relación señal/ruido a la entrada del receptor es igual a la relación de protección, ρ_s , y la anchura de banda del canal de comunicaciones por el que se transmiten las señales es igual a F_m , la capacidad de comunicación es $C_p = F_m \ln(1 + \rho_s)$. Este último valor debe ser mayor o igual a la capacidad de comunicación del canal por el que el abonado recibe la comunicación deseada, es decir $C_p \geq C_0$. Por consiguiente, el mínimo valor posible de la relación de protección ρ_s a la que el abonado recibirá una comunicación con una relación señal/ruido igual a ρ_0 se define como:

$$\rho_s = (1 + \rho_0)^{F_0/F_m} - 1 \quad (4)$$

La ventaja principal de calcular directamente la ERE consiste en que a menudo es mucho más fácil de calcular que las EUE. Como los sistemas proporcionan el mismo servicio, normalmente tendrán muchos factores en común (a veces, incluso componentes físicos). Ello significa que muchos factores se «cancelarán» en el cálculo antes de que deban calcularse realmente. A menudo, este hecho reduce en gran medida la complejidad de los cálculos.

En el Anexo 2 siguiente y en el Capítulo 6 del Manual sobre Gestión nacional del espectro (Ginebra, 1995) se presentan algunos ejemplos de cálculos de la ERE.

4 Comparación de las eficacias de utilización del espectro

Como se ha descrito en los puntos anteriores, los valores de la EUE pueden calcularse para diversos sistemas y, a continuación, compararse para obtener las eficacias relativas de dichos sistemas. Sin embargo, esas comparaciones deben realizarse con precaución. Por ejemplo, las EUE calculadas para un sistema de radiocomunicaciones móviles terrestres y un sistema de radar son muy distintas. La velocidad de transferencia de información, los receptores y los transmisores de estos dos sistemas son tan diferentes que ambas EUE no son comparables y, por consiguiente, no sería especialmente útil hacerlo. En consecuencia, la comparación de la eficacia de utilización del espectro debe realizarse únicamente entre sistemas similares y que proporcionen servicios de radiocomunicaciones idénticos. Sería conveniente efectuar la comparación de la eficacia o utilización del espectro del mismo sistema a lo largo del tiempo para observar si se produce alguna mejora en la zona específica estudiada.

Cabe señalar igualmente que aunque la EUE es un factor importante, porque permite obtener la máxima cantidad de servicios a partir del espectro radioeléctrico, no es el único factor que debe considerarse. Entre otros factores que deben incluirse en la elección de una tecnología o de un sistema cabe citar los costes, la disponibilidad de equipos, la compatibilidad con equipos y técnicas existentes, la fiabilidad del sistema y las características de explotación.

ANEXO 2

Ejemplos**1 Utilización del espectro por sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres****1.1 Utilización eficaz del espectro en un sistema radioeléctrico picocelular de interior**

En el caso de un sistema picocelular de interior en la banda de frecuencias entre 900 MHz y 60 GHz, la EUE puede obtenerse igualmente mediante la ecuación (2). A partir de esta ecuación, la EUE de un sistema radioeléctrico picocelular de interior puede definirse como:

$$\text{Erlangs} / (\text{anchura de banda} \times \text{superficie}) \quad (5)$$

siendo Erlangs, el tráfico vocal total cursado por el sistema picocelular, anchura de banda, la cantidad total de espectro utilizado por el sistema y superficie, el área total de servicio cubierta por el sistema. Como los sistemas picocelulares se implantan en edificios de gran altura, para calcular la eficacia del espectro se utiliza la superficie total de los pisos. Puede entonces determinarse el número de canales necesarios por celda basándose en las tablas de Erlang B para un número determinado de usuarios en cada piso y un volumen de tráfico concreto por usuario.

1.1.1 Sistema picocelular que cubre un edificio

Para calcular la anchura de banda total necesaria para todo el edificio, se necesita conocer la distancia de reutilización vertical en término del número de pisos. Este parámetro depende de las pérdidas en los pisos y es distinto para diferentes tipos de edificios.

Puede entonces calcularse el número total de canales semidúplex necesarios para el edificio que es igual a:

$$2 \times \text{N.º de canales por celda} \times \text{N.º de celdas por piso} \times \text{N.º de pisos de separación}$$

Es preciso incluir el factor 2 para reflejar el número de canales necesarios en las comunicaciones bidireccionales.

La utilización eficaz del espectro, $EUE_{edificio}$, del sistema que proporciona cobertura en el edificio puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$EUE_{edificio} = \frac{\text{Tráfico total cursado en todo el edificio}}{\text{N.º total de canales} \times \text{anchura de banda del canal} \times \text{superficie total de los pisos}} \quad (6)$$

Ejemplo:

Sistema de interior que funciona a 900 MHz:

Anchura de banda de un canal (semidúplex)	25 kHz
N.º de canales por celda	10
N.º de celdas por piso	4
N.º de pisos de separación	3
N.º total de canales necesarios	120

Para un grado de servicio del 0,5%, el tráfico cursado en un piso = $T_f = 16 E$ ó $2 T_f$ debido a las estaciones base y móvil.

$$EUE_{edificio} = \frac{16 \times \text{N.º de pisos}}{120 \times 0,025 \times \text{superficie total de los pisos}} \quad (7)$$

Si cada piso tiene 25 m × 55 m, $EUE_{edificio} = 3\,880 \text{ E/MHz/km}^2$.

1.1.2 Sistema picocelular que cubre un centro urbano

De forma similar, la anchura de banda necesaria para cubrir toda la superficie de un centro urbano puede calcularse también si se conoce la distancia de reutilización horizontal. También en este caso, dicho parámetro depende del material

de los edificios y de las pérdidas de propagación de la señal en el interior y exterior de los mismos. Esta distancia de reutilización afecta directamente al número de edificios que pueden situarse en una agrupación (o grupo de interferencia).

En este caso, el número total de canales semidúplex necesarios en todo el centro urbano a cubrir es igual a:

$$2 \times \text{N.º de canales por edificio} \times \text{N.º de edificios por agrupación}$$

También en este caso se incluye el factor 2 a fin de reflejar el número de canales precisos para comunicaciones bidireccionales.

La eficacia de utilización del espectro, EUE_{zona} , del sistema que proporciona cobertura a todo el centro urbano puede calcularse mediante la ecuación (5):

$$EUE_{zona} = \frac{\text{Tráfico total cursado en toda la zona}}{\text{N.º total de canales} \times \text{anchura de banda del canal} \times \text{zona total de servicio}} \quad (8)$$

En este caso, la zona total de servicio es la superficie total de los pisos de los edificios cubiertos por el sistema picocelular.

Ejemplo:

Sistema de interior que funciona a 900 MHz:

N.º de canales por edificio	120
N.º de edificios por agrupación	4
Anchura de banda de un canal (semidúplex)	25 kHz
N.º total de canales necesarios	480

$$EUE_{zona} = \frac{16 \times \text{N.º de pisos} \times \text{N.º de edificios}}{120 \times 4 \times 0,025 \times \text{superficie total de los pisos}} = 970 \text{ E / MHz / km}^2 \quad (9)$$

NOTA 1 – Puede encontrarse información adicional en:

CHAN, G. y HACHEM, H. [septiembre de 1991] Spectrum efficiency of a pico-cell system in an indoor environment. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Quebec City, Canadá.

HATFIELD, D.N. [agosto de 1977] Measures of spectral efficiency in land mobile radio. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 3, 266-268.

1.2 ERE de los sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres

Los valores de ERE de sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres que emplean distintos tipos de modulación se compararon con el sistema teóricamente más eficaz (véanse el § 3 y la ecuación (4) del Anexo 1).

En aras de una mayor simplicidad y para obtener expresiones analíticas finitas, los cálculos corresponden al modelo más simple de red en forma de retícula rectangular teórica y en condiciones de propagación típicas de la banda de frecuencias de ondas decimétricas. Sin embargo, los mismos principios podrán aplicarse a modelos más complejos de redes reales, con modelos de propagación más sofisticados.

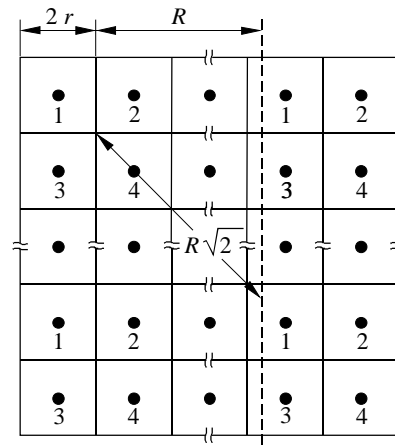
El modelo de red comprende un conjunto de cuadrados de iguales dimensiones en cuyo centro se ubica la estación central (de base) (véase la Fig. 1). El radio, r , de la zona de servicio se da por conocido. En las zonas marcadas con la misma cifra en la Fig. 1 se puede utilizar el mismo conjunto de canales de frecuencias a condición de que la distancia, R , entre esas zonas permita una atenuación suficiente de la interferencia. Las antenas de las estaciones de base no son directivas en el plano horizontal y utilizan únicamente un tipo de polarización.

En este modelo, todos los transmisores de estación de base tienen la misma potencia y una frecuencia portadora estable y no emiten ninguna radiación fuera de banda o no esencial; las características de selectividad de los receptores de estación de base son ideales.

En la Fig. 2 se muestran los resultados de los cálculos de ERE para varios tipos específicos de modulación y relaciones señal/ruido diferentes a la salida del receptor, ρ_0 . Los tipos de modulación que se han considerado son:

- modulación de amplitud en banda lateral única (MA-BLU),
- modulación de frecuencia (MF),
- modulación por desplazamiento de fase de 4 (8) estados (MDP-4 (8)),
- modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados (MAQ-16).

FIGURA 1
Modelo de red



1046-01

De la Fig. 2 se desprende que los sistemas móviles terrestres con MF tienen la ERE más baja, dado que, cuando se utiliza este tipo de modulación, la anchura de banda necesaria para desarrollar una red es aproximadamente cinco veces mayor que en el caso del sistema teóricamente más eficaz (MTES – most theoretically efficient system). Por otra parte, el tipo de modulación que más se acerca al caso del MTES para todos los valores de la relación de protección contra el ruido es MAQ-16. Un desarrollo de red importante requiere solamente una vez y media la anchura de banda necesaria para el MTES. Si no se exige una gran calidad de recepción, el tipo de modulación más cercano al MTES es MA-BLU. Sin embargo, la ERE de la MA-BLU disminuye significativamente conforme aumentan los requisitos de calidad de recepción, especialmente si se tiene en cuenta el efecto de la inestabilidad de frecuencia de los transmisores reales.

NOTA 1 – Para más información, véase el Anexo IV al Informe 662-3 (Düsseldorf, 1990).

1.3 EUE de los sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres

Para los sistemas de radiocomunicaciones móviles terrestres de distribución general, la EUE puede obtenerse mediante la ecuación (2) de la siguiente manera:

$$EUE = \frac{M}{B \cdot S \cdot T} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (10)$$

donde:

B : cantidad total del espectro considerado en la banda de frecuencias de los servicios móviles terrestres

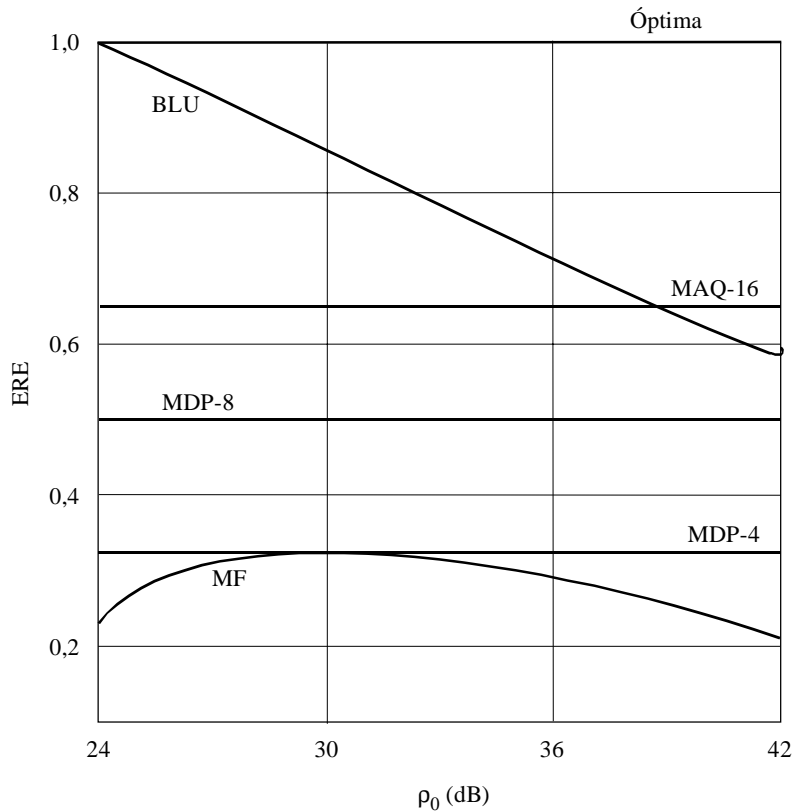
S : zona en estudio

Occ : ocupación total de la zona

$$= \text{ocupación por transmisión} \times \text{N.º de transmisiones en la zona} = M/T.$$

Se trata, pues, de calcular la ocupación total en la zona. El método adoptado es dividir la superficie en estudio en un cierto número de celdas en las que se sitúan las estaciones de base. Dependiendo de la potencia del transmisor y de las características de propagación, la señal transmitida abarcará una determinada zona, en este caso, un número de celdas. Así pues, añadiendo las celdas que abarca esta señal, puede calcularse la ocupación debida a esta transmisión. Sin embargo, si varias estaciones comparten la misma frecuencia, la ocupación se dividirá por el número de estaciones que comparten esa frecuencia. Se tendrán en cuenta todas las estaciones en el número total de transmisiones.

FIGURA 2
ERE en una red con diferentes tipos de modulación



1046-02

En este ejemplo, la zona geográfica de 76 km × 76 km se representa a efectos de cálculo como una matriz de valores de celda. Cada celda se define como una zona de 2 km × 2 km. La celda se considera ocupada si el círculo de cobertura definido por d (que se explicará con más detalle en el punto siguiente) ocupa más del 10% de la superficie de la celda. La ocupación total de la celda se obtiene a partir de cada licencia o estación activa en la banda de frecuencias.

Si F_n es la ocupación total de la celda por las n estaciones de la zona, la Occ será entonces:

$$Occ = \sum_0^m F_n \quad (11)$$

donde m es el tamaño de la matriz.

El índice EUE de la celda se define como la ocupación total en la celda por las n estaciones de esa zona geográfica dividida por la cantidad total de espectro considerado, B , y el área de la celda, a . El índice medio de EUE de una zona geográfica puede obtenerse por tanto dividiendo la ocupación total de la ciudad por la cantidad total de espectro considerado y la superficie total, S .

$$\text{Índice de la celda} = \frac{F_n}{B \cdot a} \quad (12)$$

$$\text{Índice medio} = \frac{Occ}{B \cdot S} \quad (13)$$

1.3.1 Calcul de l'indice de spectre occupé et de l'indice de spectre refusé

Dans cette analyse, on calcule l'indice de spectre occupé et l'indice composite spectre occupé/spectre refusé. Le premier indice indique la proportion dans laquelle une bande donnée de spectre est utilisée et le second la proportion de spectre utilisée et celle refusée à d'autres utilisateurs.

Comme cela a été dit au paragraphe précédent, pour calculer l'indice, il faut tout d'abord estimer la valeur de la distance de couverture, d , basée sur la Recommandation UIT-R P.529:

$$d = \text{anti log} \left[\frac{\left(P_t + G_r - P_{ibm} - OCR(\Delta f) - 26,16 \log f + 13,82 \log h_t + 1,1 \log f - 0,7 \right) h_r - (1,56 \log f - 0,8)}{44,9 - 6,55 \log h_t} \right] \quad (14)$$

où:

- P_t : p.i.r.e. (dBW)
- G_r : gain de l'antenne de réception (dB)
- P_{ibm} : puissance reçue moyenne au niveau du mobile (dBW)
- OCR : facteur de réjection hors canal
- f : fréquence d'émission (MHz)
- h_t : hauteur de l'antenne de la station de base (m)
- h_r : hauteur de l'antenne mobile (m)

On suppose que l'antenne de la station de base est équidirective. Les coordonnées de cette station, qui déterminent l'emplacement du centre du cercle de couverture dans la matrice de cellule, sont elles aussi utilisées.

Pour obtenir un indice du spectre occupé, P_{ibm} est égale à -128 dBW et $OCR(\Delta f)$ est égal à 0.

Pour les systèmes de radiocommunication mobiles terrestres, nous nous intéressons non seulement à l'indice de spectre occupé mais aussi à l'indice de spectre refusé. Le refus d'accès au spectre résulte du fait que pour pouvoir utiliser les canaux adjacents des fréquences assignées il faut prévoir une certaine distance de séparation par rapport à la station de base considérée, en raison des brouillages. Cette distance dépend notamment de l'espacement en fréquence. Pour calculer cette distance pour divers espacements en fréquence, on suppose que P_{ibm} est égale à -145 dBW et il faut utiliser diverses valeurs de $OCR(\Delta f)$.

Sur la base du gabarit des émissions hors bande, les valeurs utilisées pour le facteur OCR (dB) pour un décalage de Δf (kHz) par rapport au canal sont les suivantes:

Δf	0	± 25	± 50	± 75	± 100
OCR	0	57,1	58,6	58,6	58,6

Avec ces valeurs, il est possible d'obtenir des distances comparables à celles observées dans des conditions de propagation réelles. A partir d'un ensemble de données échantillons, et en appliquant la méthode de calcul des distances de couverture, on obtient une distance associée au spectre occupé de 21,9 km. Les distances associées au spectre refusé correspondantes pour $\Delta f = 0, \pm 25$ kHz, ± 50 kHz et au-delà sont respectivement de 69,2 km, 1,5 km et 1,3 km.

1.3.2 Résultats

Pour illustrer cette méthode de calcul de l'efficacité SUE, on donne les résultats obtenus pour une zone de 5 776 km² autour du centre de 10 grandes villes canadiennes dans la bande 138-174 MHz. Le Tableau 1 indique l'indice de spectre occupé et l'indice spectre occupé/refusé.

Les données utilisées pour déterminer l'occupation totale proviennent de la base de données canadienne sur les assignations et les systèmes de licence.

Les bandes attribuées aux systèmes mobiles terrestres prises en considération dans cet exemple comprennent à la fois la bande 138-174 MHz (ondes métriques) et les bandes 406-430 MHz et 450-470 MHz (ondes décimétriques). L'espacement des canaux est de 30 kHz pour les bandes d'ondes métriques et de 25 kHz pour les bandes d'ondes décimétriques.

CUADRO 1

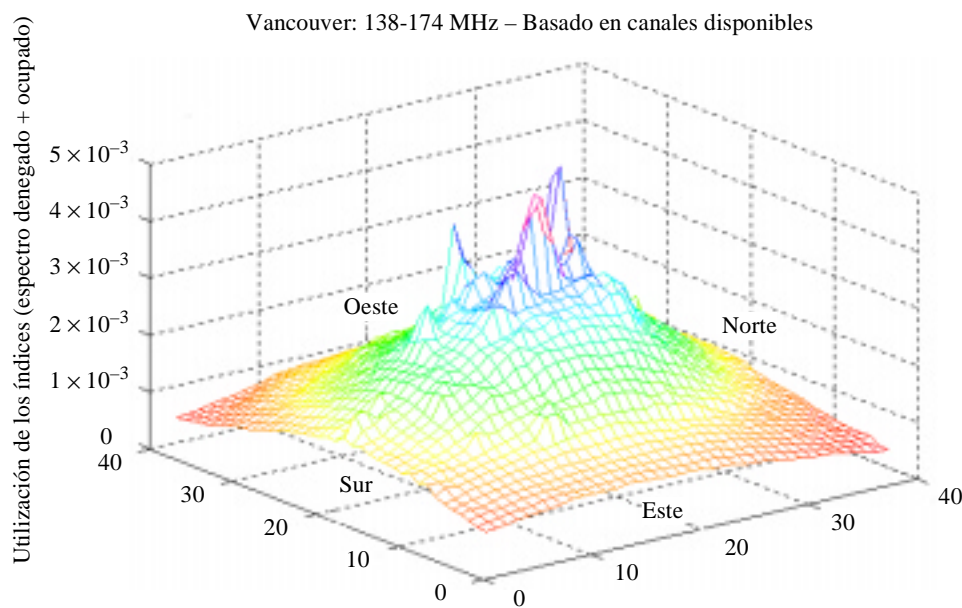
Índices de espectro ocupado y denegado (138-174 MHz)

E/kHz/km ² × 10 ⁻³	Índice ocupado y denegado	Índice ocupado
Toronto	4,19	1,33
Ottawa	4,54	1,30
Windsor	3,68	0,87
Montreal	3,56	0,88
Saint John	3,24	0,65
Halifax	3,32	0,68
Vancouver	3,20	0,62
Winnipeg	3,31	0,74
Calgary	3,05	0,73
Edmonton	2,99	0,60

También se presentan los resultados gráficos de la ciudad de Vancouver, igualmente en la banda 138-174 MHz. En la Fig. 3 se muestra una visualización tridimensional de una matriz de valores, en este caso el espectro denegado y ocupado. La matriz está superpuesta sobre un mapa de la ciudad a fin de presentar la información sobre la utilización con detalle cartográfico. Esta presentación mejora en gran medida nuestra capacidad para interpretar esta información. Como se muestra en la Fig. 4, el valor máximo de una celda de espectro ocupado en el centro de la ciudad es $1,7 \times 10^{-3}$ E/kHz/km². El valor máximo de una celda del espectro denegado y ocupado para esta banda es $4,9 \times 10^{-3}$ E/kHz/km², que se sitúa justo al norte y al oeste del centroide (véase la Fig. 5). Esta zona de la ciudad de Vancouver es un núcleo de gran actividad comercial.

FIGURA 3

Representación tridimensional del índice de espectro ocupado y denegado de Vancouver

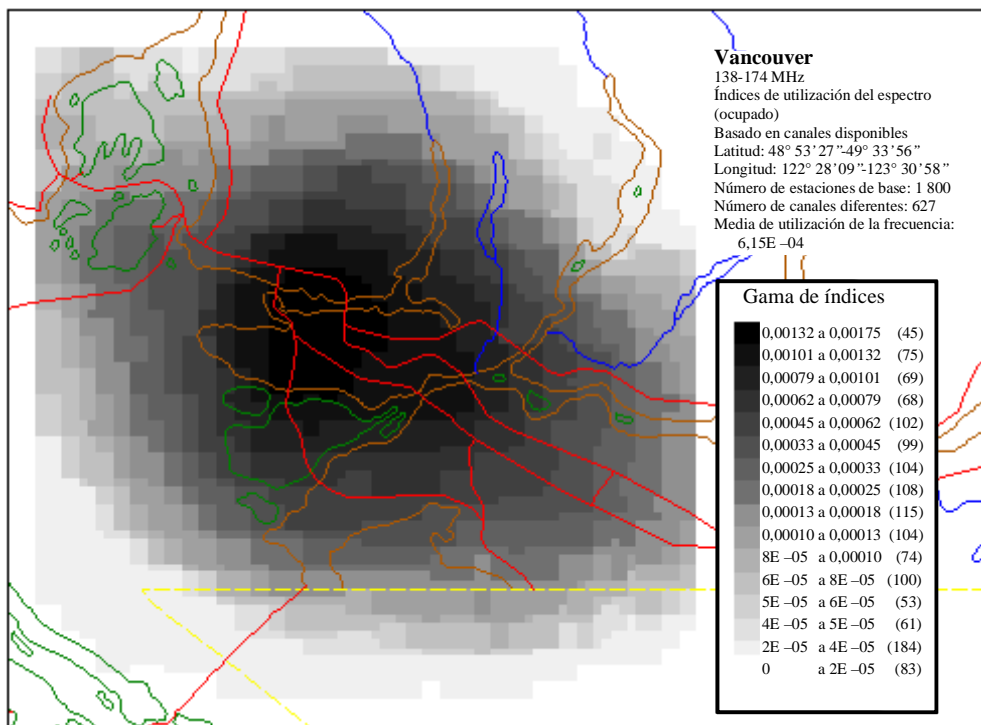


Longitud: 122° 28' 09"-123° 30' 58"

Latitud: 48° 53' 27"-49° 33' 56"

FIGURA 4

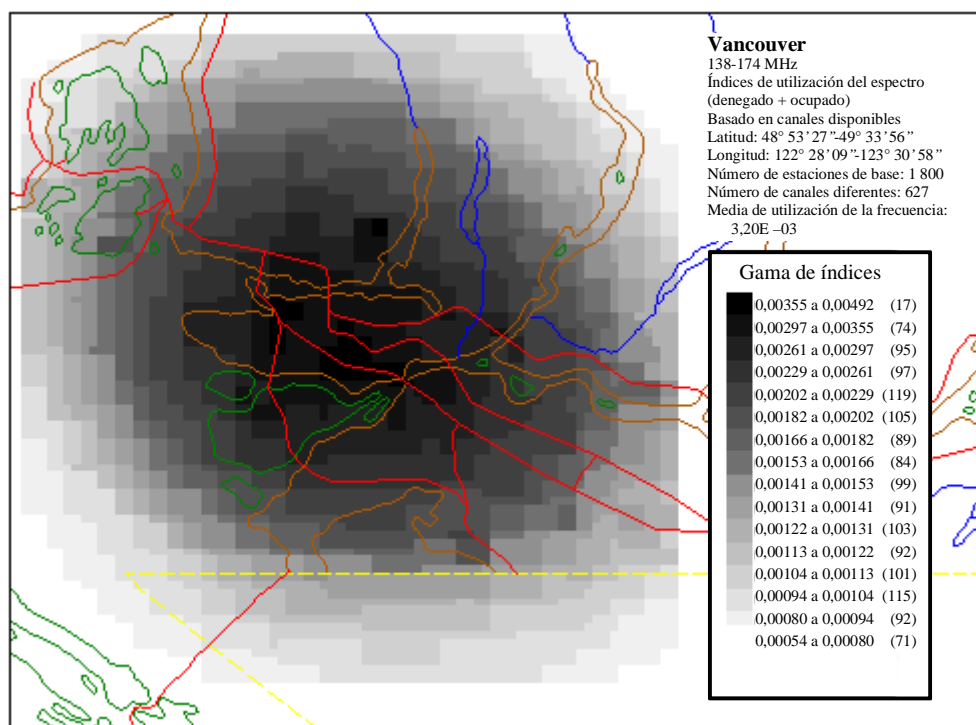
Gráfico bidimensional del índice de espectro ocupado de Vancouver



1046-04

FIGURA 5

Gráfico bidimensional del índice de espectro ocupado y denegado de Vancouver



1046-05

2 Utilización del espectro por sistemas de radioenlaces

2.1 Introducción

Para los sistemas de radioenlaces que funcionan de modo permanente, puede despreciarse la dimensión temporal. Refiriéndose a la ecuación (2), la EUE, puede escribirse así:

$$EUE = \frac{C}{B \cdot S_{\alpha}} \quad (15)$$

donde:

C : medida de la capacidad de comunicaciones, por ejemplo canales telefónicos o bit/s

S_{α} : parámetro geométrico, por ejemplo una superficie o el ángulo entre los enlaces que parten de un nodo.

2.2 EUE para una arteria larga con enlaces derivados en los nodos

La capacidad de comunicaciones normalizada, que da la EUE para un sistema terrenal de radioenlaces entre puntos fijos se define como:

$$EUE = \frac{N \cdot A}{B_c} \quad (16)$$

donde:

N : número admisible de derivaciones (es decir, arterias radioeléctricas bilaterales) en una estación repetidora

A : capacidad de transmisión (por ejemplo, número de canales telefónicos) por radiocanal

B_c : anchura de banda de radiofrecuencia necesaria por radiocanal.

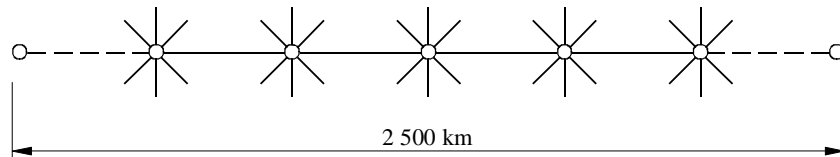
Esta fórmula incluye la medida geométrica, N (N depende del ángulo admisible entre los enlaces derivados).

Usando la fórmula anterior se calculó la EUE para la transmisión de telefonía por un sistema terrenal de radioenlaces entre puntos fijos.

Se adoptan las siguientes hipótesis:

- se transmiten señales telefónicas;
- la probabilidad de desvanecimiento es la indicada en la Recomendación UIT-R P.530;
- la longitud del circuito es de 2 500 km, y el modelo de circuito es el que se muestra en la Fig. 6:

FIGURA 6
Modelo de circuito



1046-06

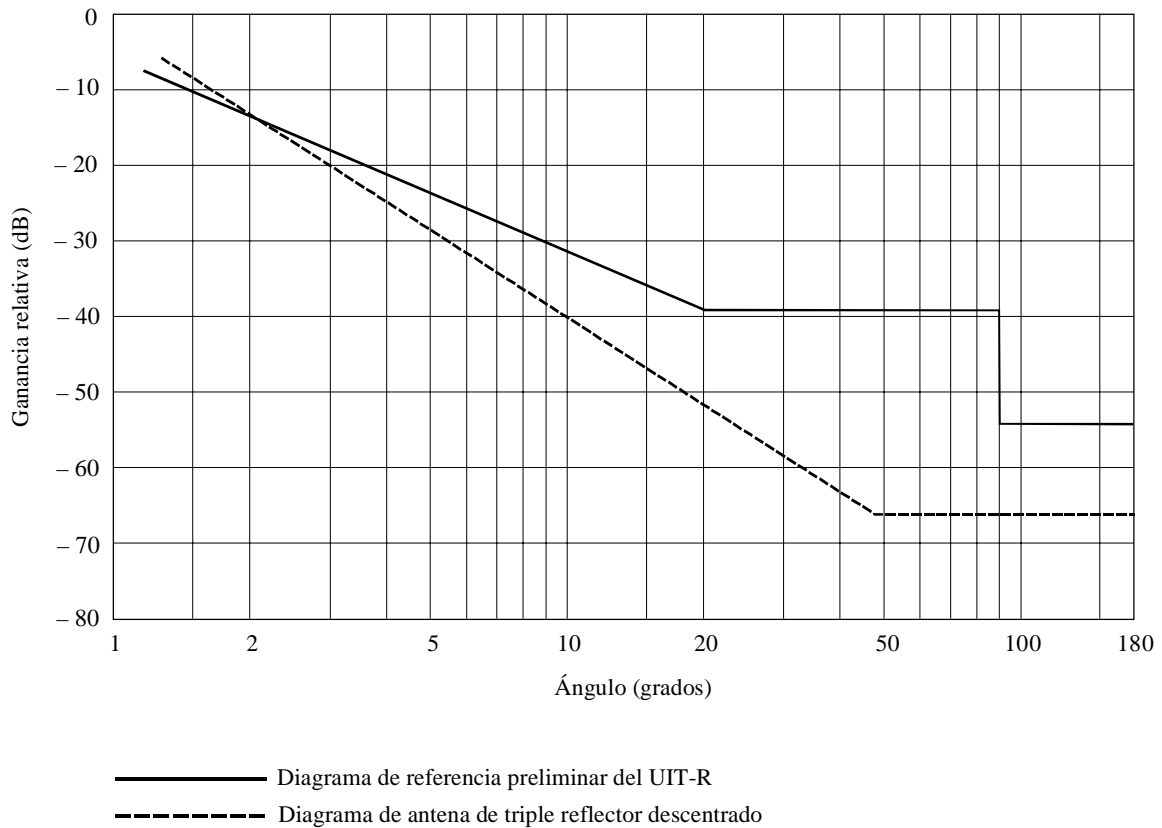
- la relación portadora/ruido, C/N , requerida se expresa como:

$$C/N = 10 \log [(2^n - 1) / 3] + 11,8 \quad \text{dB} \quad (17)$$

donde n es el número de estados de la MAQ;

- una décima parte del ruido global del circuito de radioenlaces, de 2 500 km de longitud, se asigna al ruido debido a la interferencia procedente de otras arterias;
- la interferencia debida a otras arterias tiene la misma frecuencia de la señal deseada;
- se utilizó un diagrama de referencia de antena para una antena circular tal como el que figura en la Recomendación UIT-R F.699, y una doble antena descentrada de triple reflector, empleada en Japón para radioenlaces digitales, como consta en la Fig. 7;
- enlaces con circuitos en derivación de ángulos aleatorios.

FIGURA 7
Diagrama de antena



1046-07

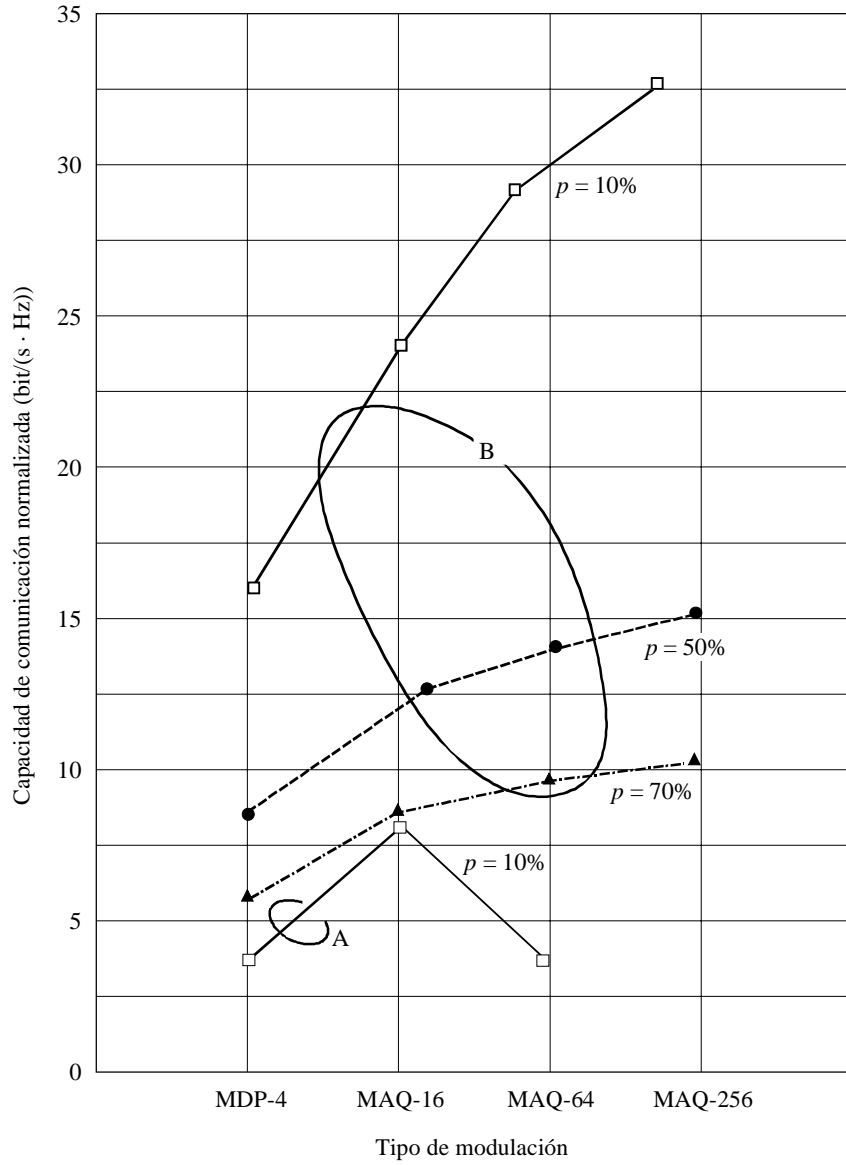
Se calcularon las capacidades normalizadas de comunicación para estos dos tipos de antena y los resultados se indican en la Fig. 8. La calidad de funcionamiento de la antena circular de la Recomendación UIT-R F.699 no es suficiente como para estimar la EUE con sistemas de modulación de un número elevado de estados. Como los resultados dependen de las características de funcionamiento de la antena, si se puede emplear una antena de alta calidad, resultaría eficaz una MAQ de muchos estados, tal como MAQ-256.

2.3 EUE en enlaces de relevadores radioeléctricos dispuestos arbitrariamente

2.3.1 Formulación

La Fig. 9 representa un enlace de relevadores radioeléctricos X-Y con otra estación radioeléctrica Z que funciona en la misma frecuencia. La estación Z está situada al azar dentro de un círculo que rodea a la estación Y.

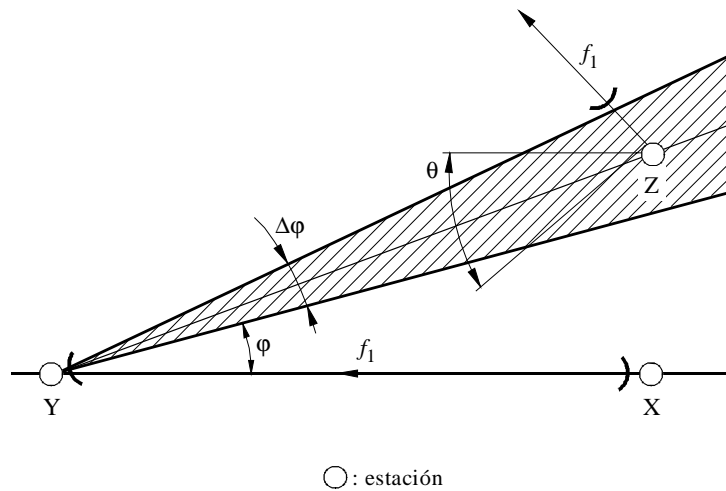
FIGURA 8
Capacidad de comunicación normalizada



Margen de desvanecimiento: 20 dB
 Separación entre repetidores: 50 km
 Capacidad del canal: 64 kbit/s
 Atribución de ruido a la derivación: 10%

p : Probabilidad de interferencia
 A: Diagrama preliminar de referencia del UIT-R
 B: Diagrama de antena de reflector triple descentrado

FIGURA 9
Disposición arbitraria de estaciones



1046-09

La estación Y recibe en la frecuencia f_1 una señal deseada de la estación X. La estación Z transmite una señal de la misma frecuencia f_1 en una dirección arbitraria.

La capacidad de comunicación normalizada, que da la eficacia de utilización del espectro, se define como sigue:

$$EUE = \frac{N \cdot A}{B_c} = \frac{\bar{p}}{p} \frac{A}{B_c} \quad (18)$$

donde:

N : número de enlaces radioeléctricos posibles que utilizan la misma frecuencia: $N \approx \bar{p}/p$

A : capacidad de transmisión por radiocanal.

La probabilidad p de que la estación Y reciba una interferencia que rebase el límite admisible, se calcula considerando la combinación del diagrama de antena de las estaciones Y y Z; \bar{p} es la probabilidad máxima admisible de interferencia.

Como se ha despreciado la acumulación de interferencia procedente de dos o más estaciones, en las aplicaciones reales hay que prever un cierto margen.

2.3.2 Aplicación: EUE en los sistemas de radioenlaces en la banda de 2 GHz

Con la fórmula anterior, se calculó la EUE en un sistema de radioenlaces terrenales punto a punto de pequeña capacidad, que funciona en la banda de 2 GHz.

Se calculó la ERE, para antenas de 1,8 m de diámetro teniendo en cuenta la relación entre interferencia admisible y la eficacia propia para cada tipo de modulación indicada en el Cuadro 2. Los resultados se recogen en la Fig. 10.

Para los márgenes inferiores de desvanecimiento, el sistema digital es superior al sistema analógico. En este estudio, la atenuación debida al desvanecimiento es la misma que la degradación de la relación entre los niveles de la señal deseada y no deseada producida por la interferencia. Si se utilizan técnicas de diversidad de espacio, el margen necesario de desvanecimiento es más reducido. En general, los sistemas digitales tienden a proporcionar una mejor eficacia de utilización del espectro.

En el caso de los sistemas de modulación digital, el paso de la modulación de dos fases a la multifase o multiestado requiere menor anchura de banda pero puede implicar una reducción de la eficacia de utilización del espectro cuando la interferencia es grande. El valor detallado depende de las características de la antena, etc., pero el sistema MDP-4 puede ser óptimo desde el punto de vista macroscópico, en aquellos casos en que otros sistemas de radioenlaces están funcionando alrededor de la estación de repetidores y están situados aleatoriamente en dicha zona.

CUADRO 2

Parámetros de diversos tipos de modulación en la banda de 2 GHz

Tipo de modulación		Relación S/N admisible o proporción de errores	Factor de reducción de la interferencia		Relación admisible señal deseada/señal no deseada	Parámetros relacionados con B		Separación entre canales adyacentes, B	Número de canales, A	A/B ⁽¹⁾ (canales/kHz)
Transmisión analógica	MF	58 dB	20 dB		38 dB	Excursión de frecuencia para el tono de prueba: 100 kHz r.m.s.		520 kHz	24	0,046
	BLU	58 dB	9,5 dB		48,5 dB	Frecuencia límite superior de la banda de base: 108 kHz Coeficientes del filtro: × 2 Tolerancia de frecuencias: 20 kHz		236 kHz	24	0,1
Transmisión digital	MDP-2	10 ⁻⁶	(C/N)	(Degradación)	16,2 dB	Frecuencia de reloj	Coeficiente del filtro	2 MHz	24	0,012
			10,7 dB	5,5 dB		1 544 kHz	× 1,3			
	MDP-4	10 ⁻⁶	13,7 dB	5,5 dB	19,2 dB	772 kHz	× 1,4	1,1 MHz	24	0,022
	MDP-8	10 ⁻⁶	19,1 dB	5,5 dB	24,6 dB	515 kHz	× 1,5	0,77 MHz	24	0,031
	QPRS	10 ⁻⁶	16,8 dB	5,5 dB	22,3 dB	722 kHz	× 1,1	0,85 MHz	24	0,028
MAQ-16	10 ⁻⁶	21,4 dB	5,5 dB	26,9 dB	386 kHz	× 1,6	0,62 MHz	24	0,039	

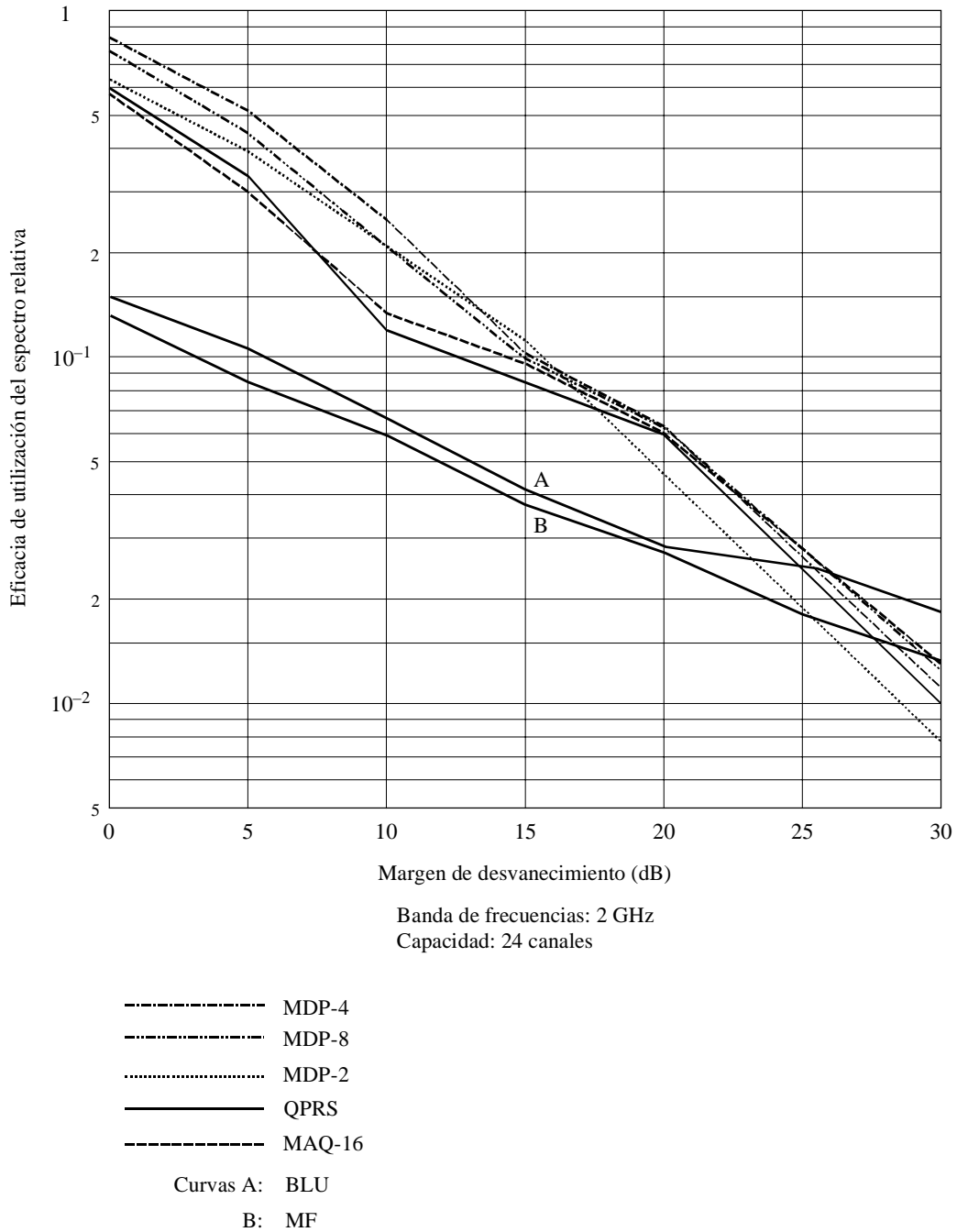
⁽¹⁾ Eficacia propia de cada tipo de modulación.

QPRS: sistema en cuadratura de respuesta parcial.

Hipótesis:

- Valores de interferencia admisible y EUE para cada tipo de modulación como los indicados en el Cuadro 1. Se atribuye a la interferencia el 80% del ruido total del circuito.
- Se supone que las distancias entre la estación que experimenta la interferencia (estación Y) y las estaciones interferentes son todas iguales. Se admite que esta hipótesis produce un pequeño error en los cálculos de eficacia, ya que las pérdidas, en condiciones de espacio libre, de los dos enlaces difieren solamente en 6 dB, aun cuando sus longitudes difieran en un factor de dos.
- Se supone que los desvanecimientos de la señal deseada y de las señales interferentes no están relacionados.
- El diagrama de radiación de la antena, es el de referencia de la Recomendación UIT-R F.699.
- Todas las estaciones tienen la misma potencia de transmisión.
- El límite para la probabilidad de interferencia es $\bar{p} = 0,1$.

FIGURA 10
EUE para una disposición aleatoria



1046-10

2.3.3 EUE en una red en malla aleatoria

Con el fin de realizar una correcta comparación de los procedimientos de modulación, uno puede suponer un plan de frecuencias entrelazado con una separación entre radiocanales correspondiente a una determinada degradación de las características funcionales provocada por las interferencias de canal adyacente. El Cuadro 3 recoge unos valores tentativos para la separación normalizada entre radiocanales, X , definida en el Informe 608 (Kyoto, 1978) del ex CCIR y la correspondiente eficacia espectral (bit/(s · Hz)). Aunque podrían deducirse resultados diferentes, en base a otras suposiciones, debería observarse que los resultados calculados del Cuadro 3 están muy próximos de los valores que

podrían deducirse para disposiciones específicas de radiocanales como las sugeridas por las Recomendaciones UIT-R (por ejemplo 140 Mbit/s con modulación MAQ-16 y una separación de 40 MHz entre radiocanales con polarización cruzada). Los valores medidos pueden ser diferentes de estos valores calculados.

CUADRO 3

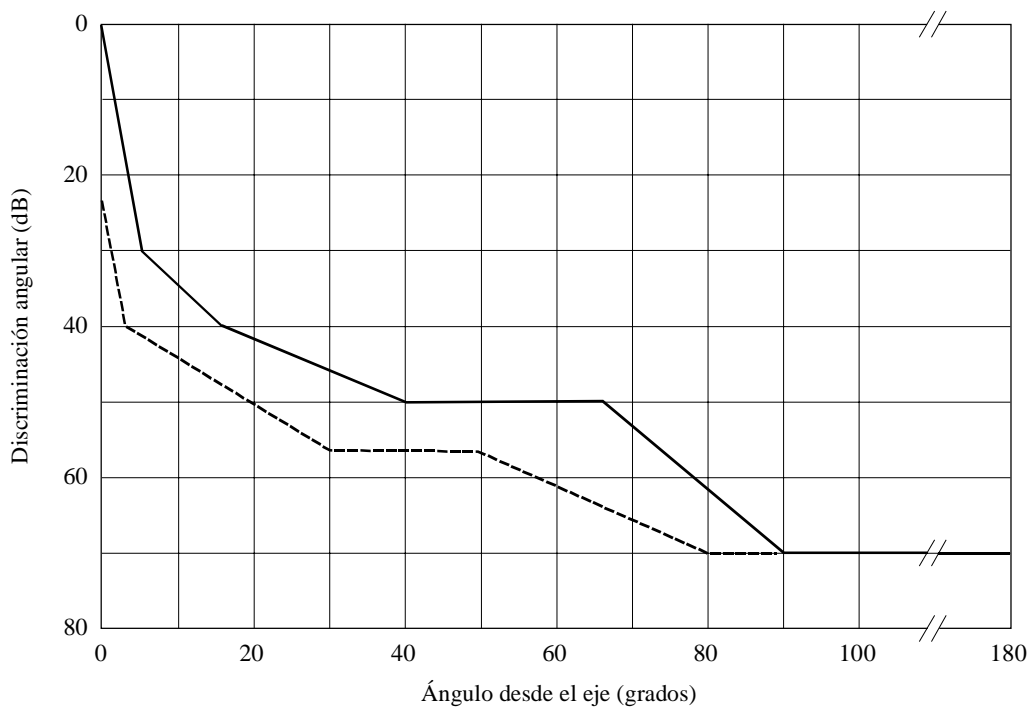
Procedimiento de modulación	Separación normalizada entre radiocanales, X	Eficacia espectral (bit/(s · Hz))
MDP-4	1,88	2,13
MDP-8	2,16	2,77
MAQ-16	2,23	3,59

NOTA 1– Degradación debida a la interferencia de canal adyacente: 0,5 dB.

- Filtros de canal: coseno alzado con factor de caída de 0,5.
- Aislamiento entre radiocanales con polarización cruzada (discriminación por polarización cruzada (XPD) residual): 12 dB.

El diagrama de radiación de antena utilizado en el análisis se muestra en la Fig. 11 y corresponde a una antena parabólica típica. Se ha supuesto que la degradación de la calidad de funcionamiento (para una proporción de bits erróneos (BER) de 1×10^{-3}) debida a la interferencia cocanal procedente de otros enlaces, no es superior a 1 dB. Se supone que el enlace interferido se encuentra en el umbral con un margen de desvanecimiento de 40 dB en tanto que el enlace interferente recibe su valor nominal.

FIGURA 11
Máscaras de radiación de antenas



Antena parabólica, $D/\lambda = 75$

- Misma polarización
- - - Polarización ortogonal

Se ha definido una densidad normalizada de la red, γ , de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{2N \rho^2}{\text{Área total cubierta por la red}} \tag{19}$$

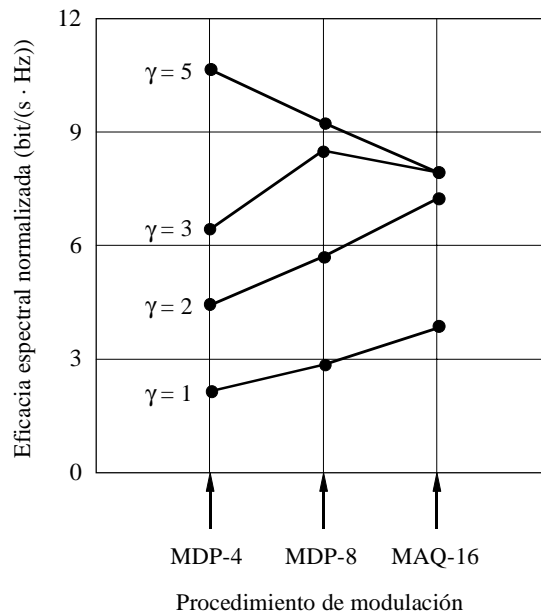
donde:

N : número de nudos radioeléctricos en la red

ρ : valor medio cuadrático de la longitud de los tramos.

Los resultados de la Fig. 12, muestran que en las redes de alta densidad se consigue la máxima eficacia con la modulación MDP-4, mientras la comparación de modulaciones se desplaza a favor de la MDP-8 o incluso de la MAQ-16 cuando la densidad de la red es inferior. Esto demuestra que la EUE por los métodos de modulación depende del entorno de interferencia.

FIGURA 12
Eficacia espectral en una red en malla



Máscara de radiación de la Fig. 11.
Degradación de la calidad debida a la reutilización de frecuencias: 1 dB

1046-12

NOTA 1 – Puede encontrarse información adicional en:

DODO, J., KUREMATSU, H. y NAKAZAWA, I. [8-12 de junio de 1980] Spectrum use efficiency and small capacity digital radio-relay system in the 2 GHz band. IEEE International Conference on Communications (ICC '80), Seattle, WA, Estados Unidos de América.

TILLOTSON, L. C. y otros [1973] Efficient use of the radio spectrum and bandwidth expansion. *Proc. IEEE*, 61, 4.

2.4 Evaluación de las propiedades de conservación del espectro de los nuevos avances tecnológicos en sistemas de radioenlaces digitales

2.4.1 Introducción

Para evaluar las propiedades de conservación del espectro de diversos factores de diseño u opciones tecnológicas, se ideó un modelo informático. La EUE relativa que se puede obtener debe evaluarse cuantitativamente. El concepto de EUE puede ampliarse y definirse como:

$$EUE = CV/(T \cdot A \cdot B) \quad (20)$$

siendo:

CV : número de canales vocales

T : fracción de tiempo de utilización de un sistema (definido como 1 en este análisis)

A : área denegada (km^2)

B : anchura de banda ocupada (MHz).

Se eligió la ecuación (20) porque tiene en cuenta tanto el espectro como el espacio (área) denegado en la valoración de las propiedades de conservación del espectro de un sistema. El área denegada es el área en la cual otro sistema no puede operar sin degradación de su funcionamiento por debajo de un criterio de calidad especificado. El área denegada es función de las características del diagrama de antena del sistema, de la potencia del transmisor y del umbral de interferencia del receptor.

El algoritmo utilizado para calcular el área denegada implica la segmentación (cuantificación) del diagrama de ganancia de la antena transmisora en varios segmentos, o sectores angulares, que representan con exactitud el diagrama de la antena. El diagrama de ganancia de la antena transmisora es un dato de entrada en el modelo que calcula el área denegada agregando las áreas denegadas de cada segmento. Geométricamente, cada segmento es un sector angular cuya área puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Área de sector angular} = \pi R^2 \theta / 360 \quad (21)$$

siendo:

R : radio del sector (R_1, R_2, \dots, R_n)

θ : ángulo en el vértice del sector ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$)

n : número de segmentos angulares.

Los radios R_n de cada sector se calcularon utilizando la relación:

$$L(R) = P_t + G_t(n) + G_r - I_{m\acute{a}x} \quad (22)$$

siendo:

$L(R)$: pérdida de propagación necesaria (dB)

P_t : potencia de salida del transmisor (dBm)

$G_t(n)$: ganancia de la antena transmisora para el sector n (dBi)

G_r : ganancia de la antena receptora, -10 dBi

$I_{m\acute{a}x}$: nivel de interferencia admisible máxima (dBm).

A continuación se determina la distancia R correspondiente a la atenuación requerida, utilizando un modelo de propagación inversa en tierra lisa. Esto facilita la evaluación del área denegada para cada sector angular (véase la ecuación (21)).

Para aplicar la ecuación (20) a sistemas de radioenlaces punto a punto, es necesario establecer las características de un sistema de referencia entre dos estaciones de microondas. Estas características incluyen la longitud del trayecto, la atenuación del trayecto, la ganancia de las antenas, las pérdidas de inserción, el margen de desvanecimiento y la

ganancia del sistema. También es necesario establecer algunas características para los tipos de modulación en cuestión. Las modulaciones digitales consideradas en esta investigación son las MAQ-16, MAQ-64 y MAQ-256. Las características supuestas de los sistemas de radioenlaces digitales se basan en la norma norteamericana y son las que siguen:

Parámetros (véase la Nota 1) del sistema de radioenlace digital

- Canales de voz: 1 344 para MAQ-16
2 016 para MAQ-64
2 688 para MAQ-256
- Velocidad binaria: 90 Mbit/s para MAQ-16
135 Mbit/s para MAQ-64
180 Mbit/s para MAQ-256
- BER: 1×10^{-6}
- Factor de ruido del receptor, F : 4 dB
- Ganancia del sistema, G_s : 103 dB.

En el análisis se utilizan los valores teóricos de eficiencia de transmisión y relación portadora/ruido a la entrada del receptor (C/N); para los diferentes tipos de modulación, de manera que se asegure una comparación justa.

A continuación se analiza la aplicación de la ecuación (20) a los principales puntos del diseño de las antenas, la modulación y el procesamiento de señal.

NOTA 1 – Los parámetros de sistema se han seleccionado para dar una indicación de un análisis en un solo trayecto de la eficacia de utilización del espectro en los varios casos considerados. De ese modo, los parámetros pueden no ser representativos de sistemas realizables, particularmente los que emplean esquemas de modulación de orden superior. En consecuencia, los resultados constituyen un ejemplo de la aplicación del concepto de la utilización eficaz del espectro a sistemas de radioenlace y se aconseja a las administraciones que empleen parámetros representativos en los análisis de eficacia de utilización del espectro.

2.4.2 Antenas

La denegación espacial es un factor primordial en el tratamiento de la conservación del espectro. Uno de los componentes principales de los sistemas de radiocomunicaciones que contribuye a la denegación espacial es su antena. En los últimos años, los significativos avances en el diseño de antenas, relativos a la discriminación de polarización y la reducción de lóbulos laterales, han proporcionado la posibilidad de mejorar la eficacia del espectro en las radiocomunicaciones de microondas punto a punto.

La reutilización de frecuencias se puede conseguir con la aplicación de técnicas de conservación de espectro en el diseño de las antenas. La denegación espacial se puede minimizar si se hacen mínimos los niveles de lóbulos laterales. Los diagramas de radiación, y por tanto las distribuciones de lóbulos laterales, varían con el tipo de antena. Los tres tipos comúnmente utilizados en la transmisión por microondas punto a punto son:

- parábola normalizada (STD – standard-dish)
- parábola con visera circular (SHD – shrouded-dish)
- reflector con bocina cónica (CHR – conical horn reflector).

En la Fig. 13 se muestran los diagramas de radiación típicos de estas antenas, con una ganancia de 43 dBi. En el modelo se han utilizado los diagramas de antena mostrados en la Fig. 13.

En la Fig. 14 se muestra una representación gráfica de la potencia de salida del transmisor en relación con el área denegada para un umbral de interferencia en el receptor de $-102,5$ dBm y para los tres tipos de antena. Aunque la ganancia del haz principal de todas las antenas es la misma, los resultados de la Fig. 14 indican que la antena CHR tiene menos área denegada que los otros dos tipos. Asimismo, la diferencia de área denegada para los tres tipos de antena es pequeña hasta que la potencia del transmisor supera los 30 dBm. Esto es fácil de entender, ya que la contribución al área denegada de la característica de lóbulos laterales/lóbulo posterior de la antena es pequeña hasta que la potencia transmitida aumenta más allá de los 30 dBm. A potencias de salida del transmisor mayores que 30 dBm, la diferencia de área denegada para los tres tipos de antena es importante. El área denegada es también función del umbral de interferencia del receptor.

FIGURA 13
 Diagramas típicos de radiación para antenas STD, SHD y CHR

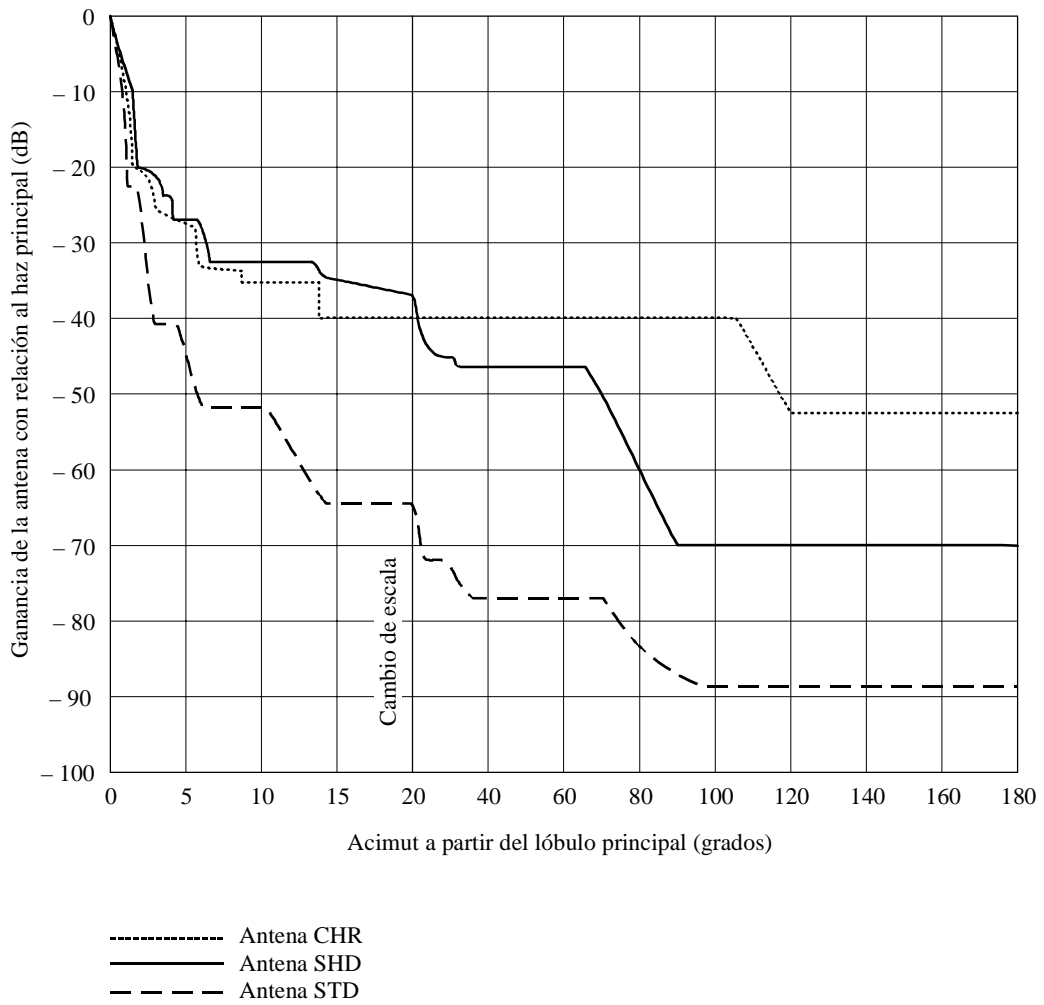
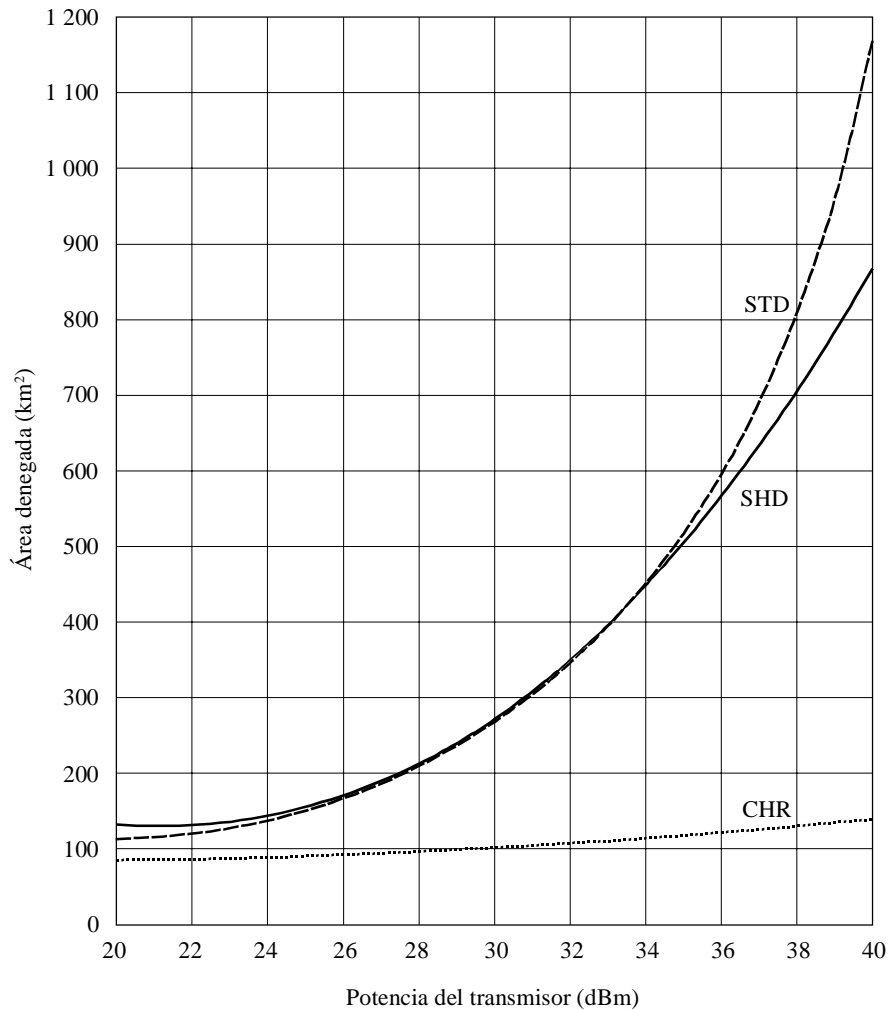


FIGURA 14

Área denegada en función del tipo de antena y de la potencia de salida del transmisor



Cálculos basados en alturas de la antena receptora de 50 m sobre terreno liso

$$I_{m\acute{a}x} = -102,5 \text{ dBm}$$

$$G_t (\text{haz principal}) = 43 \text{ dBi}$$

$$G_r = -10 \text{ dBi}$$

1046-14

Ya que el área denegada para los tres tipos de antena es una función de la P_t y del ($I_{m\acute{a}x}$), las propiedades de conservación del espectro para los tres tipos de antena deben también relacionarse con el tipo de modulación del sistema. Por tanto, las propiedades de mejora de la eficacia del espectro de las antenas STD, SHD y CHR se tratarán en la sección sobre la modulación.

2.4.3 Modulación

La evaluación de las propiedades de conservación del espectro para esquemas de modulación diferentes es muy compleja, ya que tanto el espectro como la denegación espacial se ven afectados por la elección del tipo de modulación utilizado en el sistema. En general, los parámetros del sistema, tales como la anchura de banda ocupada, la relación portadora/ruido necesaria a la entrada del receptor (C/N)_i, y el $I_{m\acute{a}x}$, son funciones del tipo de modulación y tienen una repercusión directa en la utilización del espectro.

El análisis se basa en los valores teóricos de la eficacia de transmisión y de $(C/N)_i$ para los diferentes tipos de modulación, de manera que se asegure una comparación justa. A fin de evaluar las propiedades de conservación del espectro para los diferentes tipos de modulación, se determinaron para cada uno de ellos, la anchura de banda ocupada, B , y la potencia de salida del transmisor necesaria P_t . Estos parámetros se dan en el Cuadro 4.

CUADRO 4

Parámetros del sistema digital

Tipo de modulación	Eficacia de la transmisión (bit/(s · Hz))	Anchura de banda ocupada, B (MHz)	Relación portadora/ruido necesaria a la entrada del receptor, $(C/N)_i$ (dB)	Nivel de ruido (dBm)	Nivel mínimo de portadora (dBm)	Potencia de salida del transmisor, P_t (dBm)
MAQ-16	4	22,5	21,0	-96,5	-75,5	27,5
MAQ-64	6	22,5	27,0	-96,5	-69,5	33,5
MAQ-256	8	22,5	33,0	-96,5	-63,4	39,5

La anchura de banda ocupada, B , para las modulaciones digitales se determinó utilizando la relación:

$$B \text{ (MHz)} = \text{Velocidad binaria (Mbit/s)} / \text{eficacia de transmisión (bit/(s · Hz))} \quad (23)$$

donde la velocidad binaria (véanse los parámetros del sistema digital) y la eficacia de transmisión (véase el Cuadro 4) son funciones del tipo de modulación.

Para establecer la P_t necesaria para cada tipo de modulación, se determinó la $(C/N)_i$ necesaria en el receptor, para criterios de calidad específicos. Se utilizó una BER de 1×10^{-6} como criterio de calidad y la $(C/N)_i$ teórica necesaria se obtuvo de textos técnicos sobre el tema.

Los niveles de ruido a la entrada del receptor, N_i , dados en el Cuadro 4 (-96,5 dBm), se determinaron utilizando una anchura de banda del receptor de 22,5 MHz y un factor de ruido en el receptor de 4 dB. El nivel mínimo necesario de portadora, $C_{mín}$, a la entrada del receptor se determinó a partir de la relación:

$$C_{mín} \text{ (dBm)} = (C/N)_i + N_i \quad (24)$$

La potencia necesaria en el transmisor, P_t , dada en el Cuadro 4 se determinó utilizando la expresión:

$$P_t \text{ (dBm)} = C_{mín} + G_s \quad (25)$$

donde G_s representa la ganancia del sistema, que se fijó en 103 dB.

El área denegada también es función del nivel de interferencia máximo admisible en el receptor víctima, $I_{máx}$. El nivel de $I_{máx}$, asociado con cada modulación, se determinó suponiendo que el receptor víctima tenía el mismo tipo de modulación que el transmisor interferente. En este análisis, el nivel de $I_{máx}$ se determinó utilizando el criterio establecido en el Boletín N.º 10-E sobre sistemas de telecomunicaciones de la Telecommunications Industry Association (TIA). Para los sistemas digitales el criterio de calidad de funcionamiento fue un aumento en la BER de 1×10^{-6} a 1×10^{-5} , que corresponde aproximadamente a un aumento de 1 dB del nivel de ruido del receptor. Esto equivale a una relación interferencia/ruido a la entrada del receptor, $(I/N)_i = -6$ dB (es decir $I_{máx} = -96,5 \text{ dBm} - 6 \text{ dB} = -102,5 \text{ dBm}$ para MAQ-16, MAQ-64 y MAQ-256).

El Cuadro 5 contiene los valores de EUE calculados utilizando la anchura de banda y la potencia de salida del transmisor dados en el Cuadro 4 y el nivel de interferencia máximo admisible de -102,5 dBm. En el Cuadro 5 se dan valores de EUE para los tres tipos de modulación diferentes y los tres tipos de antenas. Los sistemas con valores de EUE superiores son más eficientes en términos de utilización del espectro. Debe señalarse que los resultados calculados indican claramente que la EUE varía considerablemente de un tipo de antena a otro. Por ejemplo, la EUE para MAQ-64 es 0,201 para la antena STD, comparada con 0,212 y 0,811 para las antenas SHD y CHR, respectivamente. Por lo tanto, los resultados del Cuadro 5 muestran claramente que la EUE se puede optimizar sólo cuando se consideran tanto los efectos de la antena como los de la modulación.

CUADRO 5

Eficacia de utilización del espectro

Clasificación por orden decreciente	EUE para diferentes tipos de antena		
	STD	SHD	CHR
1	MAQ-16 (0,307)	MAQ-16 (0,282)	MAQ-256 (0,841)
2	MAQ-64 (0,201)	MAQ-64 (0,212)	MAQ-64 (0,811)
3	MAQ-256 (0,112)	MAQ-256 (0,144)	MAQ-16 (0,709)

Asimismo, los resultados del análisis muestran que la EUE para MAQ-64 es mayor que para MAQ-256 para las antenas STD y SHD pero no para la CHR. El Cuadro 6 ayuda a entender por qué la MAQ-64 es más «eficaz en espectro» que la MAQ-256 para una antena de características ultra elevadas SHD. Los parámetros de entrada del modelo se suministran en dicho Cuadro. El número de CV es 2016 para la MAQ-64 y 2688 para la MAQ-256. La anchura de banda necesaria del sistema, B , es la misma tanto para la MAQ-64 como para la MAQ-256 ($B = 22,5$ MHz). Sin embargo, el nivel necesario de P_t , para la MAQ-256 es significativamente mayor que para la MAQ-64 (39,6 dBm comparados con 33,5 dBm). Ya que la potencia en el transmisor tiene un efecto primordial en el área denegada a otro usuario (véase la Fig. 14), el área denegada para la MAQ-256 es significativamente mayor que para la modulación MAQ-64, y eso hace por lo tanto que la modulación MAQ-64 sea más eficaz en espectro que la MAQ-256.

CUADRO 6

Comparación de la EUE con MAQ-64 y MAQ-256 para una antena SHD

Parámetro	MAQ-64	MAQ-256
CV	2016	2688
B (MHz) (véase el Cuadro 4)	22,5	22,5
P_t (dBm) (véase el Cuadro 4)	33,5	39,5
$I_{m\acute{a}x}$ (dBm)	-102,5	-102,5
A (km ²) (véase la Fig. 11)	421	830
EUE (véase el Cuadro 5)	0,212	0,144

Sin embargo, el potencial de conservación del espectro de un sistema es función de varios factores de diseño, todos los cuales se deben tomar en consideración al evaluar la eficacia espectral de un sistema. Es decir, no puede afirmarse que un sistema con una modulación determinada conserve mejor el espectro que otro sistema con otra modulación, sin tener en cuenta todos los factores de diseño (por ejemplo, las antenas, el tratamiento de las señales, los filtros de radiofrecuencia (RF), etc.).

El Cuadro 5 se puede utilizar también para determinar la mejora relativa en la conservación del espectro al utilizar una antena SHD o una antena CHR en relación con la antena STD. Como se indicó anteriormente, la mejora en la conservación del espectro para las antenas CHR y SHD depende del tipo de modulación. Esto se debe al hecho de que el área denegada producida por un tipo de antena determinado es una función de la P_t la cual depende de la modulación (véase la Fig. 14). El Cuadro 7 muestra el porcentaje de mejora en la EUE para las diversas modulaciones citadas, utilizando los datos de EUE del Cuadro 5. En el caso de las modulaciones digitales, la mayor mejora se produce en la modulación MAQ-256, con un aumento del 28% y del 533% para las antenas SHD y CHR, respectivamente.

CUADRO 7

Mejora en la EUE de antenas SHD y CHR según el tipo de modulación

Tipo de modulación	Mejora en la EUE	
	Antena SHD	Antena CHR
MAQ-16	-8%	130%
MAQ-64	6%	338%
MAQ-256	28%	533%

2.4.4 Procesamiento de la señal

En un sistema de radioenlace fijo, el procesamiento de la señal se lleva a cabo en los terminales transmisores y receptores. El procesamiento consiste en efectuar operaciones eléctricas sobre la señal para producir ciertos efectos deseados. El procesamiento de la señal puede afectar a parámetros tales como la amplitud, la frecuencia, la fase, el nivel de la señal y la fiabilidad. La utilización de técnicas de procesamiento de señal pueden mejorar la ganancia de un sistema, permitiendo niveles de P_t menores para criterios de calidad de funcionamiento en la salida del receptor especificados. Por lo tanto, mediante el uso de técnicas de procesamiento de la señal, se puede disminuir la P_t reduciendo la denegación espacial (área) a otros sistemas. Sin embargo, debe señalarse, que las técnicas de procesamiento de señal son utilizadas por los diseñadores de enlaces de microondas para mejorar la fiabilidad del enlace y generalmente no se toman en consideración a los efectos de la conservación del espectro.

2.4.5 Codificación/corrección de errores

La codificación/corrección de errores sin canal de retorno (FEC) es un método para mejorar la característica de BER de los sistemas de microondas digitales, particularmente cuando el sistema es de potencia limitada. La utilización de técnicas de codificación con FEC permite que se corrija un número limitado de errores en el extremo receptor por medio de una codificación especial y de realizaciones de soporte lógico (o de soporte físico) en ambos extremos del circuito. Se puede llegar a un compromiso entre la mejora de la BER y una reducción en la relación, C/N_i , para cumplir una calidad de BER especificada, reduciendo así el área denegada a otros sistemas. La reducción de $(C/N)_i$ se llama ganancia de codificación. La calidad de una técnica de codificación se describe por medio de la ganancia de codificación y la velocidad de codificación. Sin embargo, la velocidad de codificación repercute en la anchura de banda ocupada por el sistema, aumentando por consiguiente el espectro denegado a otros usuarios del mismo.

Para mostrar el efecto de la codificación en la conservación del espectro, se seleccionó la MAQ-64 como la modulación de estudio. Se seleccionaron cuatro tipos de códigos de FEC. El Cuadro 8 muestra la velocidad de codificación, el factor de expansión de la anchura de banda (1/velocidad de codificación), la anchura de banda ocupada, B , después de la codificación, la reducción obtenible de $(C/N)_i$ para una BER de 1×10^{-6} , y la P_t necesaria después de tomar en consideración la reducción obtenible de $(C/N)_i$. Los valores de la anchura de banda y de la potencia mostrados en el Cuadro 8, se utilizaron como datos de entrada del modelo de EUE para evaluar la codificación como una técnica de conservación de espectro. El Cuadro 9 muestra la EUE para los tres tipos de antena: STD, SHD y CHR. En el Cuadro 9 se presenta también la EUE para MAQ-64 sin codificación, como una base de comparación de los resultados con y sin codificación.

CUADRO 8

Codificación/corrección de errores (modulación MAQ-64)

Procesamiento de señal	Velocidad de codificación	Factor de expansión de la anchura de banda	Anchura de banda ocupada, B (MHz)	Reducción de C/N (dB)	Potencia de salida del transmisor, P_t (dBm)
Codificación con corrección de errores	1/2	2	45,00	6,0	27,5
	3/4	1,333	30,00	3,5	30,0
	7/8	1,142	25,70	2,0	31,5
	18/19	1,055	23,74	3,0	30,5

En resumen, los valores de la EUE dados en el Cuadro 9 indican que las técnicas de procesamiento de la señal, tales como la codificación/corrección de errores que utilizan compromisos entre la anchura de banda de RF y la relación C/N , sólo aportan mejoras significativas en la conservación del espectro (valores de EUE superiores) cuando se utilizan técnicas de codificación de alta eficacia (es decir, técnicas de codificación con altas velocidades y ganancia de codificación). Asimismo la mejora relativa en la conservación del espectro es mayor cuando el sistema está dotado de una antena del tipo STD en vez del tipo SHD o CHR. Esto se debe a que la reducción del área denegada es mayor para antenas STD por sus mejores características de lóbulos laterales/lóbulo posterior.

CUADRO 9

EUE para codificación/corrección de errores (modulación MAQ-64)

Tipo de procesamiento de señal		EUE para diferentes tipos de antena		
		STD	SHD	CHR
Sin procesamiento de señal		0,201	0,212	0,811
Codificación/corrección de errores	Velocidad de codificación			
	1/2	0,230	0,211	0,532
	3/4	0,249	0,240	0,673
	7/8	0,235	0,237	0,754
	18/19	0,294	0,285	0,838

2.4.6 Ecuallizadores adaptables/transversales

Los ecualizadores adaptables/transversales mejoran las características del sistema digital en presencia de desvanecimientos por trayectos múltiples, distorsión lineal, o ambos. Los ecualizadores sólo pueden mitigar los aspectos dispersivos del desvanecimiento por trayectos múltiples. Estos ecualizadores adaptables reconfiguran el impulso para minimizar la interferencia entre símbolos. Con dichas ecualizaciones se puede obtener una mejora de aproximadamente 4 dB a 6 dB en el margen de desvanecimiento compuesto en los receptores de MAQ-64. El mayor inconveniente de los ecualizadores adaptables es su coste. El modelo se hizo funcionar con una anchura de banda del sistema de 22,5 MHz y un nivel de P_t de 29,5 dBm (una reducción de 4 dB de la P_t para MAQ-64). El Cuadro 10 muestra la EUE para los tres tipos de antenas. También se presentan en el Cuadro los valores de la EUE sin ecualizadores adaptables a modo de comparación con los de ecualizadores adaptables.

CUADRO 10

Mejora de la EUE con ecualizador adaptable (modulación MAQ-64)

Tipo de procesamiento de señal	EUE para diferentes tipos de antena		
	STD	SHD	CHR
Sin procesamiento de señal	0,201	0,212	0,811
Con ecualizadores adaptables	0,355	0,337	0,930

Para la modulación MAQ-64 el empleo de ecualizadores adaptables puede mejorar las propiedades de conservación del espectro de un sistema, de un 15% a un 75% aproximadamente, dándose la mayor mejora en sistemas que utilizan antenas STD.

2.4.7 Codificación/corrección de errores y ecualizadores adaptables

Algunos sistemas digitales utilizan tanto la codificación/corrección de errores como los ecualizadores adaptables para mejorar las características del sistema. Para la modulación MAQ-64 la utilización de la codificación/corrección de errores (velocidad de codificación 18/19) y de ecualizadores adaptables puede reducir la relación $(C/N)_i$, en 7 dB para una BER = 1×10^{-6} . En el Cuadro 11 se muestra la aplicación de un modelo de EUE para una anchura de banda ocupada, B , de 23,74 MHz y una P_t de 26,5 dBm (una reducción de 7 dB en la P_t para la MAQ-64). También se muestra que la utilización de codificación con corrección de errores y ecualizadores adaptables pueden mejorar las propiedades de conservación del espectro de un sistema de un 30% a un 150%, dándose la mayor mejora en los sistemas que utilizan antenas parabólicas.

CUADRO 11

EUE, para la codificación/corrección de errores y ecualizadores adaptables (modulación MAQ-64)

Tipo de procesamiento de señal	EUE para diferentes tipos de antena		
	STD	SHD	CHR
Sin procesamiento de señal	0,201	0,212	0,811
Codificación/corrección de errores y ecualizadores	0,503	0,441	1,066

2.4.8 Resumen

2.4.8.1 En un sistema, el potencial de conservación del espectro es función de diversos factores de diseño, todos los cuales deben ser tenidos en cuenta en la evaluación de la EUE del sistema. No se puede decir que un sistema con una modulación particular conserva más el espectro que un sistema con otra modulación, sin considerar los otros factores de diseño, como las antenas, el procesamiento de señal, los filtros de RF, etc.

2.4.8.2 Las modulaciones digitales de orden superior (modulaciones con eficacia de transmisión superior, bit/(s · Hz) necesitan niveles de P_t superiores. Por ello, cuando se utiliza la definición de eficacia y utilización del espectro, que toma en consideración el área denegada, las modulaciones con mayor eficacia de transmisión bit/(s · Hz) pueden no ser necesariamente las que mejor conserven el espectro. Por consiguiente, la eficacia de transmisión bit/(s · Hz) de la modulación digital puede no ser suficiente como indicador de la eficacia del espectro.

NOTA 1 – Para más información, véase:

HINKLE, R.L. y FARRAR, A.A. [mayo de 1989] Spectrum-conservation techniques for fixed microwave systems. NTIA Report TR-89-243. National Telecommunications and Information Administration. US Dept. of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, Estados Unido de América.

2.5 ERE de radioenlaces rurales de un solo salto

Los valores de ERE de sistemas de radioenlace punto a multipunto rurales de un solo salto se compararon con el MTES empleando diferentes tipos de modulación (véanse el § 3 y la ecuación (4) del Anexo 1).

En el modelo adoptado para dicha red, cada estación central tiene un área de servicio específica dentro de la cual se comunica por enlaces radioeléctricos de sección única con cuatro estaciones locales situadas en emplazamientos rurales diferentes.

Se calculó la ERE de dicha red en relación con el MTES, en función de un amplio número de parámetros: la banda de frecuencias empleada, el tipo de frecuencia y la planificación del espacio de polarización de la red, la altura a la que se suspende la antena y el diámetro de la antena según diferentes tipos y parámetros de modulación (MF y modulación por impulsos codificados (MIC) con MDP- M -aria).

En el Cuadro 12 se presentan los resultados de dichos cálculos con un funcionamiento de red en la banda de frecuencias de 8 GHz, una antena suspendida a 45 m, diámetros de antena, D , de 1,5 m a 3,0 m, explotaciones con 2 y 4 frecuencias ($K = 2$ y $K = 4$, respectivamente) y dos tipos de planos de polarización, utilizando en la red un solo tipo (1P) y dos (2P) tipos de polarización. Para la MIC, se muestran los datos correspondientes a MDP-2 ($M = 2$), MDP-4 ($M = 4$) y a un valor ($M_{m\acute{a}x}$) que determina el valor máximo de ERE. Los guiones en el Cuadro 12 indican que en la configuración de parámetros dada, las normas de calidad características no se cumplen. Como se desprende del Cuadro 12, la utilización de MIC con MDP sólo produce un aumento de la ERE cuando las condiciones de modulación son óptimas ($M_{m\acute{a}x} \geq 8$) y las antenas tienen un diámetro de 3 m.

NOTA 1 – Para más información, véase el Anexo IV al Informe 662-3 (Düsseldorf, 1990).

CUADRO 12

ERE de radioenlaces rurales de un solo salto

Modulación	Plan de frecuencias	Parámetros de modulación	ERE			
			$D = 1,5$ m		$D = 3,0$ m	
			1P	2P	1P	2P
MF	$K = 2$		0,27	0,3	0,285	0,285
	$K = 4$		0,2	0,25	0,25	0,25
MIC	$K = 2$	$M = 2$	–	–	0,055	0,049
		$M = 4$	–	–	–	–
		$M_{m\acute{a}x}$	–	–	0,055	0,055
	$K = 4$	$M = 2$	0,125	0,0625	0,0625	0,0625
		$M = 4$	0,125	0,125	0,125	0,125
		$M_{m\acute{a}x}$	0,25	0,25	0,25	0,5