

**CALIDAD DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS DEL SERVICIO MÓVIL MARÍTIMO POR
SATÉLITE CON BAJOS ÁNGULOS DE ELEVACIÓN**

(Cuestión 88/8)

(1982-1986-1990)

1. Introducción

La calidad de funcionamiento de un sistema marítimo por satélite con bajos ángulos de elevación se ve afectada, entre otras cosas, por una serie de factores de propagación. Seguidamente se describen los resultados de las pruebas realizadas por — los Estados Unidos de América y la U.R.S.S., y se hace una evaluación preliminar de la calidad de funcionamiento del sistema con bajos ángulos de elevación.

2. Pruebas realizadas en los Estados Unidos de América**2.1 Antecedentes**

En octubre de 1978, se realizó en Estados Unidos de América un experimento para determinar la degradación de las señales satélite-barco y barco-satélite en ángulos de elevación bajos en las bandas 1,5/1,6 GHz utilizando el satélite Marisat del Océano Atlántico. Se utilizó una estación terrena de barco MARISAT con una relación G/T de $-4 \text{ dB(K}^{-1})$ a bordo del buque Mobile AERO, un petrolero de 18 600 toneladas en ruta de Norfolk, Virginia, a Texas City, Texas, con ángulos de elevación que oscilaron entre 17° y 0° . Se hicieron mediciones básicas durante la parte inicial del viaje. Durante la navegación en línea recta entre Tampa, Florida y Texas City, Texas, siguiendo un rumbo de 274° , el ángulo de elevación entre la estación terrena de barco y el satélite disminuyó continuamente de 11° a $0,3^\circ$, a razón de $0,3^\circ$ por hora por término medio. El experimento se realizó ininterrumpidamente durante ese periodo de 40 h.

2.2 Obtención de los datos

El esquema funcional del equipo de medición utilizado en la estación terrena del barco aparece en la fig. 1. Se utilizó un equipo de prueba de datos modelo IDS-1310A con objeto de generar datos a 2400 ó 1200 bit/s para aplicarlos a un módem MDP diferencial (MDPD) (ICC-24LSI) o a un módem MDF (GDS1200ES) respectivamente. El punto de entrada/salida era el conector de datos en la consola de la estación terrena del barco (telefonía/datos). Para ajustar el nivel de interfaz entre la consola y el módem se insertó en el conector de datos un atenuador variable de 600 ohmios, que no aparece en la fig. 1. El tamaño de los bloques para cada prueba de transmisión/recepción podía ser de 10^6 ó 10^7 bit/s, con una duración total de 7 ó 70 min en las pruebas a 2400 bit/s y una duración doble en las pruebas a 1200 bit/s. Además de la lectura directa del equipo de prueba para datos, se utilizó un impresor para registrar la tasa de errores en los bits [Fang y otros, 1981].

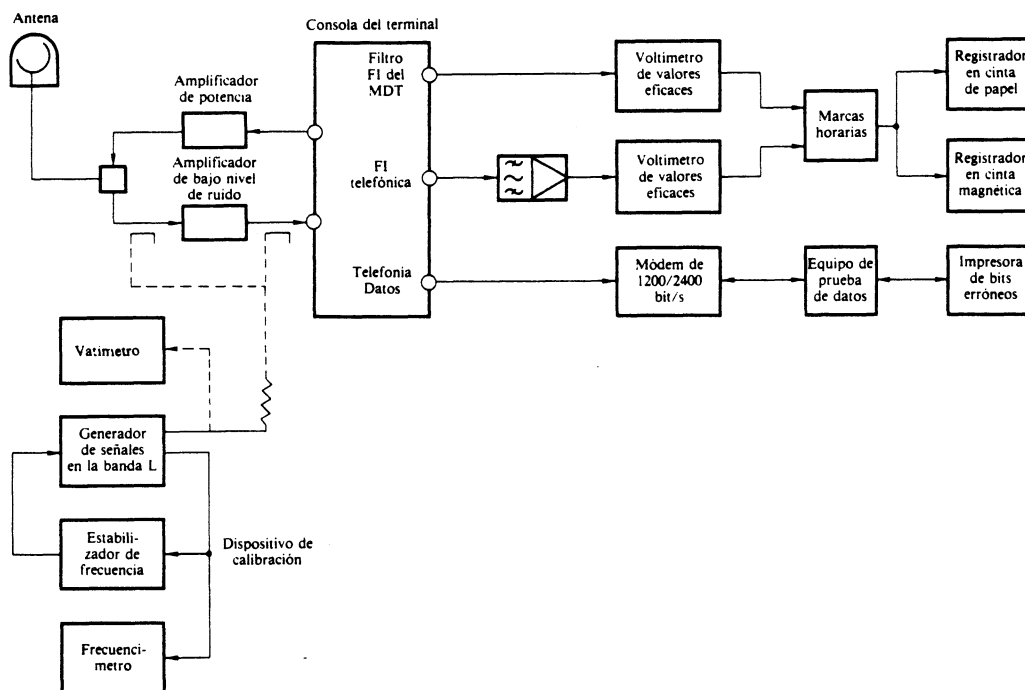


FIGURA 1 - Equipo experimental utilizado en la estación terrestre del barco

2.3 Condiciones experimentales

Para poder evaluar la degradación de la señal de las portadoras MDT recibidas a causa de anomalías en la atmósfera y en la superficie del mar es preciso determinar primero los desplazamientos que sufre el nivel de la portadora por efecto de la asignación a petición de las conexiones telefónicas. Para ello, se midieron los niveles de las señales durante la primera parte del experimento, cuando el ángulo de elevación era superior a 10° . La distribución del tráfico telefónico no fue uniforme durante ningún periodo completo de 24 h. La hora cargada del tráfico telefónico barco-costera y barco-barco a través del satélite Marisat del Océano Atlántico se concentraba generalmente en las primeras horas de la mañana, entre las 03.30 y las 05.30 y las últimas horas de la mañana, entre las 08.30 y las 11.30 (hora normal del Este en los Estados Unidos).

Mientras duró el experimento, el tiempo fue apacible. El cielo estaba despejado o nuboso pero en ningún momento llovió. La velocidad del viento fue por lo general inferior a 15 nudos (28 km/h).

El oleaje máximo durante el periodo del experimento fue de grado 4, que corresponde a una altura de las olas de aproximadamente 1,2 m (4 pies) y se considera a un mar relativamente en calma. Sin embargo, la superficie del mar estaba bastante agitada por lo que atañe al experimento de propagación por microondas, ya que en la banda L la longitud de onda es de 0,2 m, es decir, solamente $1/6$ de la amplitud máxima de las olas de grado 4.

2.4 Resultados experimentales

2.4.1 Características portadora/ruido

Como las portadoras telefónicas y MDT en el sentido satélite-barco son amplificadas por un TOP común de 1,5 GHz, siempre que hay una modificación del tráfico telefónico se produce una redistribución de las potencias de RF. Esta es otra causa más de las variaciones en el nivel de la portadora.

Aunque estas variaciones se producen tanto en portadoras telefónicas como en portadoras MDT, los grados de las mismas no son iguales. Se midieron los niveles de la portadora MDT que estaban constantemente disponibles para determinar la variación de la relación C/N en la banda 1,5/1,6 GHz en función del ángulo de elevación (de hecho se midió $(C+N)/N$ en todos los casos; se sobreentiende que, en los datos medidos, C/N significa siempre $(C+N)/N$). Además se midieron los niveles de la portadora telefónica durante los periodos de comunicación telefónica o de transmisión y recepción de señales digitales de datos para determinar la correlación entre la relación C/N del canal telefónico y la tasa de bits erróneos en las señales digitales.

Hay dos diferencias principales en las características de la calidad de funcionamiento con ángulos de elevación altos y bajos:

- el nivel de la relación C/N media disminuye con la disminución del ángulo de elevación, y
- las fluctuaciones cresta a cresta del valor C/N aumentan respecto a su valor medio, con la disminución del ángulo de elevación.

Cuando el ángulo de elevación es extremadamente bajo, es decir, inferior a 2° , la reducción del valor medio y las fluctuaciones cresta a cresta de la relación C/N son tan importantes que es imposible identificar las variaciones del nivel de la portadora debidas a la presencia de tráfico telefónico simultáneo.

2.4.2 Tasa de errores en los bits (BER) en función de la relación C/N

Para la medición ideal de la tasa de errores en los bits, la relación C/N de la señal debe permanecer en un nivel fijo, es decir, con poca o ninguna variación mientras se transmiten los datos digitales. La tasa de errores en los bits observada en un bloque de 10^6 ó 10^7 bits proporciona entonces una medida auténtica de la probabilidad de errores con un alto grado de confianza. Además, si es posible repetir esta medición ideal para diferentes ángulos de elevación, es fácil determinar los efectos del ángulo de elevación en la tasa de errores en los bits.

Desafortunadamente nunca se dio esta situación ideal durante las pruebas a bordo del barco. En primer lugar, el número de comunicaciones telefónicas modificaba de cuando en cuando el nivel de la relación C/N . Incluso en un periodo de siete minutos, que era el periodo de tiempo mínimo requerido para retransmitir un bloque de 10^6 bits a 2400 bit/s, el número de comunicaciones telefónicas simultáneas cambiaba a menudo cuatro o cinco veces. Además, las fluctuaciones de la señal eran grandes en ángulos de elevación bajos. Esas fluctuaciones hacían que a veces la relación C/N descendiese por debajo del umbral necesario para mantener la sincronización de la transmisión digital. Como consecuencia, los descensos instantáneos de la relación C/N por debajo del umbral a causa de las fluctuaciones de la señal causaban gran cantidad de errores durante periodos de tiempo prolongados. Aun cuando la relación C/N volvía a adquirir rápidamente un nivel adecuado, el restablecimiento de la sincronización tomaba cierto tiempo.

Para superar esas dificultades en el análisis de los datos, cada prueba de transmisión digital de datos se subdividió en varias partes, basadas en la aparición de variaciones repentinas de los niveles de C/N . En un periodo de tres minutos la variación de C/N en torno a su valor medio fue de 2 a 4 dB, lo que provocó una pérdida de sincronización, mientras que en el periodo de nueve minutos siguiente la C/N varió entre 1,0 y 4,0 dB, lo que se tradujo en una tasa de bits erróneos de 28×10^{-4} sin pérdida de sincronización. Esta irregularidad se debe a que los casos de existencia de errores en los bits y de pérdida de sincronización son fenómenos aleatorios. Sólo era observable una regularidad estadística cuando se disponía de una muestra del tamaño adecuado, lo que no siempre era el caso en las subdivisiones. Además, las fluctuaciones cresta a cresta de la relación C/N telefónica excedían a veces de 5,0 dB o más. No tenía sentido determinar en esos casos la tasa de errores en los bits en relación con un valor fijo de C/N . La degradación de la tasa de errores en los bits para los ángulos de elevación inferiores a 5° era todavía mayor.

Los datos sobre la tasa de errores en los bits con ángulos de elevación superiores a 5° eran por lo general mucho más fáciles de tratar porque la C/N media era mayor y las fluctuaciones cresta a cresta de C/N eran menos importantes, lo que disminuía considerablemente las posibilidades de pérdida de sincronización. Los resultados en materia de tasa de errores en los bits en función de la gama de variación de C/N durante la medición constan en las figs. 2 y 3 respecto a la transmisión MDPD a 2400 bits/s en ángulos de elevación entre 5° y 11° y entre 11° y 15° respectivamente, y en la fig. 4 para la transmisión MDF a 1200 bits/s en ángulos de elevación entre 5° y 11° . En las figuras se presentan también las curvas de tasa de errores en los bits en función de la C/N media que mejor se ajustan a los datos. La pauta general de las curvas de ajuste de la tasa de errores en los bits obedece de hecho a una clase general de funciones de error, lo que es conforme a las previsiones teóricas.

3. Pruebas efectuadas por la U.R.S.S.

3.1 Antecedentes

La U.R.S.S. efectuó experimentos a bordo del barco «Magnitogorsk» (de 220 m de largo y 25 000 t.r.b.) durante el periodo comprendido entre noviembre de 1979 y febrero de 1980. El objetivo de las pruebas era reunir y procesar datos experimentales relativos a la calidad de funcionamiento del sistema MARISAT con bajos ángulos de elevación. Mientras el barco navegaba en zonas próximas a la bahía de Vizcaya y en el Golfo de México, se efectuaron pruebas de telecomunicaciones por conducto de satélites Marisat emplazados sobre los océanos Índico y Atlántico respectivamente.

El «Magnitogorsk» está equipado con un terminal de barco con una relación G/T de $-4 \text{ dB(K}^{-1}\text{)}$, que se empleó para establecer las comunicaciones y efectuar las pruebas.

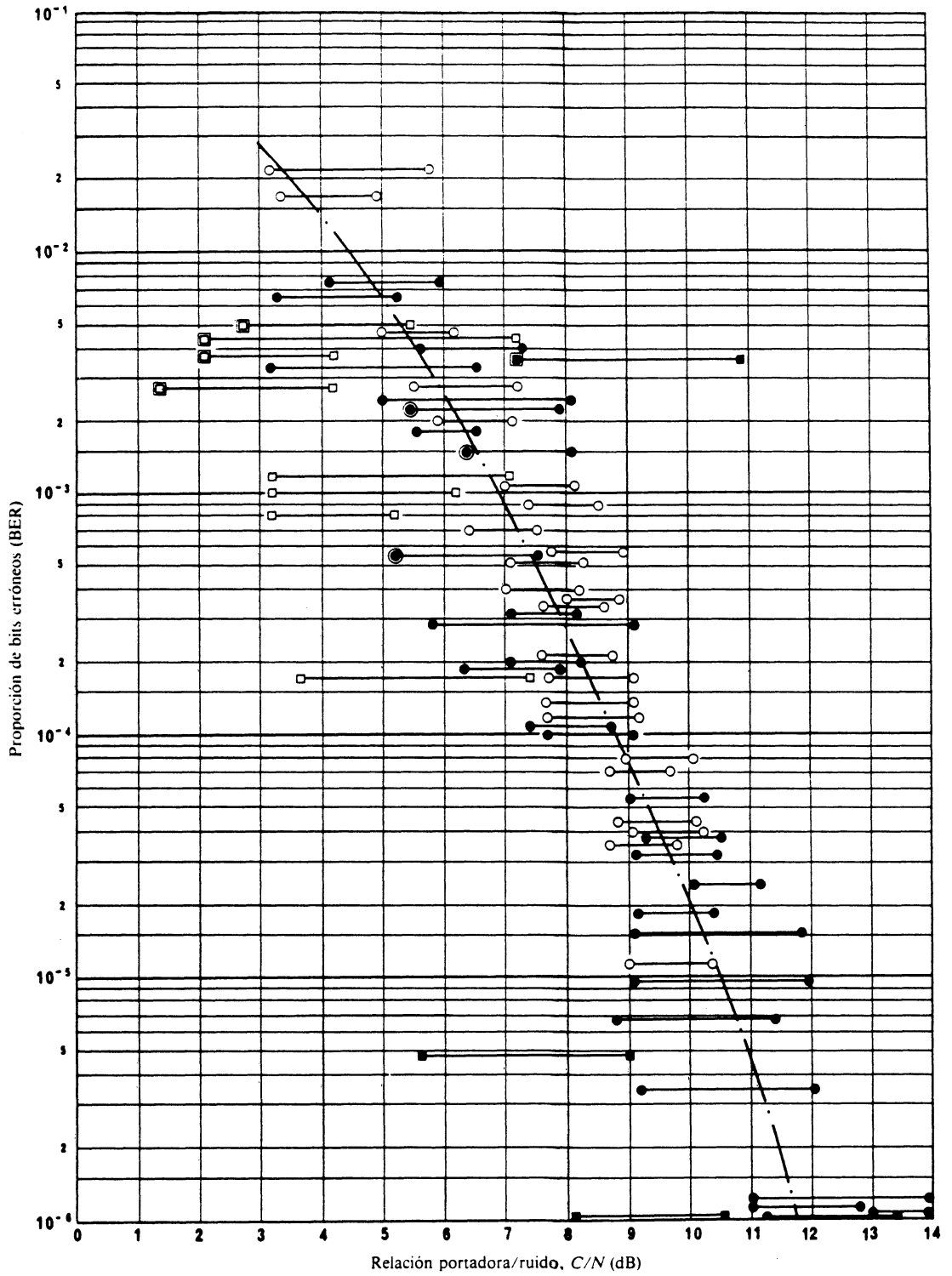


FIGURA 2 - Medición de transmisiones MDPD de datos a 2400 bit/s en el sistema MARISAT con ángulos de elevación entre 5° y 11°

- | Prueba | Ángulo de elevación |
|---------|---------------------------|
| ○ — ○ | 11,2°-10,0° |
| ● — ● | 10,0°-7,2° |
| ■ — ■ | 7,1°-6,6° |
| □ — □ | 6,5°-6,0° |
| — · — · | curva de ajuste |
| ● ■ □ | pérdida de sincronización |

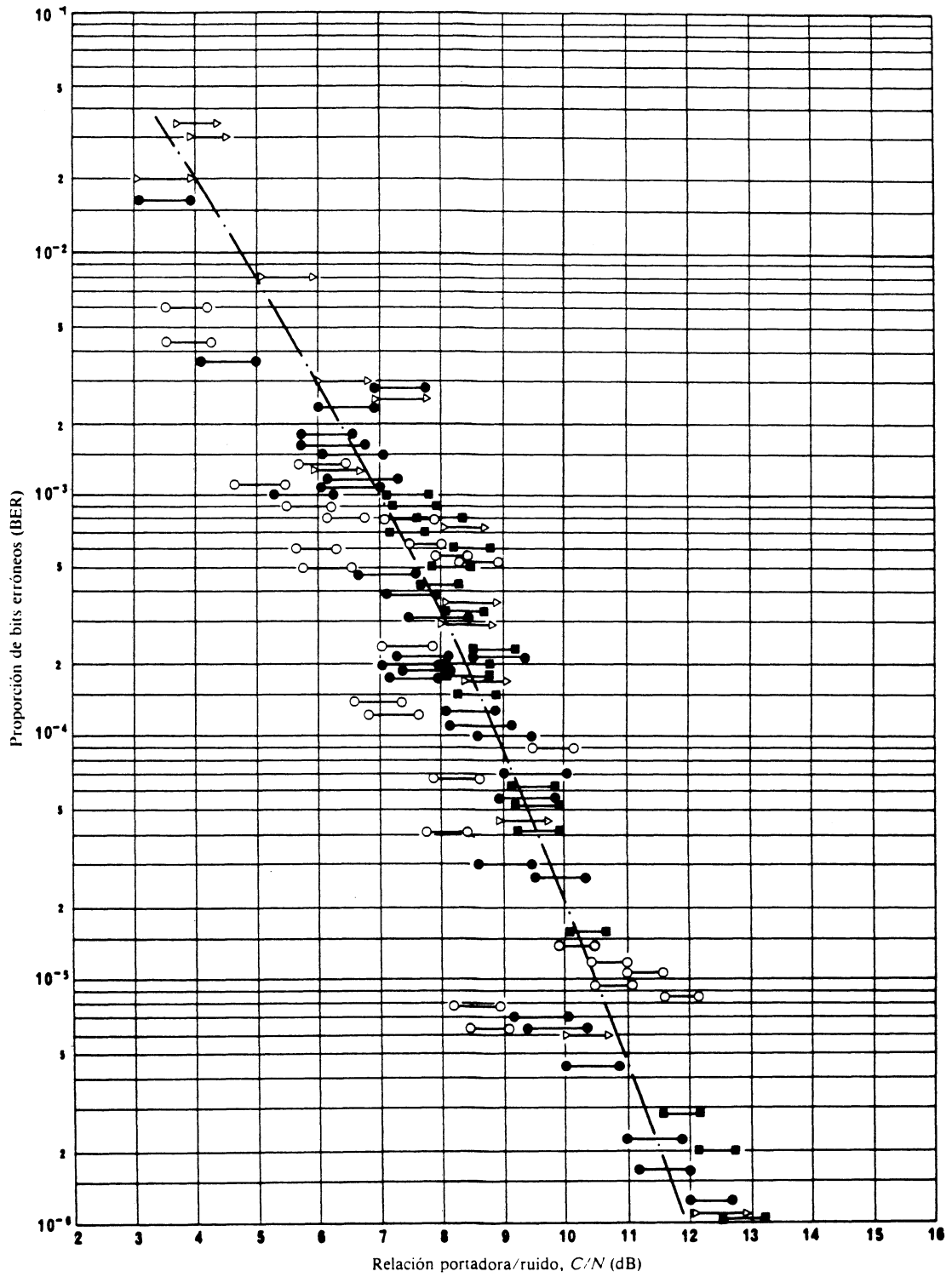


FIGURA 3 – Medición de transmisiones MDPD de datos a 2400 bit/s en el sistema MARISAT con ángulos de elevación entre 11° y 15°

Serie de pruebas	Ángulo de elevación
■	09-32 14°-15°
○	33-38 15°-14°
●	39-49 14°-13°
▷	50-64 13°-11°
- - -	curva de ajuste

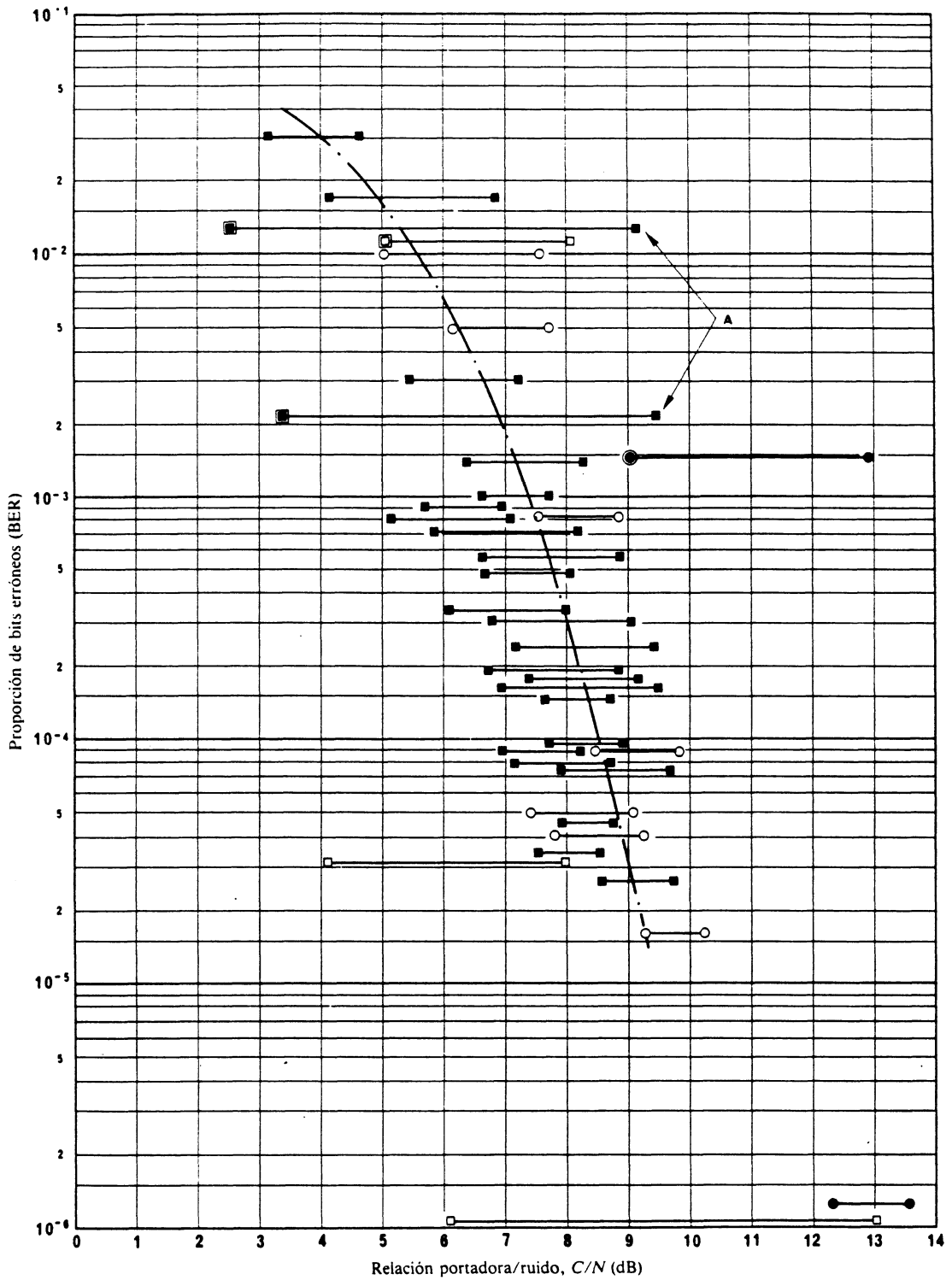


FIGURA 4 - Medición de transmisiones MDF de datos a 1200 bit/s en el sistema MARISAT con ángulos de elevación superiores a 5°

- | Prueba | Ángulo de elevación |
|--------|--|
| ■ | 66 11,2° |
| ○ | 67, 68 11° |
| ● | 77 8,4°-7,6° |
| □ | 81 6,0°-5,0° |
| - - - | curva de ajuste |
| ■ □ ● | pérdida de sincronización |
| A | bloque causado por el mástil del radar en la banda S |

3.2 *Condiciones de las pruebas*

Las mediciones se realizaron en las condiciones normales de funcionamiento del equipo de barco en ausencia de averías del equipo de satélite o costero.

Los datos utilizados a fin de evaluar la calidad de funcionamiento del sistema con bajos ángulos de elevación, se obtuvieron durante periodos en los que el terminal de barco no estaba afectado por el funcionamiento de otros equipos auxiliares radioeléctricos a bordo. Por consiguiente, en los resultados obtenidos no se ha tenido en cuenta el posible efecto de esos equipos auxiliares.

Por lo que se refiere al efecto de las condiciones de propagación, las variaciones sólo se estimaron en un enlace satélite-barco (1,5 GHz). Se supuso que las condiciones de propagación en los enlaces costera-satélite eran estables. El sentido barco-satélite-costera no se estudió durante las pruebas.

Se tuvo en cuenta el efecto de las variaciones en los niveles de carga del satélite (es decir, el número de canales simultáneamente en funcionamiento), sobre los valores de C/N . Se supuso entonces que las variaciones de C/N en la primera frecuencia intermedia se debían a las condiciones de propagación con bajos ángulos de elevación.

Las mediciones se efectuaron principalmente en canales de télex. Se obtuvo también un volumen limitado de datos sobre canales telefónicos. Al evaluar la calidad de funcionamiento de los canales telefónicos con bajos ángulos de elevación, se supuso que los cambios en los niveles de las señales en esos canales eran proporcionales a los cambios correspondientes observados simultáneamente en los canales de télex. La validez de esta hipótesis se confirmó mediante una serie de mediciones efectuadas en los canales telefónicos y de télex con un ángulo de elevación de 3° .

3.3 *Efecto de las condiciones meteorológicas*

Durante las pruebas se estudiaron los efectos de las condiciones meteorológicas sobre la calidad de las comunicaciones por satélite. Según los datos obtenidos, durante lloviznas y tormentas de lluvia se observaron degradaciones de la relación C/N media de alrededor de 1,5 dB y 2 dB respectivamente.

Las condiciones ambientales fueron en general favorables, por lo que el balanceo y el cabeceo del barco no excedieron de 3° - 5° y 2° - 3° , respectivamente. Tales perturbaciones son demasiado pequeñas para evaluar su efecto sobre la calidad de las comunicaciones por satélite con bajos ángulos de elevación.

3.4 *Datos experimentales*

Se procesaron en total alrededor de unas 2500 lecturas. Los ángulos de elevación variaron de 3° a 14° .

Los datos experimentales se dividieron en dos grupos, que se trataron por separado.

El primer grupo comprendió los valores de C/N medidos en canales de télex cuando no había canales telefónicos en funcionamiento.

El segundo grupo comprendió los valores C/N medidos cuando estaban en funcionamiento tanto canales télex como canales telefónicos.

En las figs. 5 y 6 respectivamente, se representan gráficamente los valores experimentales y medidas de la relación C/N de acuerdo con los grupos primero y segundo mencionados más arriba. Debido a los datos limitados sobre canales telefónicos, se supuso que las desviaciones medias cuadráticas de la C/N media de los canales telefónicos correspondían a las de los canales télex a los mismos ángulos de elevación.

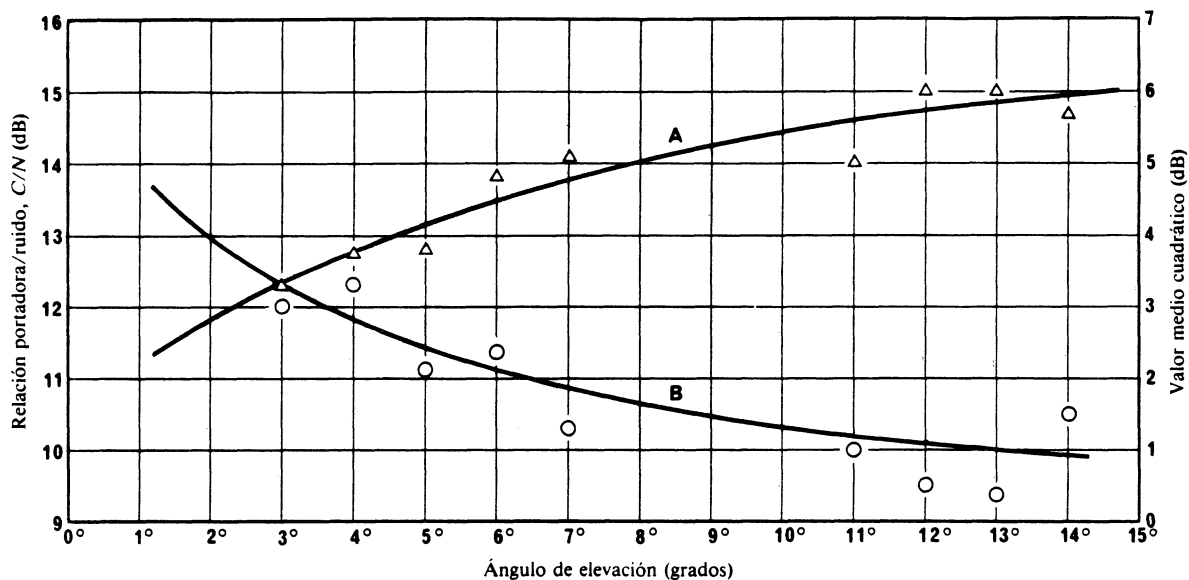


FIGURA 5 - Relación portadora recibida/ruido (C/N) y desviación media cuadrática de la C/N media, en canales de télex con diferentes ángulos de elevación (sin canales telefónicos en funcionamiento)

○, △: datos experimentales
 Curvas A: C/N
 B: desviación media cuadrática

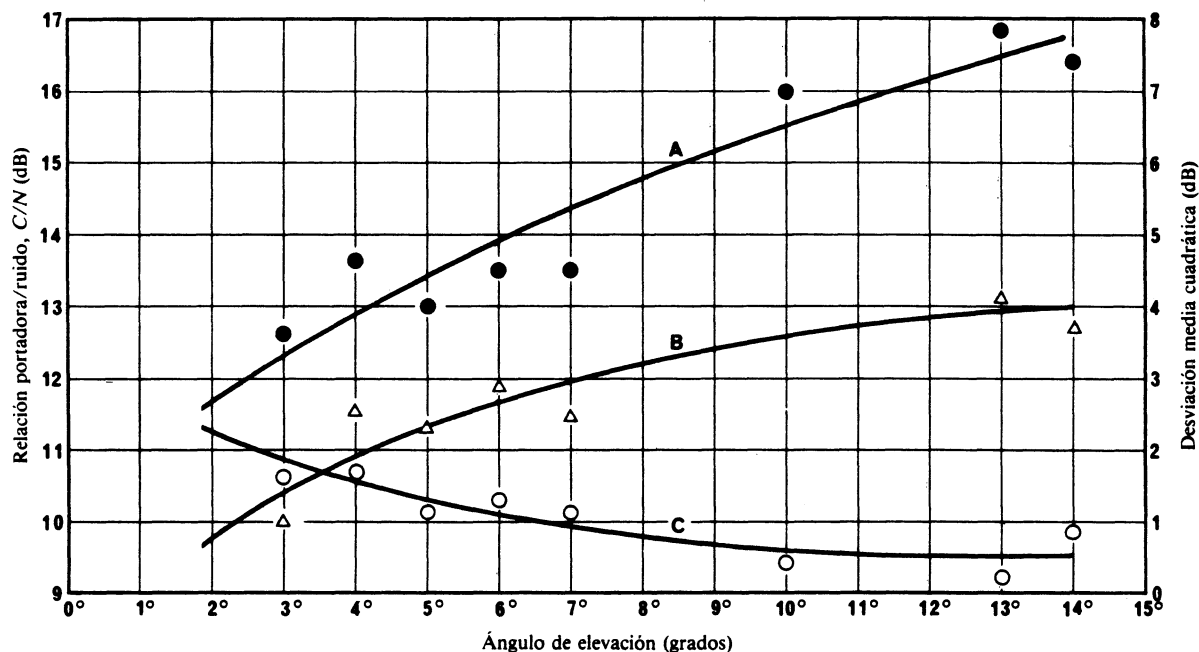


FIGURA 6 - C/N y desviación media cuadrática de la C/N media con diferentes ángulos de elevación, en caso de funcionamiento simultáneo de canales de télex y telefónicos

○, ●, △: datos experimentales
 Curvas A: C/N de canal telefónico
 B: C/N de canal télex
 C: desviación media cuadrática

3.5 *Valores mínimos de los ángulos de elevación para los servicios telefónico y de télex*

A fin de determinar los valores mínimos de los ángulos de elevación, se dieron por sentado determinados valores umbral de C/N para los canales telefónicos y de télex. Se dió por supuesto que el criterio de calidad del canal télex era una tasa de errores en los bits de 10^{-5} durante el 99% del tiempo. Como criterio para los canales telefónicos se adoptó una inteligibilidad de la palabra del 99%.

Se emplearon las curvas de mejor ajuste de las figs. 5 y 6 para determinar las regiones en que se encuentran los valores marginales de C/N (probabilidad del 99%) en canales de télex y telefónicos para distintos niveles de carga del satélite y diferentes ángulos de elevación.

En las figs. 7, 8, 9 pueden verse, respectivamente, las regiones de los valores marginales de C/N para:

- canales de télex en ausencia de carga de canales telefónicos en el satélite;
- canales de télex con canales telefónicos en funcionamiento;
- canales telefónicos.

Están representados en esas figuras los valores umbral de C/N con un margen para la posible degradación debida a las precipitaciones.

3.6 *Resultados experimentales*

Del análisis de las figs. 7 a 9 resulta que es posible alcanzar la calidad necesaria de las comunicaciones en los canales de télex, dadas ciertas condiciones en materia de perturbaciones externas, si el ángulo de elevación es mayor de $4,5^\circ$.

En los canales telefónicos, puede lograrse una inteligibilidad de la palabra del 99% durante, por lo menos, el 99% del tiempo cuando el ángulo de elevación es superior a $12,5^\circ$. Con ángulos de elevación menores, las tormentas de lluvia pueden degradar la calidad de las comunicaciones; por ejemplo, con un ángulo de elevación de 10° , la inteligibilidad será del 98% para palabras aisladas y del 92% para sílabas aisladas; con un ángulo de elevación de 8° la inteligibilidad descenderá al 88%.

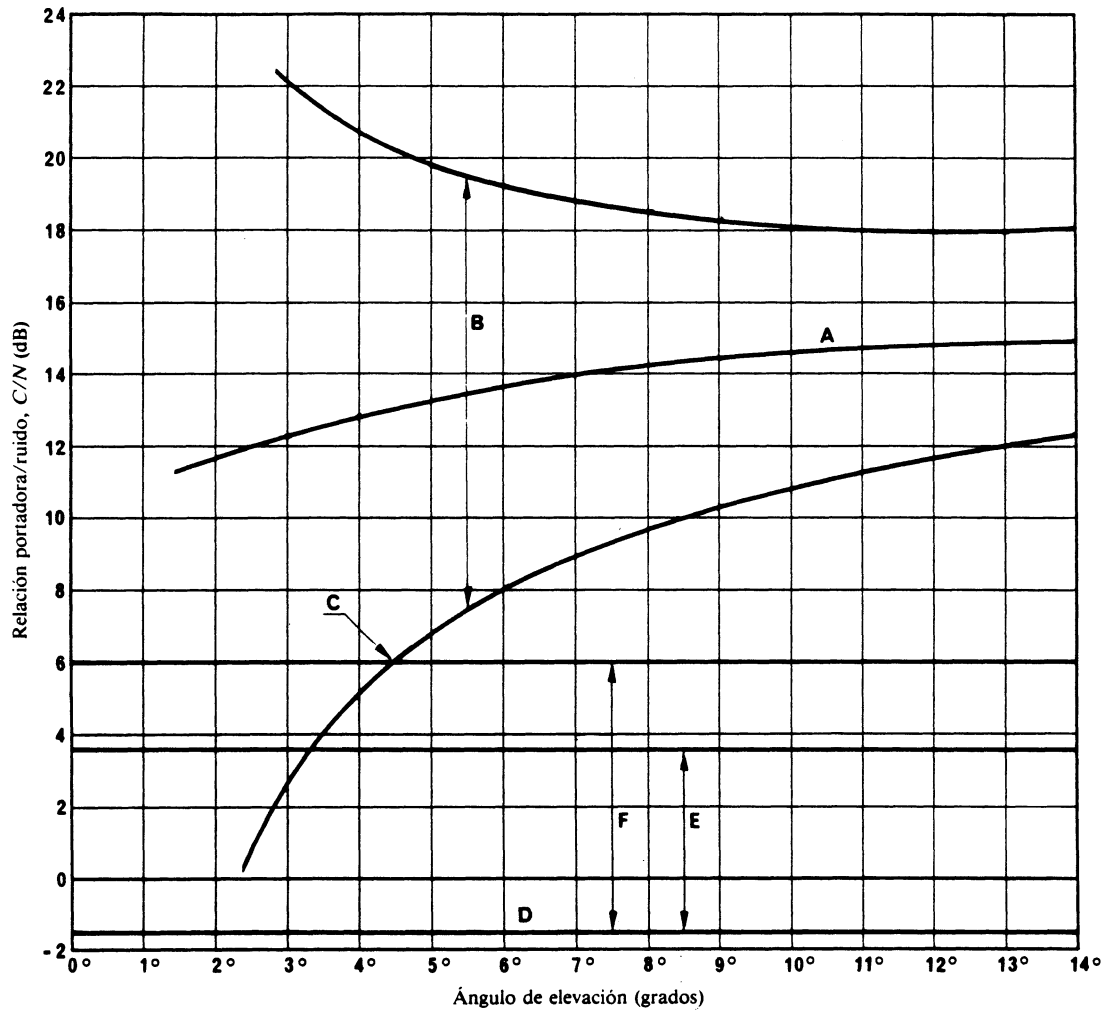


FIGURA 7 - Región de valores marginales de C/N en los canales de télex a distintos ángulos de elevación (sin carga de canales telefónicos en el satélite)

- A: C/N media
- B: región de valores marginales de C/N
- C: valor crítico del ángulo de elevación
- D: C/N umbral para canal de télex (-1,5 dB)
- E: llovizna, degradación máxima 5,25 dB
- F: tormenta de lluvia, degradación máxima 7,5 dB

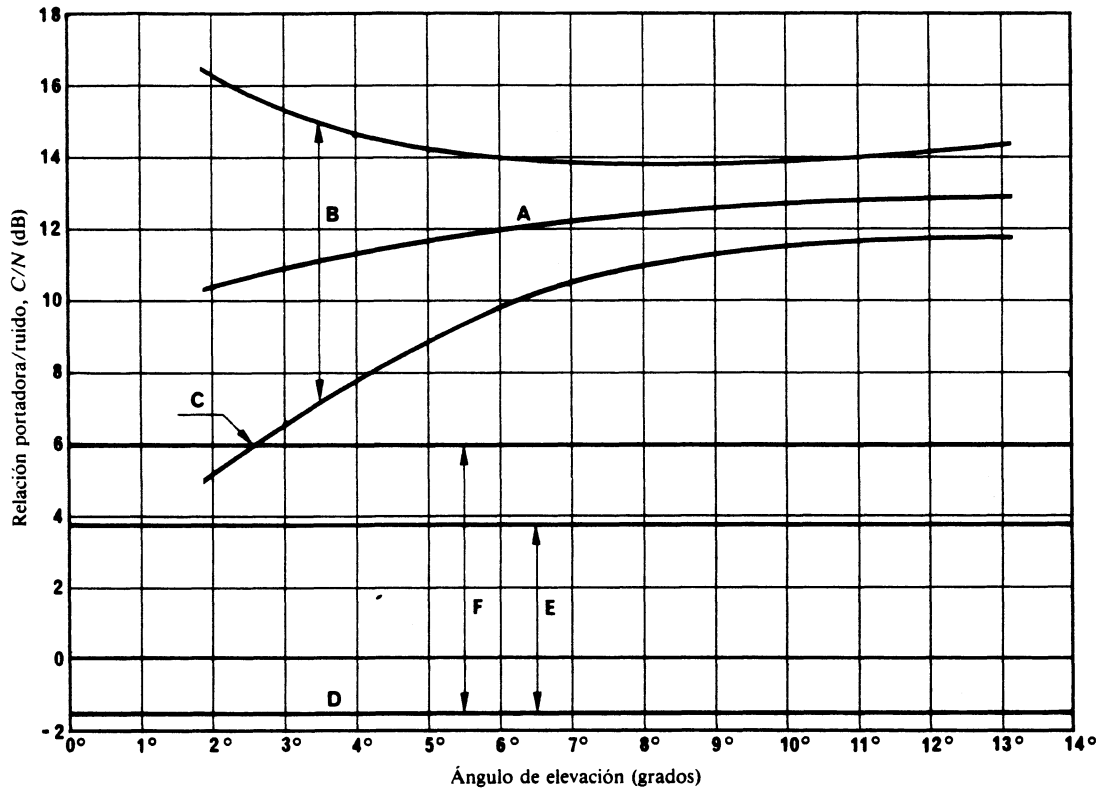


FIGURA 8 - Región de valores marginales de C/N en los canales de télex con distintos ángulos de elevación (con canales telefónicos activos)

- A: C/N media
- B: región de valores marginales de C/N
- C: valor crítico del ángulo de elevación
- D: C/N umbral para canal de télex (-1,5 dB)
- E: llovizna, degradación máxima 5,25 dB
- F: tormenta de lluvia, degradación máxima 7,5 dB

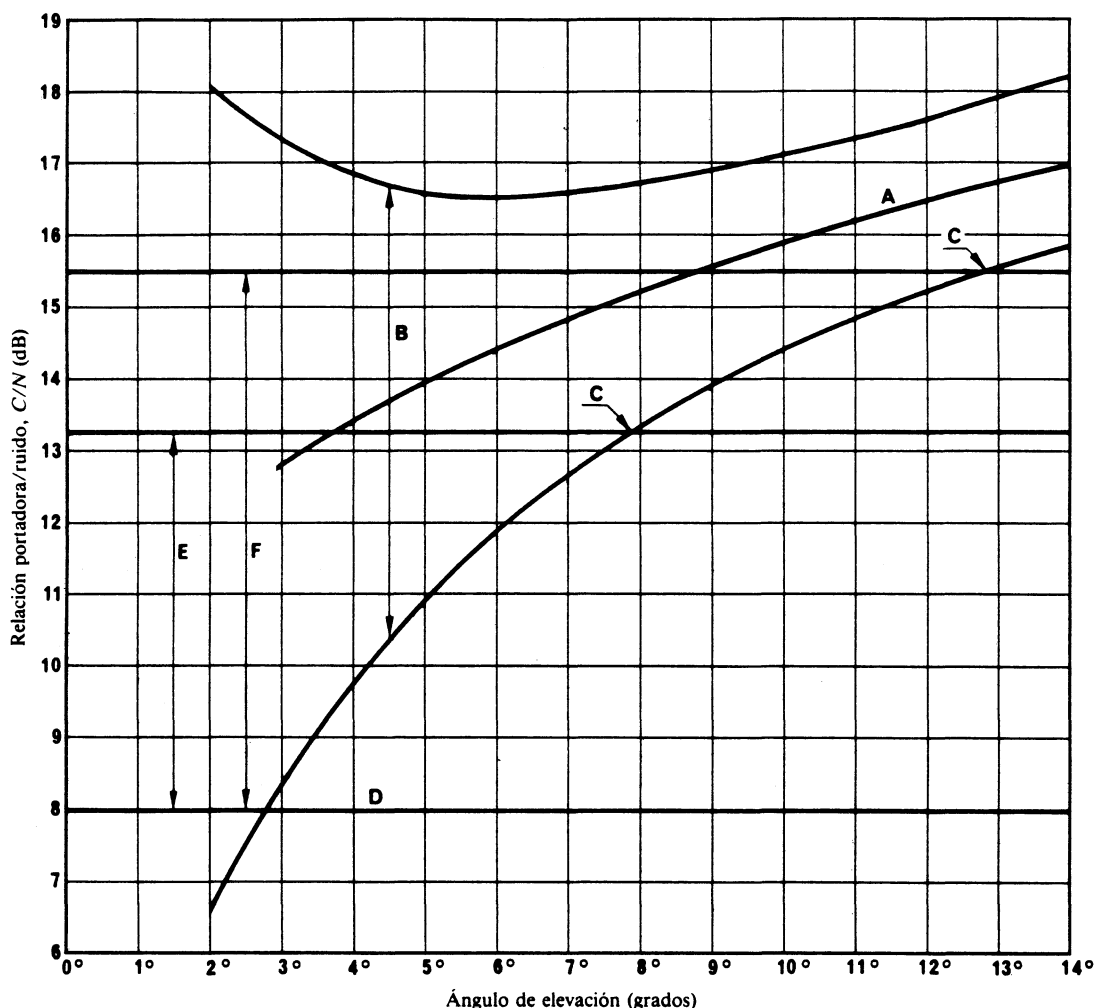


FIGURA 9 - Región de valores marginales de C/N en los canales telefónicos con distintos ángulos de elevación

- A: C/N media
- B: región de valores marginales de C/N
- C: valor crítico del ángulo de elevación
- D: C/N umbral (8 dB)
- E: llovizna, degradación máxima 5,25 dB
- F: tormenta de lluvia, degradación máxima 7,5 dB

3.7 Antecedentes (nuevos ensayos)

La URSS efectuó experimentos a bordo del barco «Michael Kalinin» (122 m de largo y 4980 t.r.b.) durante el periodo comprendido entre el 26 de mayo y el 14 de julio de 1984. El objetivo de las pruebas era la determinación de la calidad de funcionamiento del canal télex a través del satélite Inmarsat, con bajos ángulos de elevación. El barco estuvo navegando por el Mar Báltico, el Mar del Norte, el Golfo de Vizcaya y el Mar Mediterráneo. Durante las pruebas se midieron los niveles de la relación C/N en las zonas de cobertura del satélite Marecs-A del Océano Atlántico y del satélite Intelsat-V del Océano Índico, con ángulos de elevación desde 7° a 46° y desde 4° a 16°, respectivamente.

3.8 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales durante el experimento se resumen de la siguiente manera:

- Tiempo: despejado, soleado, sin precipitaciones
- Altura de las olas: 1-2 m
- Movimientos del barco: balanceo: 1°-2° con un periodo de unos 20 s
cabeceo: 0 en valor medio.

3.9 Características principales del equipo utilizado

Las características principales del equipo utilizado son las siguientes:

3.9.1 Estación terrena de barco de norma A (Volna-S)

- Altura de la antena: 15 m sobre el mar
- Anchura del haz: 10°
- G/T : -4 dB(K⁻¹)

3.9.2 Receptor de pruebas y registrador

- Receptor: Microvoltímetro selectivo SMV-8
- Respuesta del registrador: 0-150 Hz

3.10 Resultados experimentales

Las figs.10 y 11 muestran los resultados del tratamiento estadístico de los datos obtenidos en las regiones del Océano Atlántico y del Océano Índico, respectivamente.

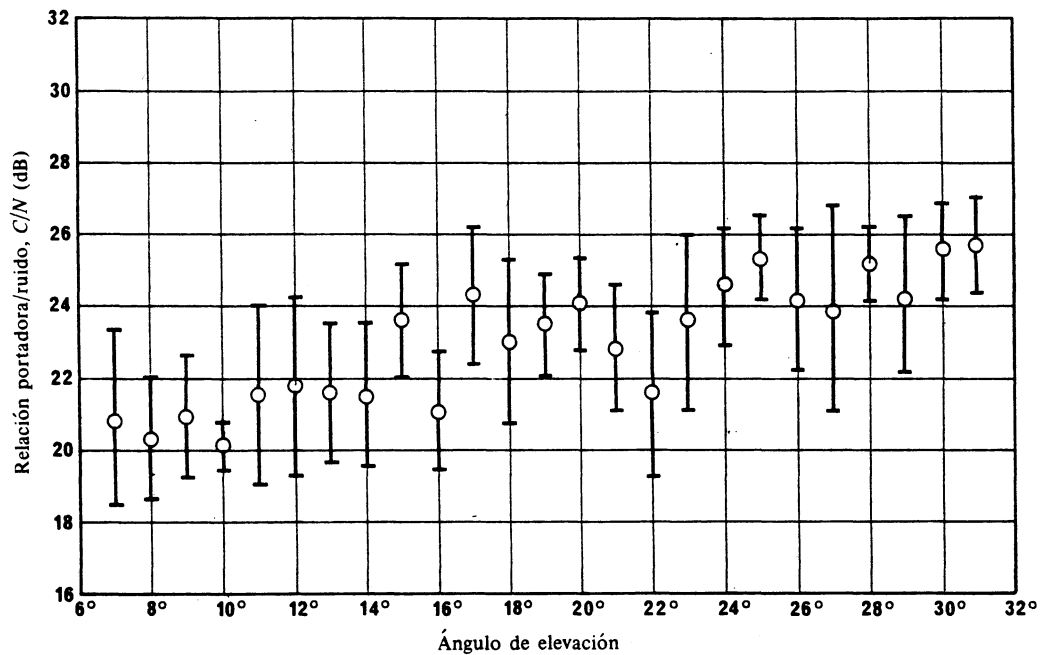


FIGURA 10 - Datos correspondientes al Océano Atlántico

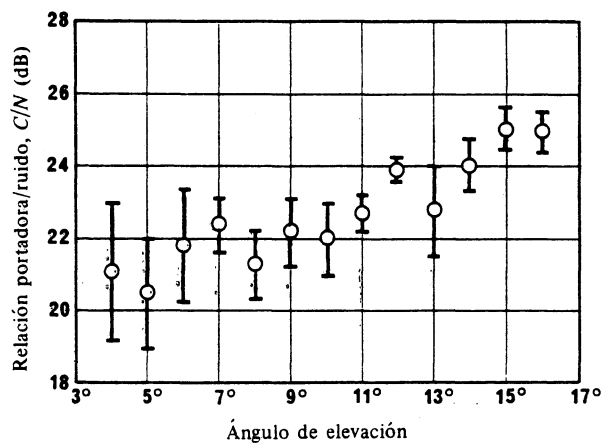


FIGURA 11 - Datos correspondientes al océano Índico

El examen de los resultados indica que los niveles medios de la relación C/N para ángulos de elevación de 5-6° son de 21-22 dB, con variaciones de 4-5 dB alrededor de la media durante el 95% del tiempo. Se extrapolaron (véase la nota) los datos experimentales para determinar los valores de la relación C/N y su variación para ángulos de elevación menores durante el mismo porcentaje de tiempo. Los valores estimados de la relación C/N son 20,5; 20,3; 20 y 19 dB, para ángulos de elevación de 4°, 3°, 2° y 1°, respectivamente, con variaciones de C/N que oscilan entre 3,6 dB para 4° de ángulo de elevación a 5,5 dB para una elevación de 1°. Se efectuaron también cálculos para obtener las variaciones de la relación C/N durante el 99% del tiempo. Las variaciones estimadas C/N son 5,5, 6, 7,5 y 8 dB para ángulos de elevación de 4°, 3°, 2° y 1°, respectivamente. Se estimó la relación C/N mínima que se producía en el caso más desfavorable de degradación debida a la precipitación a que se refieren las figs. 7 y 8. Se determinó que los valores mínimos de C/N eran de 8,0, 7,0, 5,5 y 3,0 dB para ángulos de elevación de 4°, 3°, 2° y 1° respectivamente. El cuadro I muestra los valores de la BER calculados para los mínimos estimados de C/N .

Nota. — La validación del método de extrapolación se someterá a una futura reunión de la Comisión de Estudio 8.

CUADRO I

Ángulo de elevación (grados)	C/N mínima (99% del tiempo) (dB)	BER ⁽¹⁾ (99% del tiempo)	C/N mínima (95% del tiempo) (dB)	BER ⁽¹⁾ (95% del tiempo)
4	8,0	3×10^{-3}	12,5	1×10^{-6}
3	7,0	7×10^{-3}	11,3	2×10^{-5}
2	5,5	3×10^{-2}	10,0	2×10^{-4}
1	3,0	6×10^{-2}	9,0	8×10^{-4}

⁽¹⁾ Los valores de la BER incluyen la degradación anticipada de 2 dB debida al diseño de los equipos y a los factores operacionales.

4. Conclusiones

Se determinaron los menores ángulos de elevación de la antena del barco en dirección del satélite con los que el sistema de comunicaciones por satélite aún puede proporcionar el nivel de calidad de las comunicaciones necesario. Puede alcanzarse una calidad suficiente de las comunicaciones con ángulos de elevación de unos 5°. Sin embargo, debe reconocerse que los valores obtenidos son de carácter preliminar, ya que el análisis fue limitado. Es necesario continuar el estudio de la calidad de funcionamiento de las estaciones terrenas de barco en ángulos de elevación bajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FANG, D. J., TSENG, F. T. y CALVIT, T. O. [enero de 1982] Elevation angle propagation measurement of 1.5 GHz satellite signals in the Gulf of Mexico. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-30, 1.