

RECOMENDACIÓN UIT-R S.1425

CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSMISIÓN DE PORTADORAS DIGITALES QUE UTILIZAN LOS NIVELES DE MODULACIÓN MÁS ELEVADOS EN LOS CIRCUITOS POR SATÉLITES*

(Cuestiones UIT-R 73/4 y UIT-R 230/4)

(2000)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el espectro radioeléctrico y la órbita de los satélites geoestacionarios son recursos limitados;
- b) que existe congestión del espectro en algunas bandas de frecuencias atribuidas al SFS;
- c) que debido al rápido desarrollo de distintos servicios de radiocomunicaciones, las condiciones de compartición en muchas bandas de frecuencias son cada vez más difíciles;
- d) que la eficacia espectral de las redes de satélites puede aumentarse utilizando modulaciones de nivel más elevado tales como la MDP-8 y MAQ-16, en comparación con la MDP-4;
- e) que la eficacia de la potencia de las redes de satélites puede mejorarse utilizando las técnicas de codificación adecuadas;
- f) que hay una continua necesidad de actualizar la información disponible sobre las características de las transmisiones de satélites y su calidad de funcionamiento correspondiente;
- g) que pueden aplicarse diversas técnicas de transmisión para transportar el mismo tren de información,

teniendo en cuenta

- a) que los circuitos de satélites que transmiten modulaciones de niveles más elevados, y en particular la MAQ tal como la MAQ-16, son más sensibles a las distorsiones lineales y no lineales que los que transmiten señales MDP-4;
- b) que los circuitos de satélites que transmiten modulaciones de niveles más elevados tales como MDP-8 y MAQ-16 son más sensibles al ruido de fase que los que transmiten en formato MDP-4;
- c) que la utilización de técnicas de modulación de nivel más elevado mejora la eficacia de la anchura de banda para una determinada relación E_b/N_0 a expensas de utilizar más potencia en el transmisor o un mayor valor tanto de la relación G/T como de la p.i.r.e. en la estación terrena,

recomienda

- 1** que la información contenida en el Anexo 1 sirva como orientación para lograr la calidad de transmisión en los circuitos de satélites que utilizan modulaciones de niveles más elevados tales como MDP-8 y MAQ-16.

* Esta Recomendación debe señalarse a la atención de los Grupos de Trabajo 4 SNG y 10-11S de Radiocomunicaciones.

Consideraciones sobre la transmisión de portadoras que utilizan los niveles de modulación más elevados en los circuitos por satélites

1 Introducción

El presente Anexo proporciona información sobre el desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a su utilización por las redes del SFS, pero no exclusivamente de las mismas. El objeto inicial de estos desarrollos es aumentar la capacidad del espectro disponible atribuido a este servicio. Ello puede lograrse utilizando procesos de modulación más eficaces para la transmisión de la información.

2 Antecedentes

2.1 Objetivo

Con el aumento de la potencia del transpondedor de satélite y con el empleo de técnicas de corrección de errores concatenados ha sido posible utilizar esquemas de modulación con niveles más elevados tales como MDP-8 y MAQ-16 para su aplicación en los sistemas de comunicaciones de satélites en órbita de satélites geoestacionarios (OSG). Estas modulaciones de orden superior mejoran significativamente la eficacia de la anchura de banda del transpondedor, que se adapta a las necesidades en cuanto a estructura y aplicaciones del formato de banda ancha, tales como el modo de transferencia asíncrono (ATM), la retransmisión de trama y la TVAD. Para lograr una calidad de servicio aceptable, caracterizada por un valor reducido de la BER, así como velocidades de transmisión de datos más elevadas con las modulaciones de orden superior es necesario no sólo lograr una mayor relación C/N a la entrada del demodulador sino también controlar la interferencia y limitar la distorsión en los circuitos de transmisión del satélite.

Esta Recomendación describe la naturaleza de las modulaciones de orden más elevado que se pueden aplicar a las redes de satélites geoestacionarios e indica las razones de su susceptibilidad y mayor sensibilidad a las degradaciones de la transmisión. También describe las pruebas y resultados de los circuitos MDP-8 y MAQ-16 establecidos para determinar sus requisitos de funcionamiento en una red de satélites típica.

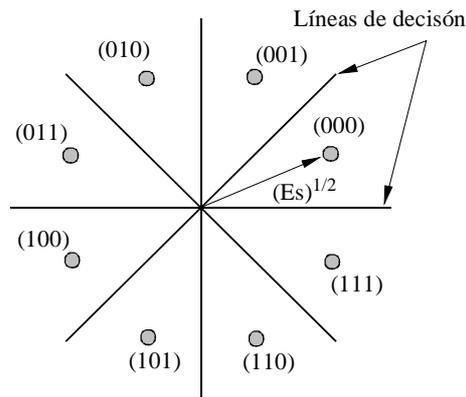
2.2 Esquemas de modulación MDP-8 y MAQ-16

En una MDP-8 el símbolo transmitido es una portadora sinusoidal con 8 fases equiespaciadas. En la Fig. 1 se representa el diagrama señal-espacio.

Cada símbolo del esquema MDP-8 representa tres ocupaciones de bits de usuario y en el método MDP-4 cada símbolo son dos bits, mejorando de esa forma la utilización de la anchura de banda en un 50%. Por otro lado, cada símbolo se encuentra 45° más próximo a los demás en fase, en comparación con los símbolos del esquema MDP-4 que supone una mayor dificultad en los procesos de toma de decisión por parte del receptor. Los cálculos teóricos han demostrado que si no se aplican técnicas de corrección de errores, el esquema MDP-8 exige 7 dB más de energía por bit que el esquema MDP-4 para lograr una BER de 1×10^{-8} .

La Fig. 2 es el diagrama señal-espacio de un ejemplo de modulación de amplitud en cuadratura 4×4 (MAQ-16). Cada símbolo representa 4 bits de información y requiere que el receptor distinga entre las distintas combinaciones de los procesos de modulación de fase y amplitud. Como puede verse en dicha Figura, el receptor debe distinguir entre las 12 fases y cuatro amplitudes posibles para tomar una decisión. Como la separación entre los estados de la señal es aún menor que en el caso de MDP-8, tanto el ruido de amplitud como el ruido de fase tienen un efecto más acusado en el proceso de toma de decisión. Sin embargo, aunque es más vulnerable a las degradaciones de la transmisión que el esquema MDP-8, la utilización de la anchura de banda mejora en un 100% en comparación con el método MDP-4.

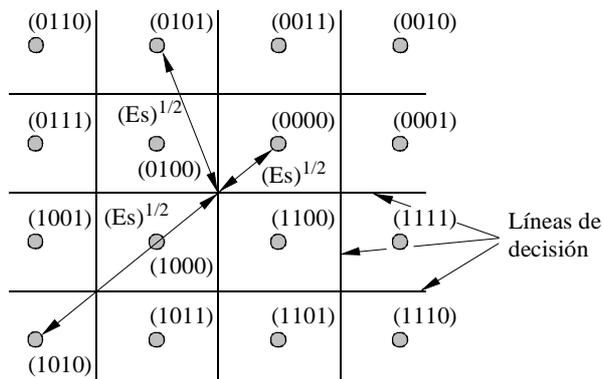
FIGURA 1
Diagrama señal-espacio MDP-8



Es: Energía por símbolo

1425-01

FIGURA 2
Diagrama señal-espacio MAQ-16



Es: Energía por símbolo

1425-02

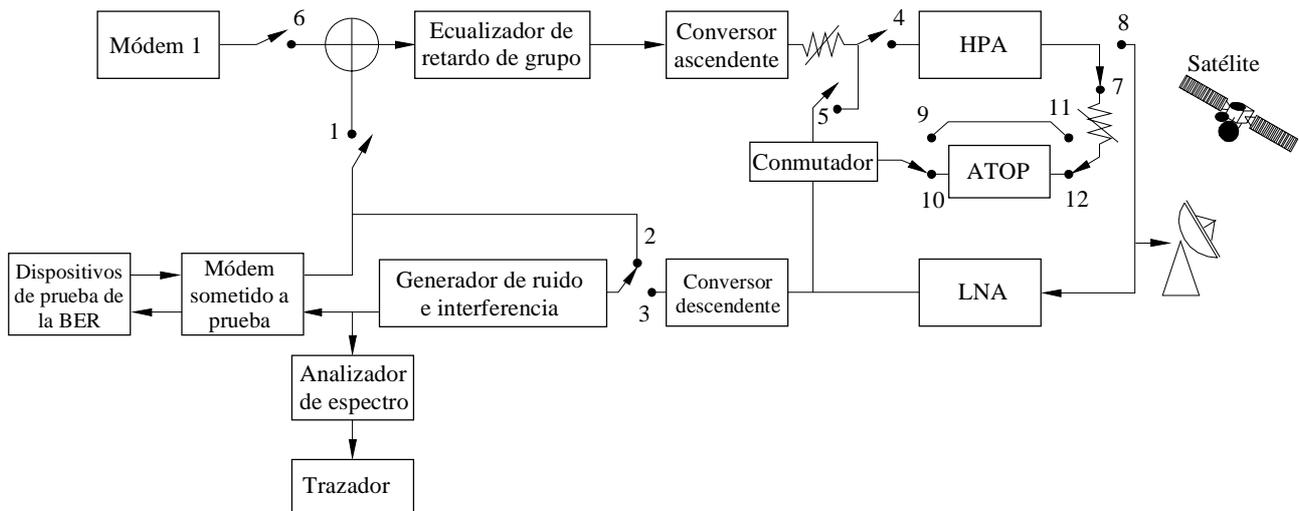
3 Métodos y mediciones en la prueba de transmisión

3.1 Descripción del dispositivo de prueba

Se han realizado pruebas para determinar la capacidad y las limitaciones del circuito necesarias para realizar transmisiones en banda ancha MAQ-16 en una red de satélites. A tal efecto se creó una configuración de prueba flexible que también permitía determinar y optimizar los puntos de nivel de transmisión intermedios asociados con los elementos de transmisión no lineales de la red. La Fig. 3 representa el diagrama de bloques de la configuración de prueba utilizada. Los puntos de conmutación que aparecen en dicha Figura tienen por objeto resaltar la variedad de las configuraciones de prueba utilizadas.

FIGURA 3

Dispositivo para realizar las pruebas de transmisión de datos



ATOP: amplificador de tubo de ondas progresivas

HPA: amplificador de alta potencia

LNA: amplificador de bajo nivel de ruido

1425-03

La anchura de banda de transmisión de cualquiera de las configuraciones de la red se limitó a la de un transpondedor de 36 MHz. En todas las pruebas, se eligió una velocidad de transmisión digital de 45 Mbit/s (DS-3). Las anchuras de banda espectrales de los módems de datos MDP-8 y MAQ-16 utilizados en estas pruebas fueron de aproximadamente 26 MHz y 15 MHz. Ello permitió una transmisión multiportadora en un solo transpondedor para el esquema MAQ-16. Todos los módems y en todas las velocidades utilizadas en las pruebas aquí indicadas incorporaban una FEC de índice 3/4 y una codificación exterior Reed-Solomon (RS) 188,204 concatenada.

Las mediciones de la BER efectuadas durante estas pruebas se hicieron con respecto a las relaciones E_b/N_0 . A efectos de presentación, los resultados se convirtieron a un formato C/N . La conversión entre ambos formatos se logra aplicando la siguiente fórmula:

$$C/N = E_b/N_0 + 10 \log (p \times FEC \times RS/1,2)$$

siendo:

$$p = 2 \text{ para MDP-4}$$

$$= 3 \text{ para MDP-8}$$

$$= 4 \text{ para MAQ-16}$$

FEC : velocidad de codificación FEC (por ejemplo, 3/4)

RS : velocidad de codificación Reed-Solomon (por ejemplo, (188,204))

1,2: relación entre la anchura de banda y la velocidad de símbolos.

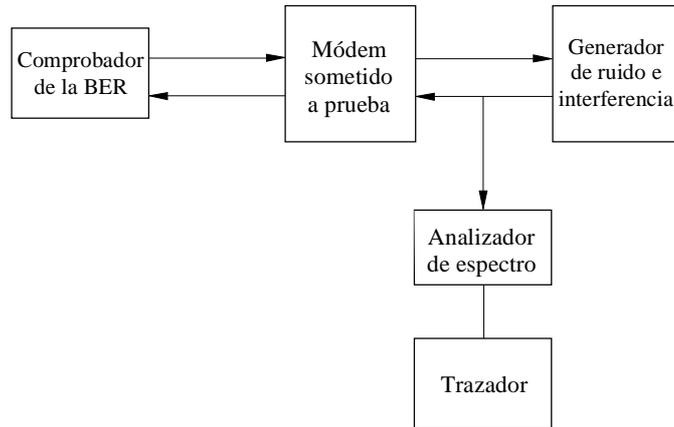
3.2 Configuraciones de prueba y resultados

3.2.1 Prueba del bucle de FI básico

Se estableció una configuración de prueba inicial para probar los módems en un dispositivo de bucle FI. Se logró de una manera figurada cerrando el punto de conmutación 2 y abriendo el punto de conmutación 1 del dispositivo mostrado en la Fig. 3, dando lugar a la configuración de prueba representada en la Fig. 4. El objeto de las pruebas era lograr un circuito básico para efectuar las mediciones de prueba en RF. Dichas mediciones se realizaron para los esquemas MDP-4, MDP-8 y MAQ-16. En la Fig. 5 aparece la característica de la BER resultante para cada esquema de modulación.

FIGURA 4

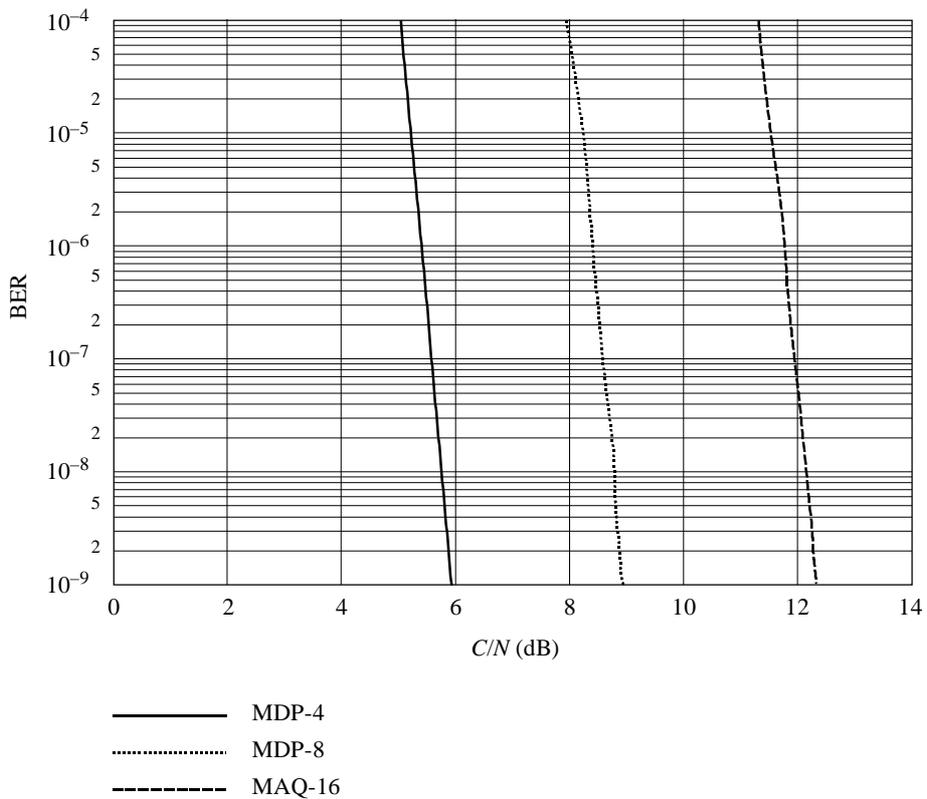
Diagrama de bloques del dispositivo de prueba del bucle de FI



1425-04

FIGURA 5

Resultados de la prueba del bucle de FI



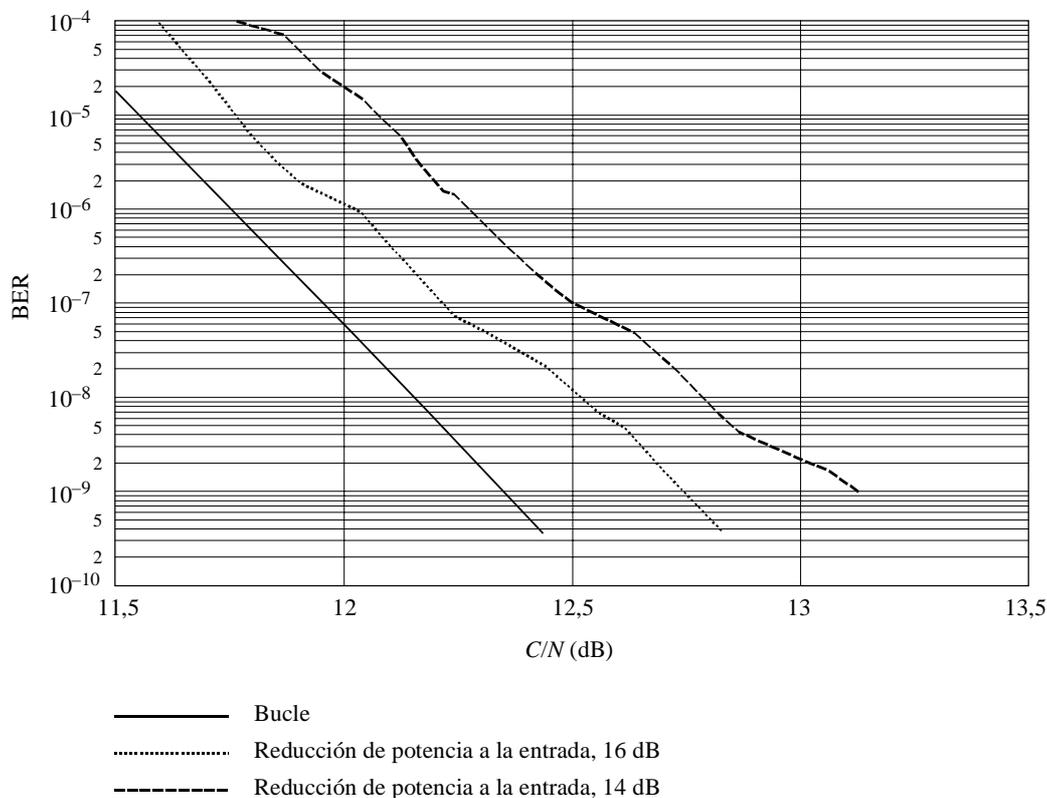
1425-05

Puede observarse en la Fig. 5 que para una BER de 1×10^{-8} el valor requerido de la relación C/N del circuito en el caso de MDP-4, MDP-8 y MAQ-16 es de 5,5, 8,7 y 12,2 dB, respectivamente.

3.2.2 Prueba básica en RF

Para cuantificar los efectos de la no linealidad del HPA de la estación terrena, el dispositivo de prueba se configuró (de manera figurada cerrando los puntos de conmutación 3, 4, 6 y 7) de manera que se establecía un trayecto que excluía las componentes espaciales. Se realizaron pruebas para determinar los efectos de la distorsión de la linealidad en el esquema MAQ-16 reducido a la potencia de la señal de entrada desde el nivel de saturación del HPA hasta obtener un punto de funcionamiento aceptable. Una serie de pruebas indicaron que se necesitaba entre 14 y 16 dB de reducción de potencia a la entrada con respecto al nivel de saturación antes de lograr niveles de no linealidad aceptables. La Fig. 6 presenta un gráfico con las degradaciones de la calidad de funcionamiento debidas a la no linealidad del HPA en comparación con el caso del bucle de FI. Los resultados muestran que si el HPA funciona en un punto igual a 14 a 16 dB de reducción de potencia a la entrada, se aumenta la C/N requerida entre 0,4 y 0,6 dB para una BER de 1×10^{-8} .

FIGURA 6
Linealidad del HPA de la estación terrena
Reducción de potencia de la portadora a la entrada, MAQ-16



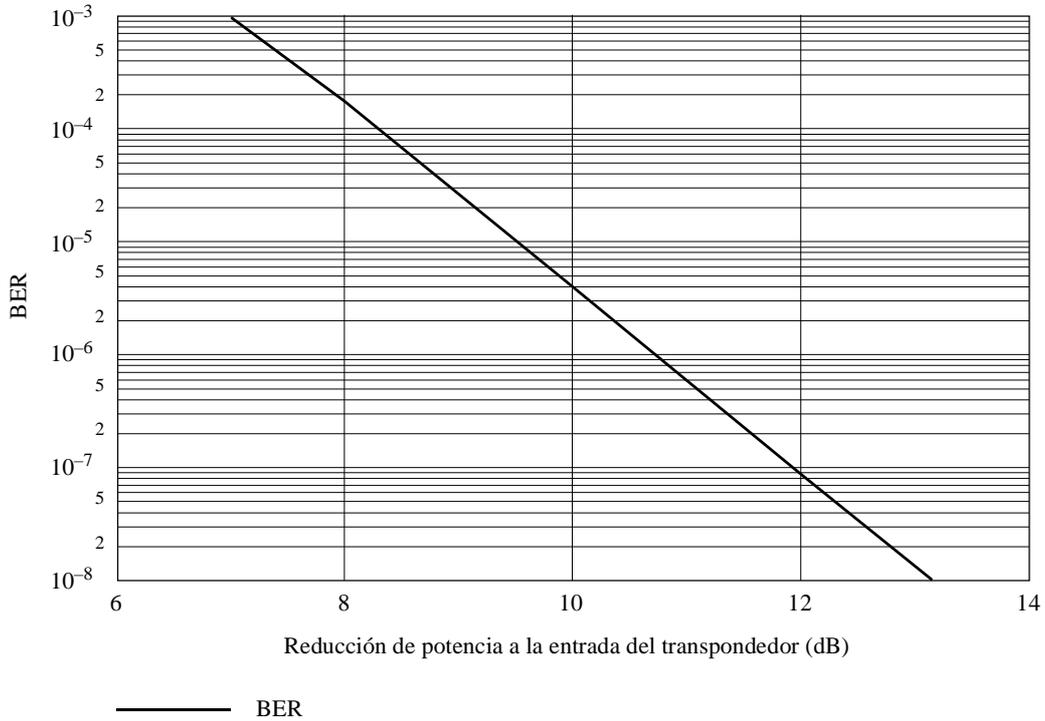
1425-06

3.2.3 Linealidad del transponder del satélite

Para determinar un punto de funcionamiento aceptable del ATOP del satélite, la red se configuró de manera que incluyese una componente de trayecto de RF (de manera figurada cerrando los puntos de conmutación 3, 4, 7, 10 y 12). Con ello se encaminó la señal de RF a través del ATOP. La prueba consistió en variar el nivel de una sola portadora MAQ-16 a la entrada del ATOP mientras que la entrada al HPA se mantenía con una reducción de potencia de 16 dB y una relación C/N constante de aproximadamente 14 dB. La Fig. 7 representa la característica de la BER para MAQ-16 a la salida del ATOP, en función de la reducción de potencia de la señal de entrada con respecto a su punto de saturación. En el Cuadro 1 aparecen las características de transferencia para un ATOP típico.

FIGURA 7

Linealidad del transpondedor del satélite
Reducción de potencia a la entrada del HPA de la estación terrena = 16 dB,
C/N a la entrada del ATOP = 13,8 dB



1425-07

CUADRO 1

Características de transferencia de un ATOP típico

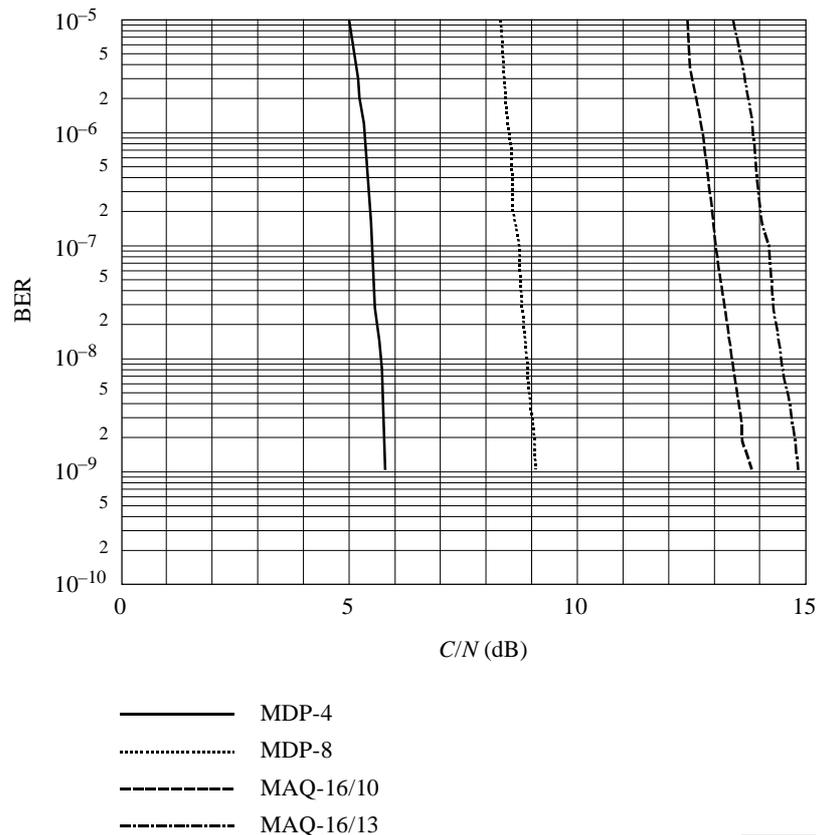
Reducción de potencia a la entrada (dB)	Reducción de potencia a la salida (dB)
0,0	0,0
1,0	0,1
2,0	0,3
3,0	0,6
4,0	1,0
5,0	1,4
6,0	1,8
7,0	2,4
8,0	3,0
9,0	3,8
10,0	4,6
11,0	5,5
12,0	6,5
13,0	7,6

3.2.4 Pruebas de todo el sistema

La Fig. 8 presenta la característica de la BER para una sola portadora MDP-4, MDP-8 y MAQ-16 a través de una red completa. Los resultados de la prueba se muestran para dos niveles de entrada en el receptor del satélite, que

corresponden a unas reducciones de potencia a nivel de entrada en el punto de funcionamiento del ATOP del satélite de 13 dB y 10 dB. El punto de funcionamiento del HPA de la estación terrena se mantuvo con una reducción de potencia constante de 16 dB. La comparación de las Figs. 5 y 8 demuestra que se produce una degradación en la característica de la BER de la red completa con respecto a la configuración del bucle de FI de aproximadamente 1,1 a 2,5 dB, dependiendo de la reducción de potencia a la entrada del ATOP del satélite.

FIGURA 8
Sistema completo
Reducción de potencia a la entrada del HPA/ATOP = 16/10 y 16/13 dB



1425-08

3.2.5 Configuración multiportadora y resultados de la prueba

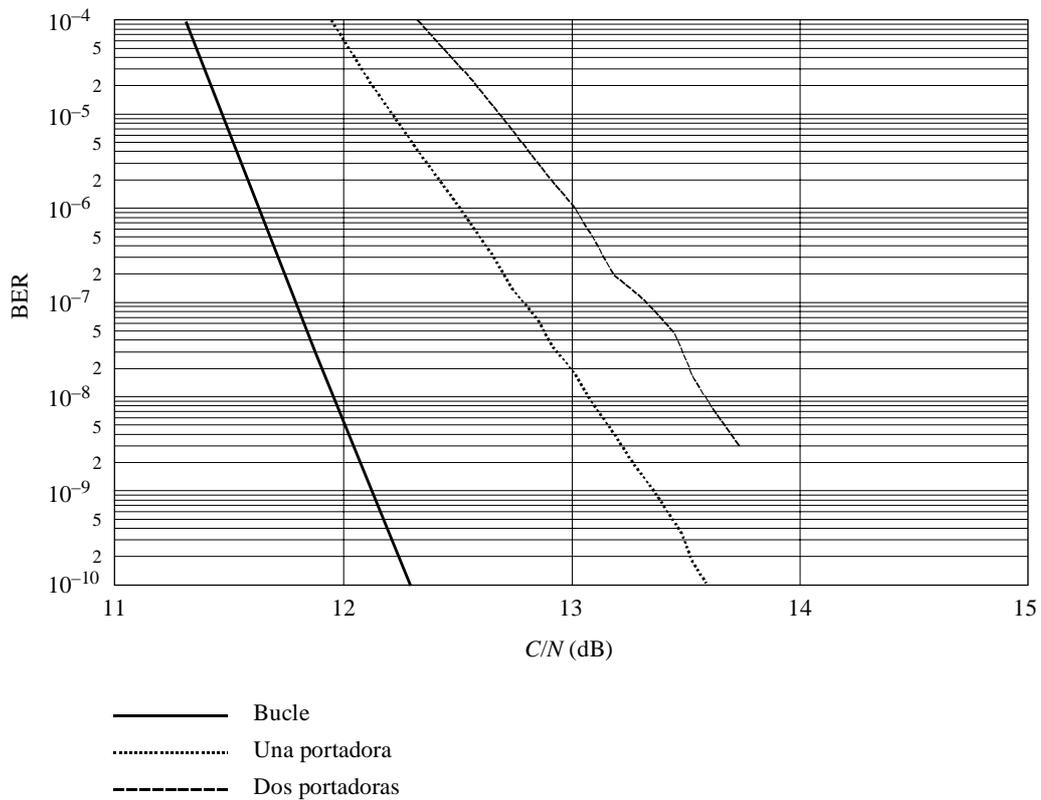
Se configuró un dispositivo de prueba multiportadora añadiendo un segundo módem a la red (cerrando los puntos de conmutación 3, 4, 6 y 8). Las pruebas se realizaron sobre un trayecto de RF configurado con dos portadoras MAQ-16 funcionando a 45 Mbit/s cargadas en un solo transpondedor. Las frecuencias centrales de las portadoras se ajustaron para una separación de 17 MHz una vez centradas en el transpondedor de 36 MHz. La potencia de entrada total al HPA/ATOP se mantuvo en el punto de reducción de potencia de 16/13 dB. La Fig. 9 compara los resultados de la BER del caso del bucle de FI con la situación de una y dos portadoras. Puede observarse que para una BER de 1×10^{-8} la calidad de funcionamiento por canal de dos portadoras MAQ-16 a 45 Mbit/s funcionando en un solo transpondedor se degrada únicamente 1,7 dB en comparación con la configuración básica del bucle de FI.

3.3 Resumen de los resultados sobre la calidad de funcionamiento

Las pruebas sobre la característica de la BER para portadoras únicas a 45 Mbit/s se realizaron en circuitos de satélites para los esquemas MDP-4, MDP-8 y MAQ-16. Cada portadora utilizaba un código de convolución interno de índice 3/4 en código exterior RS de 188,204. En la Fig. 8 aparecen los resultados de la característica de la BER para las tres modulaciones y en la Fig. 9 se compara la característica de la BER para el caso de una y dos portadoras MAQ-16.

El Cuadro 2 resume los requisitos de la relación C/N_0 en el demodulador del receptor para una BER de 1×10^{-8} en cada uno de los tres esquemas de modulación.

FIGURA 9
Múltiples portadoras MAQ-16
 Reducción de potencia a la entrada del ATOP = 13 dB total



1425-09

CUADRO 2
C/N requerida para una BER de 1×10^{-8} en portadoras MDP-4, MDP-8 y MAQ-16

Configuración	MDP-4	MDP-8	MAQ-16
FEC + RS	3/4 + 188,204	3/4 + 188,204	3/4 + 188,204
Bucle de FI (dB)	5,7	8,7	12,2
Una sola portadora, reducción de potencia a la entrada del HPA/ATOP = 16/13 (dB)	5,7	8,8	13,2
Dos portadoras, reducción de potencia a la entrada del HPA/ATOP = 16/13 (dB)			13,6

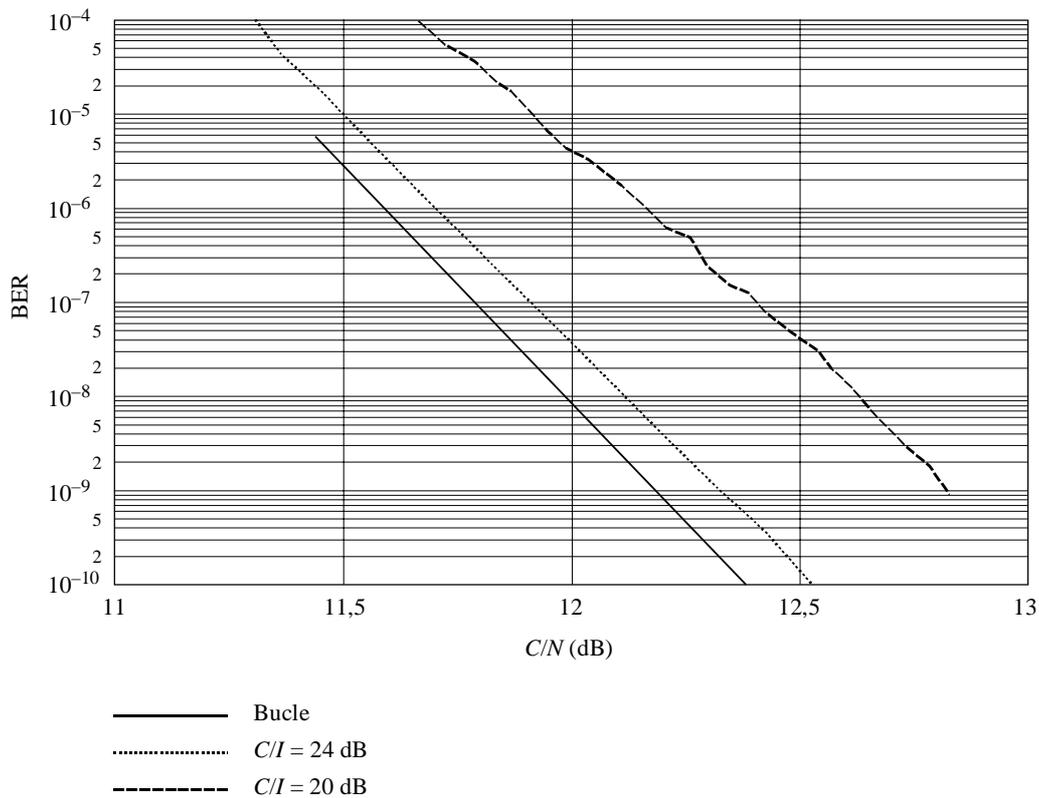
3.4 Efectos de la interferencia cocanal

Para determinar los efectos de la interferencia cocanal se introdujo una señal interferente con modulación digital en la configuración de prueba indicada en la Fig. 2 para el modo de prueba en bucle de FI. La interferencia se ajustó para unos niveles de C/I de 20 dB y 24 dB. Se midió la BER para diversos niveles de C/N_0 en presencia y en ausencia de la señal interferente.

La Fig. 10 muestra la característica de la BER en el caso de una sola portadora MAQ-16 y para diversas hipótesis de interferencia. Es evidente que la interferencia causada a un circuito MAQ-16 debe controlarse cuidadosamente.

FIGURA 10

Prueba en bucle, sensibilidad a la interferencia del esquema MAQ-16



1425-10

4 Conclusiones

De los resultados anteriores se deduce que las modulaciones de orden más elevado, tales como la MAQ-16, mejoran la eficacia de la anchura de banda para un valor determinado de la relación E_b/N_0 a expensas de utilizar más potencia en el transpondedor y una mayor p.i.r.e. de la estación terrena. Además de la contribución importante en las pérdidas debidas a la lluvia en las bandas 14/11 GHz y 30/20 GHz, las características no lineales de la red de satélites juegan un papel muy importante en la distorsión de la señal recibida en el demodulador del receptor.

Una de las consideraciones importantes en la aplicación de modulaciones de orden más elevado para el funcionamiento de los satélites es la necesidad de controlar el nivel de entrada en el ATOP del satélite o la distorsión resultante procedente del mismo. Ello sugiere la posible necesidad de establecer un control de potencia en la estación terrena.

También cabe señalar que durante ninguna de las pruebas anteriores se utilizó ecualización de amplitud ni ecualización de fase, lo cual sugiere que puede lograrse una mejora en la calidad de funcionamiento utilizando linealizadores y ecualizadores, en el vehículo espacial o en el trayecto del enlace ascendente.

Los resultados de las pruebas indican que los tres esquemas de modulación de portadora resultan, en sentido relativo, igualmente afectados por los cambios en el nivel de C/N de funcionamiento. Por ejemplo, en las tres situaciones, si la BER es de 1×10^{-10} , caerá a 1×10^{-3} si la C/N de la red disminuye a menos de 2 dB. En muchas aplicaciones, una BER de 1×10^{-3} es inaceptable.