

RECOMENDACIÓN UIT-R S.614-3

OBJETIVOS DE CARACTERÍSTICAS DE ERROR PARA UN TRAYECTO DIGITAL FICTICIO DE REFERENCIA DEL SERVICIO FIJO POR SATÉLITE QUE FUNCIONA POR DEBAJO DE 15 GHz, CUANDO FORMA PARTE DE UNA CONEXIÓN INTERNACIONAL EN UNA RED DIGITAL DE SERVICIOS INTEGRADOS

(Cuestión UIT-R 52/4)

(1986-1990-1992-1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el UIT-T ha definido el concepto de red digital de servicios integrados (RDSI);
- b) que los satélites en explotación en el servicio fijo por satélite (SFS) tendrán un papel importante que desempeñar en la ampliación del concepto de RDSI a conexiones internacionales;
- c) que unas características de error satisfactorias constituyen un rasgo esencial de cualquier sistema de transmisión digital;
- d) que el UIT-T en su Recomendación UIT-T G.821 especifica las características de error a 64 kbit/s de una conexión digital internacional que forme parte de una RDSI;
- e) que los costes de instalación y mantenimiento de sistemas de comunicaciones digitales por satélite dependen de manera decisiva de las características globales de error;
- f) que al definir criterios para las características de error es necesario tener en cuenta todos los mecanismos previsibles que produzcan errores, especialmente las condiciones de propagación variables con el tiempo y las interferencias,

recomienda

1. que la proporción de bits erróneos (BER – «bit error ratio») (véase la nota 2) a la salida (es decir, en uno de los extremos de una conexión bidireccional) de un trayecto digital ficticio de referencia (HRDP) de satélite que funcione por debajo de 15 GHz y forme parte de una conexión a 64 kbit/s de la RDSI, no exceda de los valores siguientes durante el tiempo de disponibilidad:

- 1.1** 1×10^{-7} durante más del 10% de cualquier mes,
- 1.2** 1×10^{-6} durante más del 2% de cualquier mes,
- 1.3** 1×10^{-3} durante más del 0,03% de cualquier mes (véase la nota 5);

2. que las siguientes notas formen parte de la presente Recomendación:

Nota 1 – El § 1 se estableció utilizando el método descrito en el anexo 1. Se basa en los objetivos de calidad respecto a errores exigidos para el HRDP del servicio fijo por satélite (SFS) que se indican en la Recomendación UIT-T G.821 para todas las condiciones previstas de explotación, y resulta suficiente para satisfacer dichos objetivos. Las atribuciones del UIT-T para un HRDP del SFS que se consideran aplicables al tiempo de disponibilidad sobre un periodo del orden de un mes cualquiera, se pueden anunciar así:

- menos del 2% de los intervalos de 1 min tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-6} ,
- menos del 0,03% de los intervalos de 1 s tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-3} ,
- menos del 1,6% de los intervalos de 1 s tendrán errores.

Nota 2 – Las proporciones de bits erróneos del § 1 se miden durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo a fin de conseguir una buena estimación de la probabilidad de bits erróneos (véase el anexo 1).

Nota 3 – Las proporciones de bits erróneos especificadas en esta Recomendación están basadas en la hipótesis de que los segundos con muchos errores pueden producirse mediante dos mecanismos distintos: los errores que se producen de forma aleatoria y los que se producen en ráfagas. Durante la mayor parte del tiempo, los errores son aleatorios y están limitados por los § 1.1 y 1.2. Se excluyen los segundos con muchos errores de las mediciones de errores aleatorios realizadas a efectos de verificación en los § 1.1 y 1.2, pero se incluyen en el § 1.3 (véase el anexo 1).

Nota 4 – Las proporciones de bits erróneos reproducidas en el § 1 proporcionan un margen para ciertos errores de ráfaga que podrían surgir de las fuentes identificadas en el anexo 1.

Nota 5 – El valor de 0,03% de cualquier mes está referido a la BER medida durante el tiempo de disponibilidad. Este objetivo se podría satisfacer, por ejemplo, diseñando el sistema de satélite para un objetivo de indisponibilidad del 0,2% del mes más desfavorable (tiempo total). Aplicando un factor de disponibilidad del 0% (relación entre tiempo de disponibilidad y tiempo total con una BER peor que 1×10^{-3}), esto correspondería al 0,02% del tiempo de disponibilidad en cualquier mes. Además, es necesario incluir un margen para acomodar las contribuciones a los segundos con muchos errores cuando la BER es mejor que 1×10^{-3} . Si en nuestro ejemplo se toma un margen del 0,01% del mes más desfavorable, el total del objetivo de calidad de funcionamiento sería el 0,03% del tiempo de disponibilidad del mes más desfavorable (véase el anexo 1).

Nota 6 – El trayecto digital ficticio de referencia al que se refiere esta Recomendación se especifica en la Recomendación UIT-R S.521.

Nota 7 – Puede ser necesario elaborar disposiciones especiales con respecto a la calidad de los enlaces entre satélites. El alcance de tales disposiciones requiere estudios.

Nota 8 – Esta Recomendación se aplica solamente cuando el sistema se considera disponible de conformidad con la Recomendación UIT-R S.579 e incluye periodos con una alta proporción de bits erróneos, superior a 1×10^{-3} y que persiste por periodos inferiores a 10 segundos consecutivos. Las interrupciones breves (menos de 10 s) se considerarán equivalentes en el caso en que la proporción de bits erróneos sea superior a 1×10^{-3} .

Nota 9 – Los objetivos de características de error dados en la presente Recomendación están destinados a satisfacer la calidad entre extremos especificada para una conexión RDSI con conmutación de circuitos a 64 kbit/s, de conformidad con lo dispuesto en la Recomendación UIT-T G.821. En la Recomendación UIT-R S.522 se dan los objetivos de calidad de funcionamiento para sistemas por satélite que utilizan telefonía codificada MIC en una conexión que no pertenezca a una RDSI. La Recomendación UIT-R S.614 puede utilizarse para el diseño de sistemas por satélite que transporten otras formas de información digital, tales como datos en banda vocal (por ejemplo, facsímil) o señales vocales codificadas a baja velocidad binaria (por debajo de 64 kbit/s), hasta que se realicen estudios más específicos que permitan mejorar los objetivos de calidad de funcionamiento.

Nota 10 – Los valores de las proporciones de bits erróneos indicadas en el § 1 no son los únicos que permiten cumplir los objetivos de calidad de funcionamiento expuestos en la Recomendación UIT-T G.821. El diseñador puede utilizar otros valores siempre que satisfagan la Recomendación UIT-T G.821. En el anexo 1 se dan ejemplos de estos valores alternativos.

Nota 11 – Es deseable que se planifiquen los sistemas basándose en datos de propagación que cubran un periodo de tiempo de por lo menos cuatro años. La calidad de funcionamiento recomendada que ha de cumplirse en «cualquier mes» debe basarse en los datos de propagación que corresponden al valor mediano del «mes más desfavorable del año» tomado de las estadísticas mensuales de todos los años para los que se dispone de datos fiables.

Nota 12 – La característica de error indicada en el § 1 se estableció basándose en la utilización del HRDP en la sección de «grado alto» de la conexión ficticia de referencia (véase la Recomendación UIT-T G.821). Son posibles otras aplicaciones del HRDP cuando está incluido en la conexión ficticia de referencia, y los objetivos en materia de características de error pueden ajustarse de la manera consiguiente.

Nota 13 – Para cumplir los valores indicados en el § 1 en los sistemas que funcionan en frecuencias superiores a 10 GHz puede ser conveniente aplicar técnicas y estrategias para contrarrestar el desvanecimiento. En la Recomendación UIT-R S.1061 se dan orientaciones básicas al respecto.

Nota 14 – En el anexo 1 se describe un método para medir la BER en función del porcentaje de tiempo.

ANEXO 1

Características de un trayecto digital ficticio de referencia del servicio fijo por satélite que forma parte de una red digital de servicios integrados

1. Introducción

En este anexo se examinan los objetivos de calidad de funcionamiento que tendrá que cumplir un trayecto digital ficticio de referencia (HRDP) del SFS cuando forma parte de una conexión ficticia de referencia (HRX) en una RDSI. En la Recomendación UIT-T G.821 se define la HRX de la RDSI para una conexión con conmutación de circuitos a 64 kbit/s (Libro Azul del CCITT, 1988, Fascículo III.3) que utiliza tres categorías de circuitos para definir la calidad de funcionamiento: calidad local, calidad media y calidad elevada. Los circuitos internacionales por satélite se consideran parte de la sección que tiene un grado de calidad elevada de funcionamiento.

La asignación proporcional de los objetivos globales de la calidad de funcionamiento de la HRX de la RDSI para el caso del SFS y la repercusión de esta asignación sobre el diseño de los sistemas del SFS se examinan a continuación.

2. Canales de satélite a 64 kbit/s que forman parte de la HRX en una RDSI

2.1 Requisitos de calidad de funcionamiento del HRDP del SFS

2.1.1 Objetivos de características de error en sistemas de satélite

La calidad de funcionamiento de sistemas de satélite se da generalmente en forma de probabilidad de bits erróneos, mientras el método de especificación de calidad empleado en la Recomendación UIT-T G.821 consiste en identificar intervalos de tiempo que han de tener una proporción de errores especificada para ciertos porcentajes. Estos porcentajes se toman durante un periodo más largo, del orden de un mes aproximadamente. En esta parte se presenta el método utilizado para convertir la especificación del UIT-T a la forma de objetivos de calidad de funcionamiento utilizados en los sistemas de satélite y se indican los requisitos de calidad de un HRDP por satélite resultantes de la aplicación de este método a los valores citados en la Recomendación UIT-T G.821.

En este anexo se ha hecho una distinción cuidadosa entre la probabilidad de bits erróneos (PBE) y la proporción de bits erróneos (BER). La PBE, que se utiliza ampliamente en los puntos siguientes, es una magnitud abstracta que expresa la calidad de funcionamiento teórica de los equipos de comunicación de datos. La BER es una magnitud que se puede medir fácilmente (es decir, los bits erróneos sobre los bits transmitidos); si se efectúa un número suficiente de mediciones, cada una de ellas con una duración suficiente, se puede calcular la probabilidad de bits erróneos con la precisión deseada.

En este anexo se supone que (a 64 kbit/s) la calidad de funcionamiento del enlace del sistema por satélite está limitada por mecanismos de naturaleza esencialmente aleatoria, y se puede analizar utilizando una aproximación binomial o la distribución de Poisson para calcular la probabilidad de que se produzca un número dado de errores en un intervalo de tiempo dado y con una probabilidad de bits erróneos determinada. En la práctica, al proyectar el sistema se tendrán también en cuenta las ráfagas de errores que no recoge este planteamiento (en el § 2.2 se describen algunos mecanismos que pueden producir esas ráfagas), y se preverán los márgenes suficientes para compensar esos efectos.

Los errores en ráfagas debidos a las técnicas de corrección de errores se examinan en el § 5 de este anexo.

2.1.2 Requisitos de la Recomendación UIT-T G.821

En el cuadro 1 se resumen los objetivos de calidad de extremo a extremo dados en la Recomendación UIT-T G.821 y los objetivos del HRDP por satélite. Para cada clasificación de calidad se da el requisito global de extremo a extremo, junto con el requisito de un HRDP por satélite.

2.1.3 Modelos de probabilidad de bits erróneos requeridos para ajustarse a la Recomendación UIT-T G.821

En el § 3 se describe el método para analizar, en función de los parámetros indicados en el cuadro 1 la probabilidad de bits erróneos dada con respecto a la distribución en porcentaje de tiempo. Mediante este procedimiento se han podido obtener varias distribuciones, o modelos, basados en las características generales de sistemas de satélites, que satisfacen o exceden los objetivos indicados en la Recomendación UIT-T G.821.

Aquí se resume uno de los modelos descritos en el § 3. Este modelo concilia los requisitos de los sistemas de propagación limitada, que habitualmente funcionan por encima de 10 GHz, y los de los sistemas con interferencia limitada, que habitualmente funcionan por debajo de 10 GHz, y puede corresponder a los sistemas de satélite de alta capacidad y tecnología moderna.

Los requisitos en cuanto a la probabilidad de bits erróneos de este modelo, según se indican en los puntos de corte de la curva contenida en la fig. 3 son los siguientes:

- $PBE = 1 \times 10^{-7}$ durante el 90% del mes más desfavorable,
- $PBE = 1 \times 10^{-6}$ durante el 98% del mes más desfavorable.

La calidad de funcionamiento de este modelo se resume en el cuadro 2, en función de los minutos degradados, los segundos con error y los segundos con muchos errores. La calidad de funcionamiento se enumera en función del tiempo total y del tiempo disponible, para mostrar la relación existente entre los cálculos de diseño del sistema y los objetivos de la Recomendación UIT-T G.821.

CUADRO 1

Objetivos globales de calidad de funcionamiento del HRDP de extremo a extremo y por satélite en el caso de conexiones internacionales de la RDSI

Clasificación de la característica	Objetivo global de extremo a extremo (Nota 4)	Objetivos del HRDP por satélite (Nota 4)
(a) Minutos degradados (Notas 1, 2)	Menos del 10% de los intervalos de 1 min tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-6} (Nota 3)	Menos del 2% de los intervalos de 1 min tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-3} (Nota 4)
(b) Segundos con muchos errores (Nota 1)	Menos del 0,2% de los intervalos de 1 s tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-3}	Menos del 0,03% de los intervalos de 1 s tendrán una proporción de bits erróneos peor que 1×10^{-3}
(c) Segundos con errores (Nota 1)	Menos del 8% de los intervalos de 1 s tendrán por lo menos un error (equivalente a 92% de segundos sin errores)	Menos de 1,6% de los intervalos de 1 s tendrán por lo menos un error (equivalente a 98,4% de segundos sin errores)

Nota 1 – Se utilizan los términos «minutos degradados», «segundos con muchos errores» y «segundos con errores» a título de «identificador» práctico y conciso de este objetivo de calidad. El empleo de ellos no prejuzga en uno u otro sentido la aceptabilidad de tal nivel de calidad.

Nota 2 – Los intervalos de 1 min mencionados anteriormente se deducen restando el tiempo indisponible y los segundos con muchos errores del tiempo total y agrupando entonces consecutivamente los segundos restantes en bloques de 60.

Nota 3 – Por razones prácticas, a 64 kbit/s, un minuto que contenga 4 errores (lo que equivale a una proporción de errores de $1,04 \times 10^{-6}$) no se considera degradado. Pero esto no implica una mitigación del objetivo de proporción de errores de 1×10^{-6} .

Nota 4 – Los objetivos globales del HRDP de extremo a extremo y por satélite se expresan en términos de tiempo disponible (véase el § 2.1.5)

En este modelo se utilizó un punto crítico a corto plazo (véase la nota 1) (o sea $PBE = 1 \times 10^{-3}$) de 0,2% del mes (tiempo total), con un factor de disponibilidad debida a la propagación de 10% (véanse los § 2.1.5 y 3).

Nota 1 – El término «a corto plazo» designa el periodo de tiempo en que la parte de satélite de la conexión experimenta gran degradación de la calidad (característica de error $> 1 \times 10^{-3}$). El término «a largo plazo» designa el periodo de tiempo en que la parte de satélite de la conexión no experimenta degradación de calidad (característica de error $\leq 1,0 \times 10^{-6}$).

CUADRO 2

Objetivo	Calidad	
	Tiempo total (%)	Tiempo disponible (%)
Minutos degradados	2,05	1,87
Segundos con error	1,74	1,56
Segundos con muchos errores	0,204	0,024

2.1.4 Consideraciones sobre la transmisión por satélite

La calidad de funcionamiento de un enlace de transmisión digital por satélite depende de varios factores. Uno muy importante es el efecto de las perturbaciones de la transmisión debidas a la propagación. Utilizando métodos elaborados por la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones (antigua CE 5), pueden predecirse los efectos de las perturbaciones de la calidad de transmisión digital debida a la propagación.

El § 4 recoge los resultados de cálculos que comparan la calidad de tres sistemas digitales internacionales por satélite distintos. Esos cálculos se incluyen para dar una idea de los efectos de la propagación sobre la PBE a corto plazo en función del tiempo. En la fig. 4 se indican los límites de calidad de funcionamiento de los diversos modelos.

Conviene señalar que la calidad de funcionamiento de un canal de transmisión digital por satélite puede concebirse de manera que satisfaga virtualmente todas las especificaciones de calidad. Sin embargo, el empleo de la corrección de errores sin canal de retorno, el control de potencia y la diversidad de emplazamientos puede mejorar notablemente la calidad del sistema, pero tiene los inconvenientes de la disminución de capacidad y/o el mayor costo. En consecuencia, el empleo de estas técnicas exige una justificación adecuada.

La Comisión de Estudio 4 de Radiocomunicaciones estima que es preciso realizar nuevos estudios sobre los efectos que tienen las perturbaciones debidas a la propagación en la calidad de los canales digitales por satélite, y acogerá con satisfacción toda nueva información sobre este tema.

2.1.5 Disponibilidad y calidad de funcionamiento en términos de segundos con muchos errores

En el cálculo de los modelos de calidad que se describen en el § 4, y cuyo fin es satisfacer las disposiciones de la Recomendación UIT-T G.821, fue necesario considerar el porcentaje de tiempo durante el cual se considera disponible el enlace. La definición generalmente aceptada de tiempo de indisponibilidad es la siguiente:

El tiempo de indisponibilidad comienza cuando la BER en cada segundo es peor que 1×10^{-3} durante un periodo de 10 segundos consecutivos. Se considera que estos 10 s son tiempo de indisponibilidad. El periodo de indisponibilidad termina cuando la BER en cada segundo es mejor que 1×10^{-3} durante un periodo de 10 segundos consecutivos. Se considera que estos 10 s son tiempo de disponibilidad y contribuyen al objetivo de calidad en términos de segundos con muchos errores. Una BER excesiva es sólo uno de los factores que contribuyen al tiempo de indisponibilidad total. La definición correspondiente a la disponibilidad puede verse en la Recomendación UIT-T G.106.

La disponibilidad debe tomarse en cuenta en el diseño de los enlaces de transmisión por satélite que experimentan periodos ocasionales de atenuación en el curso de precipitaciones que exceden de los márgenes del sistema. Ello es especialmente cierto en las frecuencias superiores a 10 GHz y los estudios de la propagación del UIT-R ilustran este hecho.

En la Recomendación UIT-R S.579 figura un resumen de mediciones de propagación que muestra los casos de atenuación de propagación que no dan como resultado un tiempo de disponibilidad. La conclusión a la que se llega muestra que con referencia al tiempo total, cuando aparecen niveles de atenuación que pueden causar una BER peor que 1×10^{-3} , tan sólo un 10% del tiempo está compuesto de periodos que se definirían como «tiempo de disponibilidad» según los criterios del UIT-T. El resto sería tiempo de indisponibilidad. Esto entraña un «factor de disponibilidad de propagación» del 10%. Por ejemplo, si durante el 0,2% del tiempo total, la PBE es 1×10^{-3} o peor, entonces debido al comportamiento de la propagación, sólo el 10% de este tiempo, o sea, 0,02%, se considerará tiempo de disponibilidad. Esto conduce a un criterio de calidad «de corta duración» de una PBE de 1×10^{-3} para el 0,2% del tiempo total.

En la Recomendación UIT-R S.579 figuran los objetivos de indisponibilidad de un HRDP por satélite debidos al equipo y a la propagación. Se asigna un valor provisional del 0,2%, de un año al objetivo de indisponibilidad debida al equipo, y se propone un valor de 0,2% del mes más desfavorable para la indisponibilidad debida a la propagación para un HRDP.

La Recomendación UIT-R S.579 ofrece información sobre las características de disponibilidad que indican que para «factores de disponibilidad» bajos, y diversos emplazamientos y zonas hidrometeorológicas, el porcentaje de tiempo de indisponibilidad puede ser superior a 0,2% del mes, para niveles significativos de atenuación. En cualquier caso, el margen total de tiempo de indisponibilidad debida a la propagación no debe ser inferior al objetivo del modelo a corto plazo necesario para satisfacer la Recomendación UIT-T G.821, o sea, 0,2% del mes. En consecuencia, se recomienda la adopción de ese valor en la Recomendación UIT-R S.579 para las frecuencias inferiores a 15 GHz.

Es necesario continuar los estudios sobre la propagación para confirmar un valor porcentual que sea representativo para diferentes bandas de frecuencias, ángulos de elevación y zonas hidrometeorológicas.

Por último, en lo que se refiere a la disponibilidad de un sistema de transmisión (empleando, por ejemplo, técnicas AMDT), cabe señalar que la disponibilidad del sistema puede ser diferente de la disponibilidad debida a la propagación, debido a la pérdida de sincronismo que puede producirse cuando el nivel de la portadora cae por debajo del umbral de sincronización del sistema de transmisión (típicamente 1×10^{-2}) durante varios segundos. Dado que, en general, su recuperación requiere varios periodos de propagación de ida y retorno en el sistema AMDT, la sincronización no puede seguir siempre el restablecimiento momentáneo del nivel de la portadora. Por ello, puede haber

periodos en que la portadora se eleve a un nivel que corresponda a una BER mejor que 1×10^{-3} , pero debido al retardo de sincronización, el circuito puede tener una BER medida peor que 1×10^{-3} . Estos periodos pueden contribuir al tiempo de indisponibilidad, y no al tiempo de disponibilidad.

En algunos sistemas AMDT operativos los terminales hacen mediciones de la BER sobre la única palabra de cada ráfaga de tráfico recibida en periodos sucesivos inferiores a 10 s. Este periodo tiene una duración de 4 s (128 multitramas) en el caso del sistema AMDT de EUTELSAT. Cuando se rebasa un umbral de BER de 10^{-3} durante un periodo de medición, se intercambian un conjunto de alarmas de mantenimiento de BER elevada entre los terminales AMDT transmisor y receptor. Esto origina el envío de secuencias de señalización particulares (los bits «a» y «b» puestos a 1 para todos los circuitos interesados o «señal de indicación de alarma» (SIA)) hacia el «centro de conmutación internacional» (CCI) desde cada uno de los dos terminales. Estas secuencias pueden interpretarse como mensajes de liberación de llamada y pueden motivar la interrupción de las llamadas en cuestión. Es necesario continuar los estudios para determinar el efecto sobre la disponibilidad de la red como resultado de alarmas con una BER elevada.

2.2 *Otros mecanismos que causan errores*

Aunque las principales contribuciones a los errores en los sistemas digitales de satélite se deberán a los efectos de la propagación y la interferencia, existen otros mecanismos de error. Se facilita aquí cierta información sobre la frecuencia y la duración de tales eventos de error, con el objetivo concreto de señalarlos al proyectista de sistemas de satélite. De hecho, en el curso del diseño de un enlace digital puede atribuirse a estos mecanismos un porcentaje de los objetivos globales de calidad. Sin embargo, se supone que estos eventos de error no harán que el enlace de satélite sea considerado indisponible, esto es los que tengan una duración de 10 s o menos. En la Recomendación UIT-R S.579 se proporciona información adicional sobre los mecanismos que causan indisponibilidad.

Se han determinado los siguientes mecanismos que pueden producir ráfagas de errores:

- conmutación del trayecto de señalización en el equipo FI y RF de una estación terrena,
- conmutación del trayecto de señalización en el equipo de banda de base de una estación terrena,
- estados transitorios de la alimentación de energía en las estaciones terrenas,
- conmutación del trayecto de señalización en el satélite.

Las estimaciones de la frecuencia y la duración de las ráfagas de errores ocasionadas por estos mecanismos, se resumen a continuación en el cuadro 3.

CUADRO 3

Ejemplos típicos de mecanismos que producen ráfagas de errores

Efecto	Frecuencia	Duración
Conmutación FI/RF	1,0/mes	150 ms
Conmutación espuria	2,0/mes	150 ms
Conmutación de banda base	1,2/mes	2-128 bits

El cuadro 3 permite formular las siguientes deducciones:

- Si se considera el efecto sobre una conexión a 64 kbit/s durante un periodo de integración de 1 min, se puede concluir que todos los efectos del cuadro 3 hacen que se divida el objetivo de 1×10^{-6} por minuto, lo que significa que debe asignarse a tales efectos una parte del tiempo durante el cual puede excederse el valor de 10^{-6} .
- El número total de eventos en el cuadro 3 es de 4,2 por mes, o sea que, por término medio, se degradará el 0,0097% de los periodos de 1 min.
- Cada evento del cuadro 3 dura menos de 1 s, o sea que, por término medio, sólo 4,2 s/mes, es decir, el 0,0002%, contendrá errores a causa de estos efectos.

Los 4,2 sucesos al mes representan solamente el 0,01% en minutos degradados y el 0,00016% en segundos con muchos errores, mientras que la Recomendación UIT-R S.614 prevé un margen de seguridad del 0,13% y el 0,006% respectivamente. Por consiguiente, no es necesario modificar la presente Recomendación en función de la posible existencia de errores de ráfaga en un determinado sistema de satélite. Si estudios ulteriores revelan la existencia de otros mecanismos que producen errores de ráfaga quizá sea necesario modificar los requisitos de BER de la presente Recomendación.

2.2.1 *Conmutación en frecuencia intermedia y en radiofrecuencia*

Los errores se producen como resultado de la conmutación en FI y RF para utilizar el equipo de reserva cuando se han producido fallos o cuando así lo requieren las rutinas de mantenimiento.

Para determinar la frecuencia de los sucesos de conmutación, es preciso considerar el tiempo medio entre fallos (MTBF – «mean time between failures») de los distintos componentes. A partir de este dato puede deducirse el número de conmutaciones por mes. En el cuadro 4 se dan algunos valores típicos de MTBF, junto con la frecuencia media de conmutaciones resultantes.

CUADRO 4

Tasas típicas de fallos de equipos de estación terrena

Dispositivo	MTBF (h)	Frecuencia de conmutación media (por mes)
Amplificador de gran potencia	2 000	0,36
Convertidor elevador de frecuencia	4 000	0,18
Módem	> 4 000	< 0,18
Amplificador de bajo nivel de ruido (LNA)	8 000	0,09
Dispositivo post-LNA	50 000	0,01
Convertidor reductor de frecuencia	4 000	0,18
Total		1,0

Las cifras del «total» del cuadro 4 corresponden a un enlace unidireccional que incorpora una estación terrena transmisora y una estación terrena receptora. Evidentemente no toman en cuenta el hecho de que estadísticamente algunos meses serán peores que ese promedio. Requiere estudio ulterior la posible necesidad de incorporar ese elemento.

La duración de cada conmutación será típicamente de 150 ms, incluido el tiempo de reacción del circuito de control.

2.2.2 *Conmutación en la banda de base*

Dada la limitada aplicación que tiene hasta la fecha el equipo de banda de base digital, se dispone de muy poca experiencia para reducir tasas de fallos. La única información disponible corresponde al equipo AMDT, que se espera que de MTBF globales de 3 000 h para el equipo terminal central y de 2 000 h para los módulos de interfaz. Si se agrupan esos valores, darán 0,6 fallos por mes o 1,2 de total mensual en un enlace completo. Este es un valor que puede controlarse minuciosamente mediante la aplicación de prácticas de diseño adecuadas.

Cuando se producen los fallos, el tiempo de conmutación es muy breve, pero es posible que el efecto sobre el tráfico dure bastante más tiempo. El resultado puede ser desde 2 ó 3 bits erróneos hasta la pérdida de una multitrama, esto es, 128 bits en cualquiera de los canales a 64 kbit/s.

2.2.3 *Estados transitorios de la alimentación de energía*

Este efecto es muy difícil de cuantificar. La mejor prueba es que, dentro del equipo FI/RF, el doble de conmutaciones son, como término medio, el resultado de estos efectos espurios, puesto que son causadas por fallos reales del equipo. Por consiguiente, basándose en la información de FI/RF antes dada, debe atribuirse a este efecto un valor de dos conmutaciones por mes.

2.2.4 *Conmutación del trayecto de la señal en el satélite*

Aunque en la actualidad no se dispone de datos sobre este efecto, se considera improbable que sea tan frecuente como la conmutación del trayecto en la estación terrena. Sin embargo, ello puede cambiar a medida que se pongan en servicio satélites más complejos, en particular si se emplea la conmutación o el tratamiento a bordo; por consiguiente, el tema requiere un estudio más detallado.

2.2.5 *Efectos de las conmutaciones de los equipos sobre los parámetros de la Recomendación UIT-T G.821*

En las pruebas realizadas en TELECOM-1 entre Bercenay-en-Othe y Trou-Biran, se observó que las conmutaciones de los equipos de estación terrena produjeron los siguientes efectos sobre los parámetros de la Recomendación UIT-T G.821:

	Segundos con muchos errores	Segundos con error	Minutos degradados
Amplificador paramétrico	2	2	0
Módem	2	2	0

Se necesita más información sobre este tema, particularmente en relación con los efectos causados por otros equipos FI/RF.

3. **Cálculos y modelos de la calidad de un enlace en términos de errores**

3.1 *Introducción*

En este punto se describe un método para estimar la calidad de un enlace, expresada en PBE en función de la distribución en porcentaje de tiempo, sobre la base de los parámetros del cuadro 1. En el § 3.2 infra, se describe el procedimiento para determinar la calidad y en el § 3.3 se indican cierto número de modelos de PBE en función de porcentajes de tiempo, que se ajustan a la Recomendación UIT-T G.821 basada en las características generales de sistemas «reales».

3.2 *Método de cálculo*

Una primera suposición importante es que la calidad del enlace del sistema de satélite está limitada por mecanismos que son fundamentalmente de carácter aleatorio. Ello permite utilizar un método de Poisson o binómico para calcular la probabilidad de que aparezca un determinado número de errores o eventos de error en un intervalo de tiempo dado, con una determinada probabilidad de bits erróneos o de eventos de error. Dentro de la gama numérica de los parámetros de interés, la distribución binómica converge en la distribución de Poisson.

Los datos han demostrado que la suposición de apariciones aleatorias de errores o de eventos de error es válida. En el § 5 de este anexo se proporciona un ejemplo, y en el curso de reuniones del UIT-R se presentaron otros ejemplos basados en esta suposición. En el § 5 se proporciona asimismo información sobre la desviación de la distribución de ocurrencias de error con respecto a una distribución aleatoria, debido a la utilización de la corrección de errores sin canal de retorno.

Para evaluar la calidad del enlace en lo tocante a su cumplimiento de los requisitos de la Recomendación UIT-T G.821, es necesario establecer un modelo de la calidad del enlace que exprese la PBE en función del porcentaje de tiempo. Una vez establecido el modelo del enlace, pueden efectuarse cálculos para determinar si ese

modelo particular satisface los criterios de intervalos con error de la Recomendación UIT-T G.821. Esto se realiza dividiendo el eje de porcentaje de tiempo en pequeños intervalos, lo que implica valores constantes de PBE que corresponden a esos pequeños intervalos, calculando la probabilidad de ocurrencia de varios intervalos con error con la PBE, multiplicando por el valor del intervalo de tiempo y luego sumando las probabilidades para cada intervalo con error y comparando con los criterios las probabilidades totales resultantes.

Para ilustrar el método de cálculo, se determinan el porcentaje de segundos con error (ES), de segundos con muchos errores (SES) y de los minutos degradados (DM) del siguiente modo:

- a) divídase el porcentaje del eje de tiempo del modelo considerado en tantas secciones como sean necesarias para que la curva pueda representarse por una aproximación en escalera. Cada intervalo de la escala posee una PBE constante;
- b) para el valor de PBE de cada sección de la escalera, determínese a partir de las figs. 1 ó 2 la probabilidad de ES, SES o DM según corresponda;
- c) esa probabilidad multiplicada por el porcentaje de tiempo dividido en pequeños elementos del intervalo de tiempo da el valor de ES, SES o DM producido por ese intervalo;
- d) la suma de todas las contribuciones da el porcentaje total de ES, SES o DM.

Los pasos a) a d) pueden resumirse matemáticamente como sigue:

$$\text{Total de todas las contribuciones} = \sum [(1 - P(E, N, PBE)) \cdot \Delta T]$$

donde:

ΔT : intervalo de tiempo de la sección de la escalera

$P(E, N, PBE)$: la probabilidad del objetivo particular

E : umbral de errores

N : número de bits en el intervalo de tiempo del parámetro de calidad considerado

PBE : probabilidad de bits erróneos;

- e) es necesario agregar al total de los segundos con muchos errores un término adicional para incluir los producidos durante los periodos que presentan una PBE superior a 1×10^{-3} , y que son, también, periodos de disponibilidad (véase el § 2.1.5);
- f) por último, los resultados pueden expresarse en términos de porcentaje de tiempo disponible. Los resultados adoptan entonces la forma de los objetivos de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.821, y pueden compararse con ellos.

Las curvas de las figs. 1 y 2 se han calculado utilizando la fórmula de distribución de Poisson siguiente:

$$P(E \text{ o menos errores}) = \sum_{K=0}^E \frac{(N \cdot PBE)^K \cdot (e^{-N \cdot PBE})}{K!}$$

donde:

N : número de bits en un intervalo de integración deseado, es decir $64\,000 \times 60$ para un intervalo de 1 min

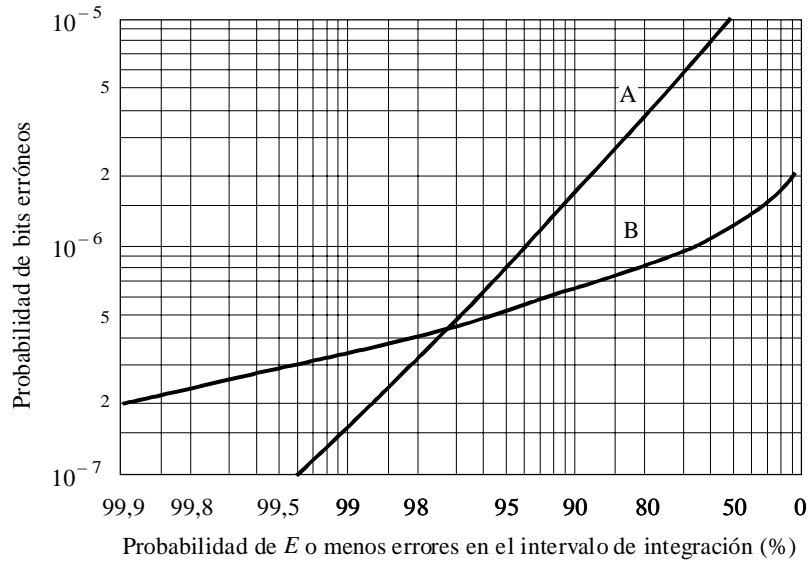
E : umbral de errores

PBE : probabilidad de bits erróneos.

3.3 Calidad de los modelos

La aplicación del proceso de conversión antes indicado permitirá identificar cierto número de modelos distintos de calidad de sistema de satélite que satisfagan o excedan los objetivos de la Recomendación UIT-T G.821. En la fig. 3, se representan cuatro de esos modelos.

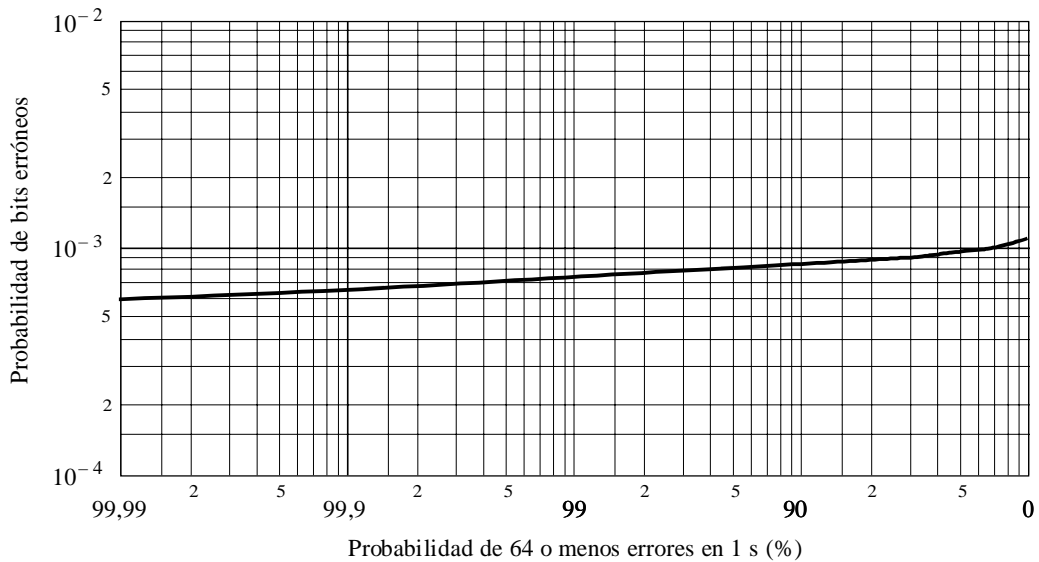
FIGURA 1



Curvas A: Probabilidad de segundos sin errores, es decir
 (1 – probabilidad de segundos con error)
 B: Probabilidad de minutos con 4 o menos errores, es decir
 (1 – probabilidad de minutos degradados) D01

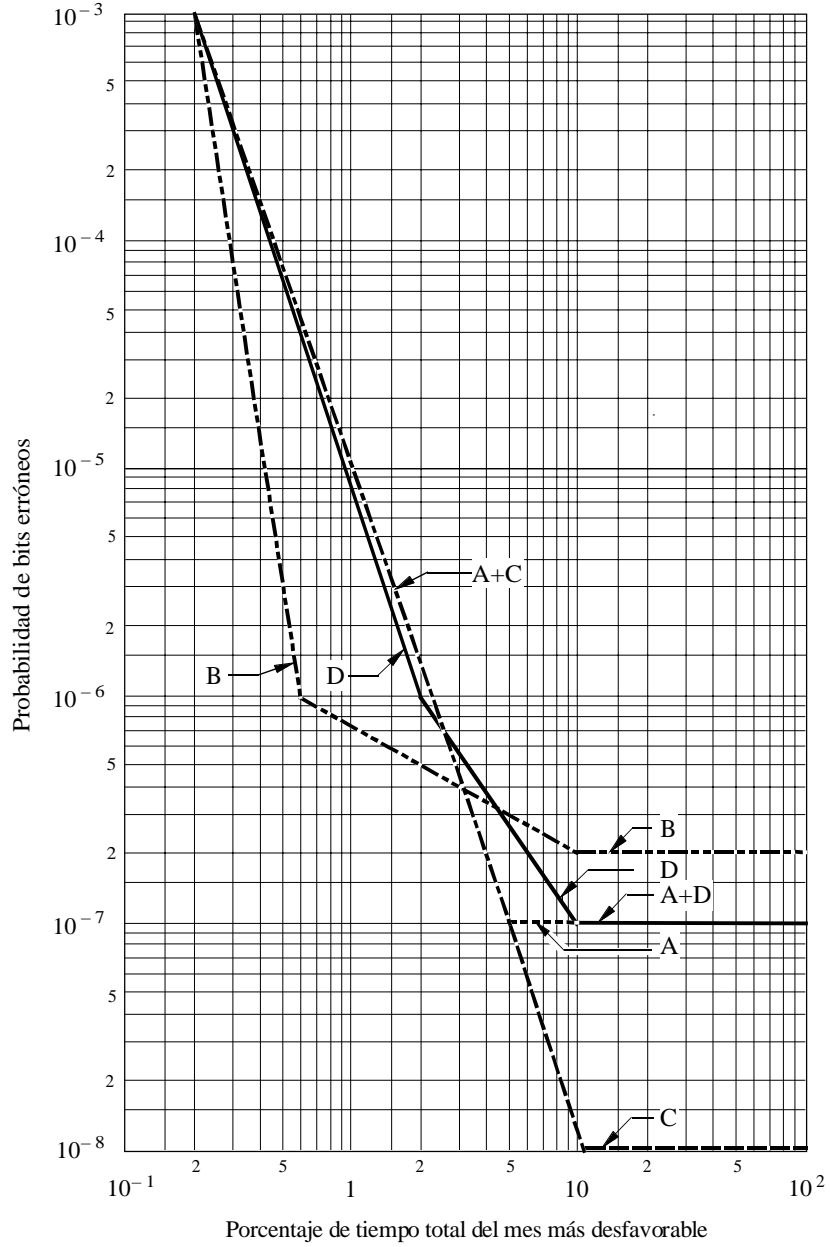
FIGURA 2

Probabilidad de que el número de errores sea igual o inferior a 64 en 1 s



Nota 1 – La probabilidad de 64 errores o menos por segundo es equivalente a (1 – probabilidad de segundos con muchos errores). D02

FIGURA 3
Modelos de PEB que se ajustan a la Recomendación UIT-T G.821



- A: Modelo a)
- B: Modelo b)
- C: Modelo c)
- D: Modelo d)

Los puntos críticos a largo plazo de esos modelos (expresados en tiempo total del mes más desfavorable) son los siguientes:

- Modelo a) : $PBE = 1 \times 10^{-7}$ para el 95% del mes más desfavorable
- Modelo b) : $PBE = 2 \times 10^{-7}$ para el 90% del mes más desfavorable
 $PBE = 1 \times 10^{-6}$ para el 99,4% del mes más desfavorable
- Modelo c) : $PBE = 1 \times 10^{-8}$ para el 89% del mes más desfavorable
- Modelo d) : $PBE = 1 \times 10^{-7}$ para el 90% del mes más desfavorable
 $PBE = 1 \times 10^{-6}$ para el 98% del mes más desfavorable.

Al deducir el modelo c) a partir de la fig. 3 se trató de producir un modelo en el cual mantuviera la calidad a una PBE baja (1×10^{-8}) durante el periodo de tiempo más corto posible (89% del mes más desfavorable). Este modelo sería apropiado cuando la calidad de funcionamiento está casi totalmente limitada por la atenuación debida a la lluvia (es decir, por encima de 10 GHz). El amplio margen de desvanecimiento requerido en esta situación garantiza una PBE adecuada durante gran parte del tiempo. En la curva A (modelo a)) se intentó evaluar el efecto de la adopción de una PBE de 1×10^{-7} en el punto crítico de la PBE a largo plazo.

El objetivo del modelo b) es posibilitar la PBE más alta posible a largo plazo. En este caso, se ha incluido un punto crítico adicional para una PBE de 10^{-6} durante el 99,5% de un mes, para obtener un modelo más ajustado de la calidad del sistema en estos porcentajes de tiempo aproximadamente. Este modelo será probablemente apropiado para situaciones en las que es escasa la atenuación debida a la lluvia o cuando el sistema tiene limitada la interferencia intersistemas e intrasistemas.

El modelo d) concilia los requisitos de los sistemas con propagación limitada y los de los sistemas con interferencia limitada. Se estima que pueden satisfacer este modelo los sistemas de satélite de alta capacidad y tecnología moderna, sin mayores inconvenientes en materia de costo o de capacidad.

Una característica común de los cuatro modelos es el punto (0,2%, 1×10^{-3}) y es importante determinar cómo ese punto permite que los modelos cumplan el objetivo b) de segundos con muchos errores de la Recomendación UIT-T G.821. Ese objetivo es de $PBE = 1 \times 10^{-3}$ para el 99,97% del tiempo disponible en el mes más desfavorable. De conformidad con la definición de la Recomendación UIT-T G.821, un periodo de 10 o más segundos consecutivos con muchos errores (los que presentan una PBE superior a 1×10^{-3}), se considera como tiempo de indisponibilidad. Los periodos de 9 o menos segundos consecutivos se incluyen en el tiempo disponible. De la Recomendación UIT-R S.579 puede obtenerse una indicación de la proporción del tiempo de disponibilidad.

En el cuadro 5 aparecen las características de calidad de esos 4 modelos con parámetros de la Recomendación UIT-T G.821. Ese cuadro da, para cada parámetro, porcentajes de intervalos de tiempo en el tiempo disponible del mes. El tiempo indisponible se ha sustraído del tiempo total para obtener los resultados señalados en el cuadro. Como la Recomendación UIT-T G.821 se refiere a los porcentajes de tiempo disponible, la forma de ese cuadro es adecuada para comparar la calidad con los requisitos de la Recomendación UIT-T G.821.

Los valores que figuran en el cuadro 5 se han calculado sobre la base de un punto crítico a corto plazo (o sea: $BER = 1 \times 10^{-3}$) de 0,2% del «tiempo total» y un factor de disponibilidad debida a la propagación de 10%.

En el cuadro 5 puede verse que hay una considerable diferencia entre el modelo b) y los demás modelos, ya que en los modelos a), c) y d) casi todos los parámetros satisfacen por igual los objetivos de la Recomendación UIT-T G.821, mientras que la aplicación del modelo b) viene dictada muy claramente por la característica de segundos con error.

Se desprende claramente que en cualquier diseño de un sistema futuro de satélite, los objetivos pueden establecerse en función del tiempo total (como se ha hecho en el pasado) o del tiempo disponible. La adopción del último método ofrece una ventaja principal: resulta patente de forma más inmediata que los objetivos son coherentes con la Recomendación UIT-T G.821, puesto que no han de hacerse suposiciones acerca del porcentaje de tiempo indisponible. En el caso de que un diseñador requiera los porcentajes de tiempo total, puede emplear un factor de conversión apropiado a la banda de frecuencias y a la región climatológica que se considera. Ello puede llevar perfectamente en muchos casos a objetivos que no son tan estrictos como los que figuran en el objetivo de «tiempo total», puesto que tienen incorporada una suposición de «porcentaje de tiempo indisponible».

CUADRO 5

Objetivo	Calidad (% del tiempo disponible)				
	Rec. UIT-T G.821	Modelo a)	Modelo b)	Modelo c)	Modelo d)
Minutos degradados	2,0	1,97	0,75	1,97	1,87
Segundos con error	1,6	1,59	1,60	1,06	1,56
Segundos con muchos errores	0,03	0,024 ⁽¹⁾	0,022 ⁽¹⁾	0,024 ⁽¹⁾	0,024 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Se han dado tres cifras decimales para estos valores a fin de indicar la contribución a los segundos con muchos errores de la integral del tiempo con $BER \leq 1 \times 10^{-3}$.

Nota 1 – Los valores del cuadro se dan para demostrar la compatibilidad del modelo estudiado con la Recomendación UIT-T G.821. Se obtendrán distintos valores utilizando diferentes modelos.

Nota 2 – Conviene señalar que si el diseñador de un sistema de satélite tiene que basar los cálculos del sistema directamente en uno de los modelos del tipo indicado, la calidad del sistema superará a la obtenida con los cálculos señalados. Ello se debe al hecho de que la característica PBE/% del tiempo en un sistema práctico excederá inevitablemente al modelo en la mayoría de los emplazamientos.

3.4 *Procedimientos de medición práctica*

3.4.1 *Introducción*

Por lo general, la prueba de redes tiene por finalidad verificar que la red satisface los objetivos de calidad de funcionamiento expresados en función de los parámetros de la Recomendación UIT-T G.821 (ES, SES y DM). Por lo tanto, se recomienda que, siempre que sea posible, estos parámetros se midan directamente, de conformidad con la Recomendación UIT-T G.821, en vez de medir los valores de la BER conforme a la presente Recomendación.

Sin embargo, puede resultar necesario medir además los valores de la BER del sistema por satélite, para compararlos con los valores de la BER del *recomienda* 1 de la presente Recomendación.

Esto permitiría asimismo el examen de la relación entre las mediciones de la BER y las mediciones de los parámetros de la Recomendación UIT-T G.821. Cuando este sea el caso, se sugiere aplicar un procedimiento coherente para medir la BER en función del porcentaje de tiempo, pues el periodo de integración influye sobre los resultados obtenidos. En la fig. 4 se demuestra este principio cuando se aplican a la misma serie de datos medidos, periodos de integración de 2 h, 1 h, 15 min, 1 min, 10 s, 2 s y 1 s.

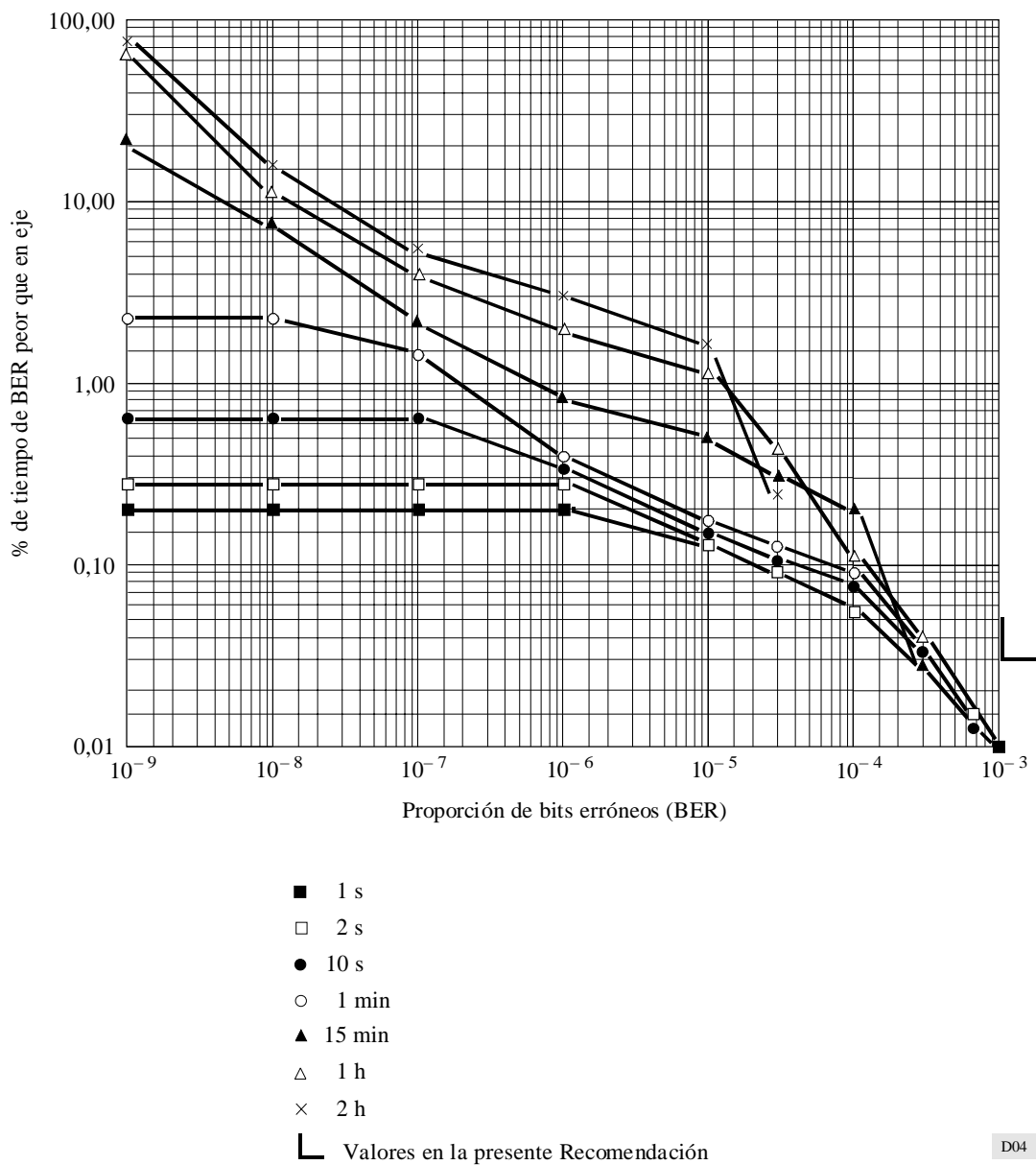
Por lo tanto, se proponen los siguientes algoritmos para garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos con las diferentes pruebas.

3.4.2 *Algoritmos de medición*

Con esta finalidad se han establecido dos algoritmos, a saber:

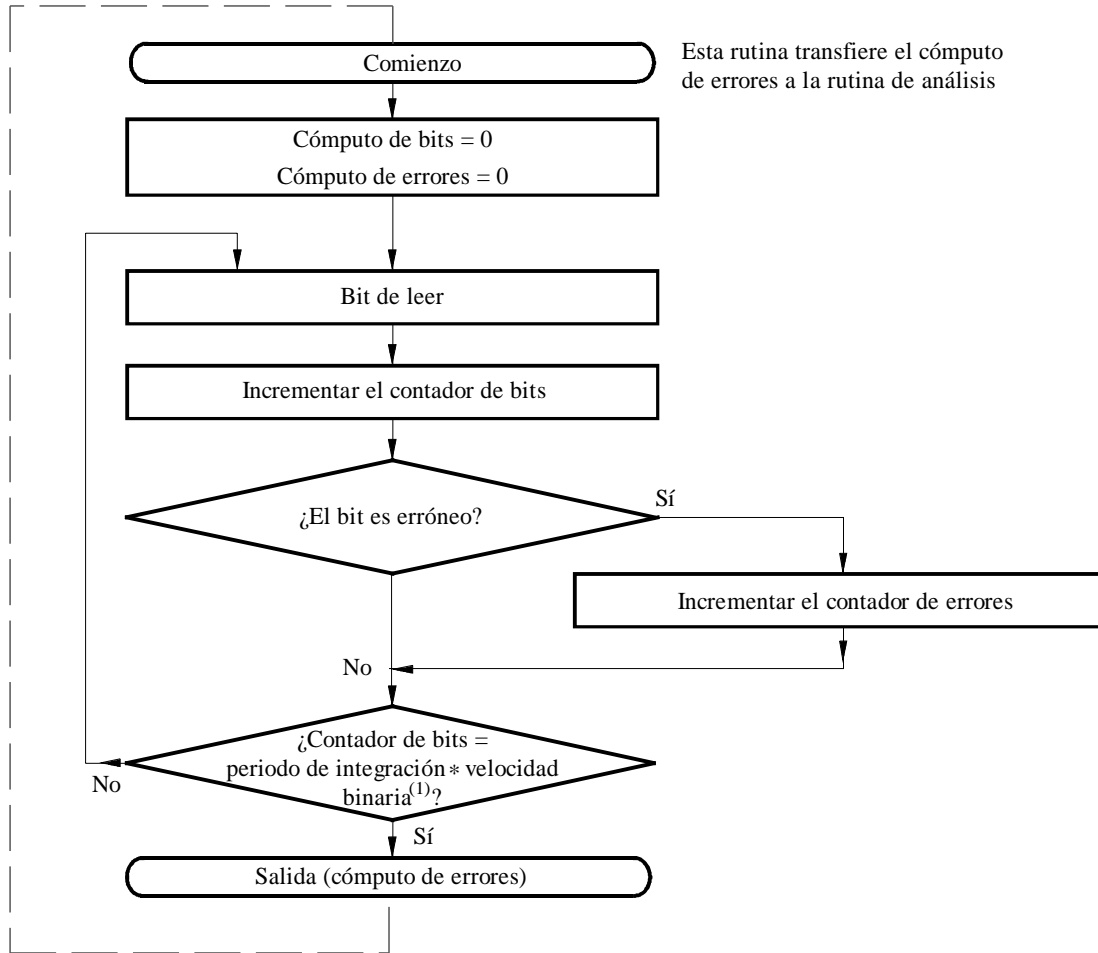
- a) El algoritmo de recopilación de datos, que es un algoritmo genérico característico de los equipos de prueba patentados. Este algoritmo es pues similar al utilizado en la mayor parte de los equipos de prueba existentes.
- b) El algoritmo de análisis de datos.

FIGURA 4
 Examen de la relación existente entre los valores medidos de BER
 y los valores de las mediciones de los parámetros
 de la Recomendación UIT-T G.821



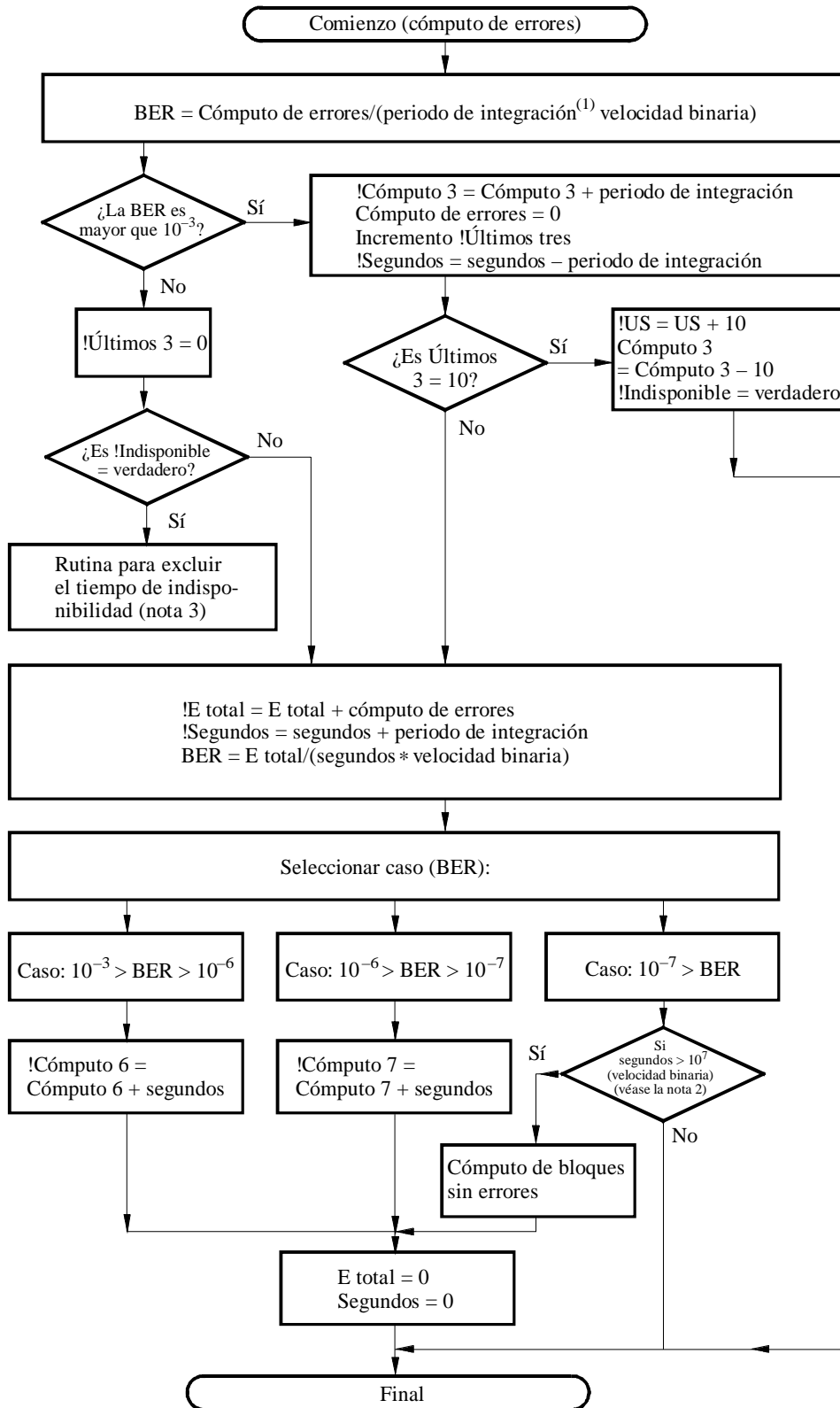
Es indispensable utilizar el mismo periodo de integración (y la misma velocidad binaria) para cada algoritmo. A continuación figuran diagramas descriptivos de cada algoritmo.

a) Algoritmo de recopilación de datos



(1) Este algoritmo se elaboró suponiendo que se utilizaría un periodo de integración de un segundo para armonizar la presente Recomendación con los principios de la Recomendación UIT-T G.821.

b) Algoritmo de análisis de datos



(1) Este algoritmo se elaboró suponiendo que se utilizaría un periodo de integración de un segundo para armonizar la presente Recomendación con los principios de la Recomendación UIT-T G.821.

Nota 1 – Un signo «!» antes del nombre de una variable en el algoritmo anterior indica que la variable debe considerarse estática, esto es, debe preservarse entre cada llamada de esta rutina durante cualquier prueba. El signo «!» normalmente se indica una sola vez para una variable determinada y todas las apariciones de esa variable deben tratarse del mismo modo.

Nota 2 – El valor 10^7 /velocidad binaria es necesario para permitir la exclusión de los periodos sin errores.

Nota 3 – Esta rutina es necesaria para excluir los periodos de indisponibilidad del análisis de la BER, hasta que el tiempo de disponibilidad se restablezca. Para más información véase la Recomendación UIT-T G.821. Al reintroducir el tiempo disponible, según se define en la Recomendación UIT-T G.821, debe volver a fijarse la variable !Indisponible en el valor «falso».

Nota 4 – Esta rutina puede utilizarse para cualquier velocidad binaria. La mejor comparación posible entre la Recomendación UIT-T G.821 y la Recomendación UIT-R S.614 se logra midiendo un circuito a 64 kbit/s.

Nota 5 – Los tres cómputos (!Cómputo 3, !Cómputo 6 y !Cómputo 7) deben dividirse por la duración de la medición total y luego multiplicarse por 100 para obtener los porcentajes de tiempo correspondientes a cada BER (10^{-3} , 10^{-6} y 10^{-7}), para compararlo con los objetivos indicados en la Recomendación UIT-R S.614, por ejemplo:

$$\% \text{ tiempo durante el cual BER era } > 1 \times 10^{-3} = \frac{\text{!Cómputo 3}}{\text{Duración de la medición}} \times 100$$

4. Ejemplos de calidad de un enlace de satélite típico

En este punto se presentan los resultados de los cálculos de la calidad prevista de tres sistemas distintos de transmisión digital por satélite:

- 6/4 GHz, INTELSAT-V, 120 Mbit/s, AMDT,
- 14/11 GHz, EUTELSAT, 120 Mbit/s, AMDT,
- 14/11 GHz, INTELSAT-V, 120 Mbit/s, AMDT (con control de potencia en el enlace ascendente y diversidad de emplazamientos).

La elección de estos sistemas deriva de que se trata de sistemas existentes o que entrarán pronto en funcionamiento en las bandas de 6/4 y 14/11 GHz. Estos sistemas pueden utilizarse como orientaciones para el diseño de secciones de satélite de las futuras conexiones de la RDSI. Pueden producirse diferentes características de calidad según factores tales como el ángulo de elevación, la zona hidrometeorológica y las situaciones de interferencia. El diseñador del sistema deberá prestar gran atención a los factores de este tipo cuando lleve a cabo el diseño de un HRDP por satélite de la RDSI.

Los resultados de los cálculos del balance del enlace son curvas de probabilidad de bits erróneos en función del porcentaje de tiempo total en el mes más desfavorable. Gracias al empleo de esas curvas pueden conocerse las repercusiones de los objetivos de calidad de la RDSI sobre el diseñador de los sistemas de satélite.

El § 4.3 contiene también los resultados de las mediciones realizadas entre Bercenay-en-Othe (Francia) y Trou-Biran (Guyana francesa) en un enlace de canal de servicio a 64 kbit/s. Estas mediciones se han llevado a cabo durante más de un año con una media de 445 h de grabación por mes.

4.1 Modelo de atenuación

El modelo de atenuación utilizado en el presente texto para los cálculos del sistema de satélites INTELSAT-V es una aplicación del método facilitado en la serie PN del UIT-R. Permite calcular el porcentaje anual de la atenuación debida a la lluvia en trayecto oblicuo en los emplazamientos de las estaciones terrenas. Las estadísticas se obtienen utilizando varios parámetros, a saber:

- lluvia: concretamente, la intensidad de la lluvia en un punto para el 0,01% de un año medio,
- altura de la estación terrena por encima del nivel medio del mar,
- ángulo de elevación de la estación terrena hacia el satélite,
- latitud de la estación terrena.

Con esos parámetros se calcula la atenuación debida a la lluvia que se rebasará durante el 0,01% de un año. Los valores de atenuación para otros porcentajes de un año se determinan utilizando la siguiente fórmula:

$$A_P = b A_{0,01} P^{-a}$$

donde:

- A_P : atenuación para el porcentaje deseado del año
 $A_{0,01}$: atenuación para el 0,01% del año
 P : porcentaje deseado del año
 a y b : constantes.

Esas cifras de la atenuación anual pueden ponerse en relación con la atenuación en el «mes más desfavorable» utilizando la siguiente relación:

$$P_y = 0,29 P_w^{1,15}$$

donde:

- P_y : porcentaje anual
 P_w : porcentaje del mes más desfavorable.

Con este método se obtuvieron las curvas para INTELSAT-V que se muestran en la fig. 5. La calidad de INTELSAT-V, 6/4 GHz, corresponde a una transmisión de Estados Unidos de América a Italia, estando ambas estaciones situadas en la zona hidrometeorológica «K»; la estación terrena de Estados Unidos de América tiene un ángulo de elevación de 25° y, la estación italiana, de 21°. En el caso de INTELSAT a 14/11 GHz, la estación terrena transmisora está situada en el Reino Unido, con un ángulo de elevación de 29° y, la estación terrena receptora, en Estados Unidos de América con el mismo ángulo de elevación. La estación terrena del Reino Unido está situada en la zona hidrometeorológica «G» y, la de Estados Unidos de América en la zona hidrometeorológica «K».

Los balances del enlace de INTELSAT-V, 6/4 GHz, tuvieron en cuenta las contribuciones a la interferencia debidas a sistemas terrenales, otros sistemas y fuentes de interferencia cocanal y en canales adyacentes. Se supuso una reutilización cuádruple de la frecuencia con discriminación por polarización y aislamiento espacial. Se incluyeron variaciones de la potencia de salida del transpondedor debidas a cambios del punto de funcionamiento causados por el desvanecimiento del enlace ascendente, utilizando las características de transferencia de un transpondedor no lineal.

Para el sistema INTELSAT a 14/11 GHz, se supuso a los efectos de este estudio un control de potencia del enlace ascendente de 10 dB aplicado de manera continua. Se supuso también que se utilizaba en las estaciones receptoras la diversidad de emplazamientos con una separación de 20 km. Se incluyeron también variaciones de la potencia de salida del transpondedor debidas a cambios del punto de funcionamiento causados por desvanecimiento del enlace ascendente. Ninguna de las curvas del sistema INTELSAT supone la codificación con corrección de errores. Hay que observar que todos los terminales AMDT de INTELSAT están equipados para emplear un sistema facultativo de corrección de errores en recepción (FEC – «forward error correction»), que utiliza un código de bloques BCH (128:112) con el que se obtiene una ganancia de al menos 3 dB para una BER de relación 7/8 de entrada de 1×10^{-4} .

La calidad del sistema EUTELSAT se obtuvo con un método semejante. Las estadísticas de atenuación utilizadas corresponden a un clima continental europeo típico y están basadas en mediciones realizadas con el satélite OTS. Esas estadísticas son análogas a las denominadas clima «H», en la serie PN del UIT-R, pero son ligeramente más optimistas.

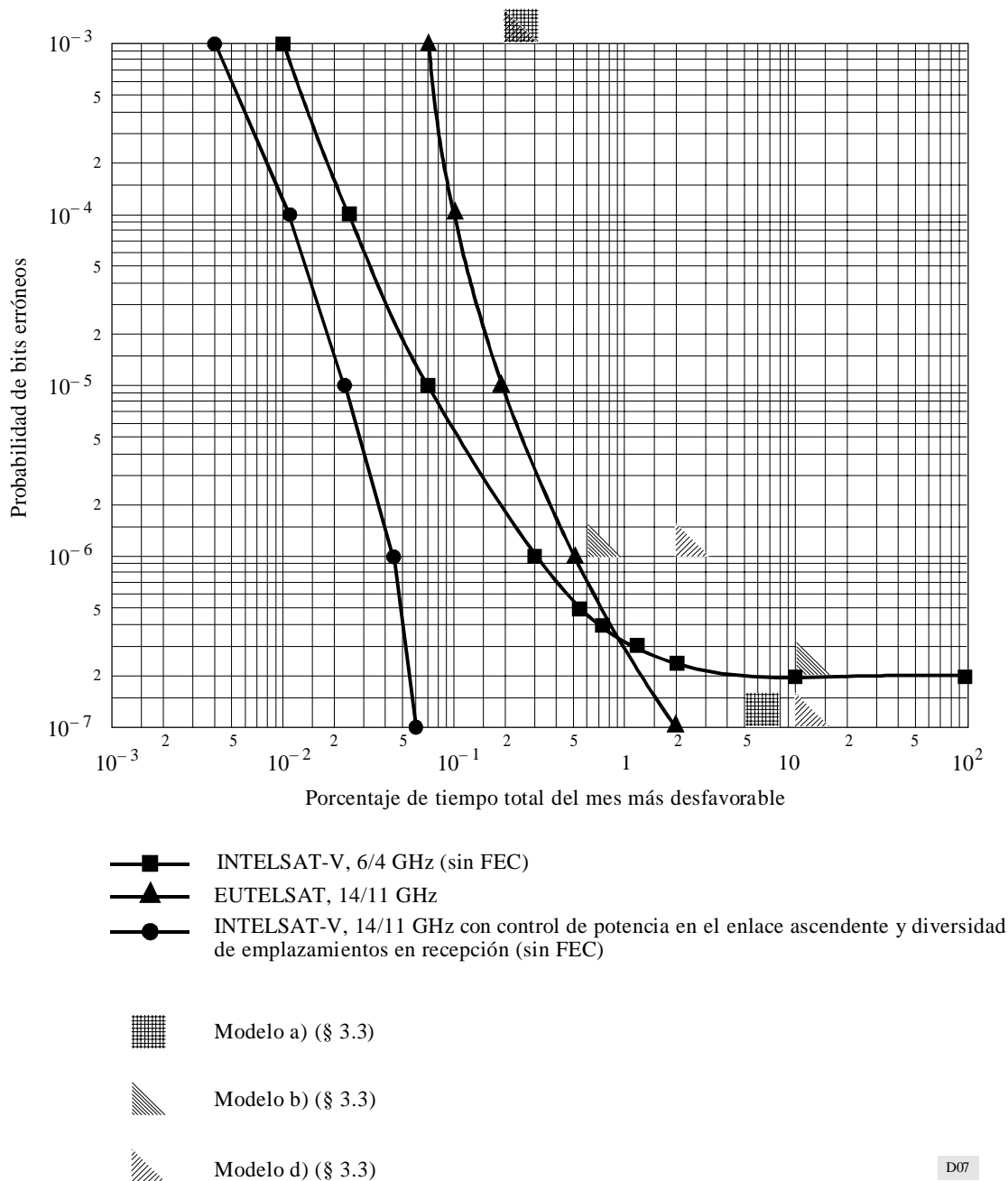
4.2 Consideraciones sobre la relación entre la propagación y los objetivos a corto plazo

En las Recomendaciones del UIT-R sobre la calidad de funcionamiento, algunos objetivos a corto plazo se dan en porcentajes del año. Por el contrario, los objetivos a largo plazo aparecen dados en porcentajes del mes más desfavorable. Los objetivos fijados en la Recomendación UIT-T G.821 figuran también como porcentajes de un periodo de tiempo del orden de un mes. Esos hechos llevan a la conclusión de que en cualquier Recomendación futura sobre la calidad de sistemas de satélite en la RDSI, tal vez sea necesario utilizar estadísticas de la atenuación mensual.

En la serie PN del UIT-R se halla la información precisa para efectuar esa conversión: de esa información puede deducirse que el factor de conversión varía con el clima y el porcentaje de tiempo. En lo que respecta al 0,01% del año se da un factor de 4,5 a 6,5, en función del clima.

FIGURA 5

Probabilidad de bits erróneos en función del porcentaje de tiempo total del mes más desfavorable



D07

En lo que respecta al efecto en la transmisión de la atenuación prevista en las distintas frecuencias, pueden formularse algunas observaciones generales.

Estas observaciones son las siguientes:

- para las frecuencias inferiores a 10 GHz, la PBE a largo plazo resulta el elemento de control en un caso de reutilización de frecuencia a 6/4 GHz que fue examinado;
- en las frecuencias comprendidas entre 10 y 15 GHz, la PBE a corto plazo (1×10^{-3}) es el elemento de control si no se utiliza la diversidad. Se analizaron los casos de diversidad, y los de no diversidad;
- en el caso de las frecuencias superiores a 15 GHz, en especial a 30/20 GHz, es probable que también la PBE a corto plazo (1×10^{-3}) sea el elemento de control. Sin embargo, no se realizó ningún análisis.

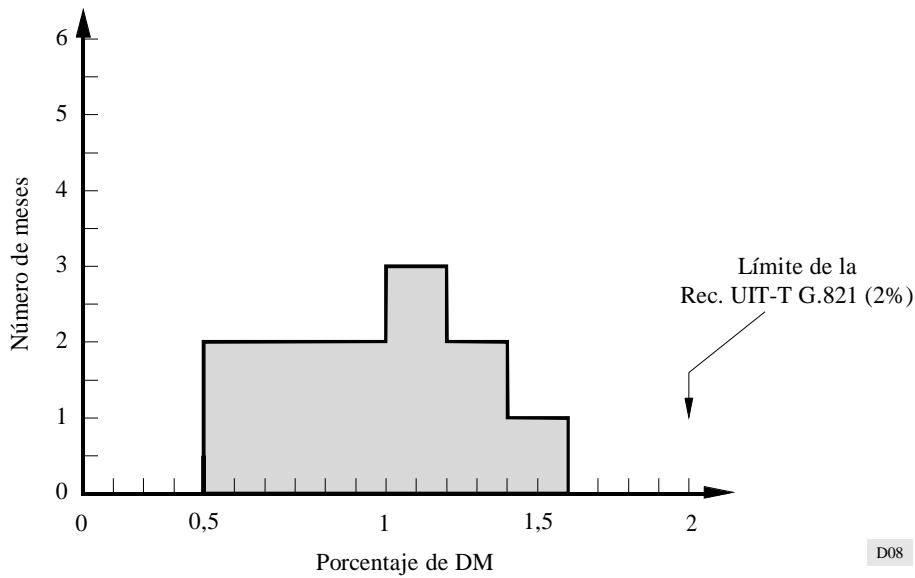
4.3 Resultados de las mediciones en el satélite TELECOM-1

Las características de este enlace, cercanas al modelo a) de la fig. 3, fueron las siguientes:

- balance de enlace calculado para obtener durante el 99,9% del tiempo una proporción de bits erróneos mejor que 10^{-4} , lo que corresponde a una proporción de bits erróneos de unos 10^{-7} con cielo despejado;
- $E_b/N_0 = 14,00$ dB;
- velocidad de transmisión = 8,768 Mbit/s sin corrección directa de errores;
- transmisión en las bandas de 6/4 GHz.

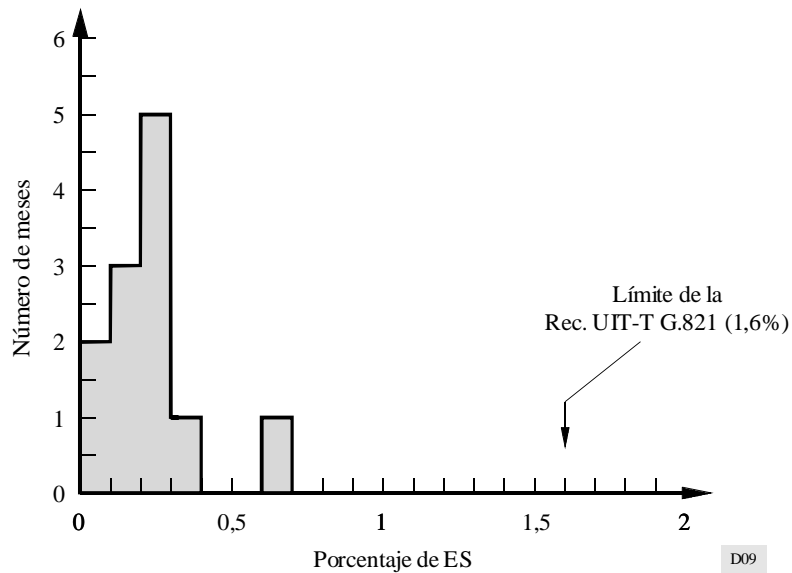
Los resultados de las pruebas se muestran en las figs. 6 y 7 para los minutos degradados y segundos con error, respectivamente. Los segundos con muchos errores registrados estuvieron entre 0,01% y 0,02%.

FIGURA 6
Distribución mensual de minutos degradados (DM)



D08

FIGURA 7
Distribución mensual de segundos con error (ES)



D09

Estos resultados no muestran la indisponibilidad debida a los fenómenos de centelleo encontrados en la zona ecuatorial donde está situada la estación terrena Trou-Biran.

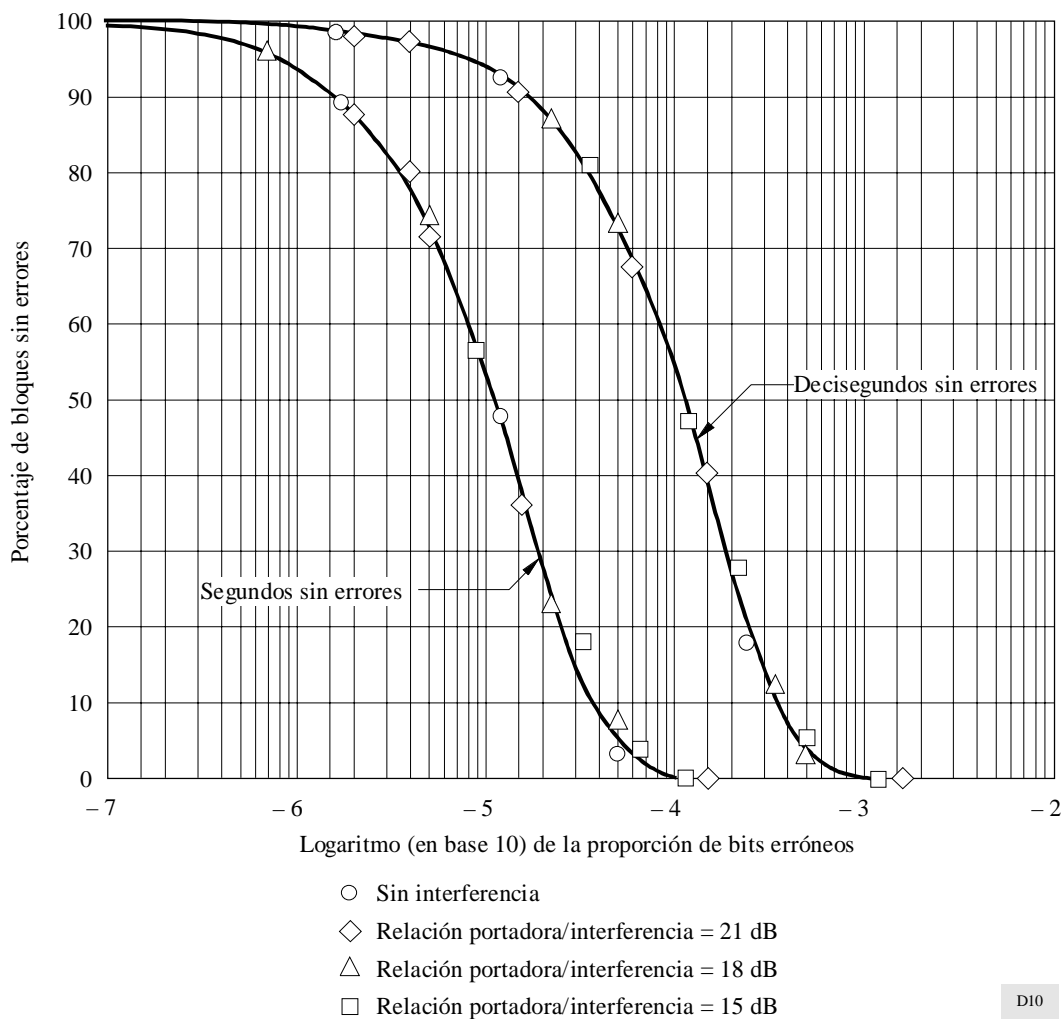
Durante las mediciones se observó que la interferencia solar causó un aumento del tiempo de indisponibilidad y un aumento de los segundos con muchos errores. (La Recomendación UIT-R S.579 prevé un 0,2% de indisponibilidad en cualquier mes para cualquier fenómeno relacionado con las condiciones de propagación.)

5. Distribución de errores en los enlaces por satélite y efectos del funcionamiento no codificado y del funcionamiento con corrección de errores sin canal de retorno

5.1 Introducción

El método expuesto en este punto para determinar si la calidad de un enlace por satélite basta para satisfacer los requisitos de la Recomendación UIT-T G.821, se basa en la suposición de que los errores producidos por el enlace de satélite son de aparición aleatoria. Para los enlaces que no emplean corrección de errores sin canal de retorno (FEC), esta suposición se acepta en general como cierta. La fig. 8 contiene un ejemplo de la validez de esta suposición.

FIGURA 8
Distribución de bloques sin errores: 64 kbit/s, sin codificación FEC



En el caso de enlaces que utilizan FEC, forzosamente la distribución de los errores en bits individuales se produce en «ráfagas» o en grupos, debido al funcionamiento del decodificador FEC. Los errores en la salida del decodificador ocurren en grupos cuando los grupos están separados por intervalos sin error relativamente prolongados. Cada grupo o «evento de error» puede definirse como un intervalo que comienza y termina con un bit erróneo y posee cierto número de bits erróneos entre ambos extremos. Estos «eventos de error» varían en longitud, y la proporción de bits erróneos dentro de esos intervalos puede llegar a 0,5. Se han proporcionado datos al UIT-R que indican que la ocurrencia de estos «eventos de error» es aleatoria y por lo tanto puede ser modelada utilizando estadísticas binómicas o de Poisson.

La fig. 8 contiene un ejemplo de la suposición de errores aleatorios. En ésta se indican los resultados de mediciones en condiciones reales, en los que se compara la distribución de intervalos sin error (EFI), segundos sin error y decisegundos sin error con una distribución de errores en los bits de tipo Poisson. El acuerdo entre los datos medidos y la distribución teórica es evidente. Estos datos indican asimismo que la concordancia se mantiene también para sistemas alterados por ruido térmico y por ruido térmico con interferencia. Estas medidas se efectuaron a lo largo de un enlace AMDT por satélite en bucle a 120 Mbit/s, en un subcanal a 64 kbit/s. El sistema se puso en funcionamiento en diversas condiciones de interferencia cocanal procedente de una portadora similar continua a 120 Mbit/s.

Se ha demostrado que las principales contribuciones de errores en enlaces digitales por satélite se deben a los efectos de la propagación e interferencia que pueden ser descritos por la distribución de Poisson. Sin embargo, cuando se aplica al canal digital la corrección de errores sin canal de retorno (FEC) (utilizada en muchos sistemas de transmisión digital por satélite para mejorar la calidad de funcionamiento), los errores que llegan a la salida del decodificador tienden a producirse en grupos y, por tanto, es probable que se aparten de la ley de Poisson. Este efecto de agrupación es ilustrado por la medición de intervalos sin error mostrada en la fig. 9. El grado en que se apartan de la ley de Poisson dependerá de los esquemas específicos de codificación y multiplexión utilizados.

Este punto proporciona ejemplos de esquemas de codificación típicos, da los resultados de mediciones que muestran la repercusión de un esquema FEC específico sobre el enlace digital por satélite y presenta modelos matemáticos preliminares que pueden utilizarse para describir el fenómeno de las ráfagas.

5.2 *Características de esquemas de codificación FEC típicos*

5.2.1 *Codificación BCH de relación 7/8*

La codificación FEC de Bose-Chaudhuri-Hocquenghen (BCH) de relación 7/8 se utiliza actualmente en sistemas de transmisión digital por satélite, por ejemplo, sistemas AMDT a 120 Mbit/s de INTELSAT. Este código de bloques corrige hasta dos errores en un bloque de 127 bits y puede detectar tres errores. Sin embargo, en el último caso el decodificador no realiza ninguna acción. Por tanto, el número más probable de errores contenidos en un bloque BCH es tres en salida del decodificador. En este esquema, el tren de bits, formado por bloques de 128 bits, es reestructurado en bloques de 112 bits de información a los cuales se agregan 15 bits de codificación redundante y 1 bit ficticio, manteniendo así la longitud global del bloque de 128 bits. En consecuencia, durante el proceso de codificación, los 128 bits continuos de un canal específico a 64 kbit/s que aparecen originalmente en una subráfaga se dividirán en una de estas siete maneras:

- | | | | |
|-----------|----------|-----------|----------|
| a) 112:16 | b) 96:32 | c) 80:48 | d) 64:64 |
| e) 48:80 | f) 32:96 | g) 16:112 | |

Como resultado, el fenómeno de las ráfagas en cada canal puede presentar cuatro grados diferentes, teniendo a) y g) el mayor grado de ráfagas y d) el menor.

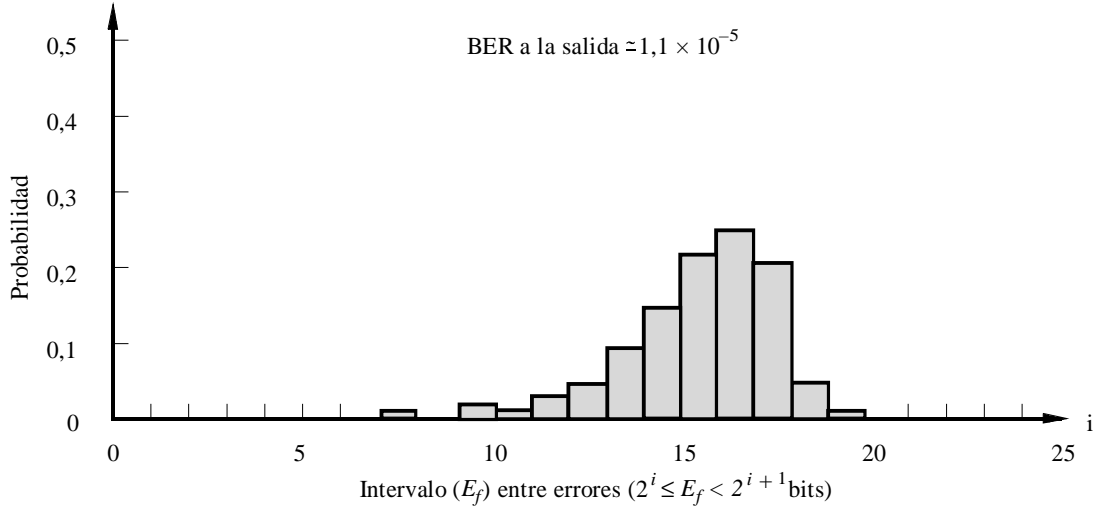
5.2.2 *Codificación convolucional – Decodificación de Viterbi*

La combinación de las técnicas de codificación convolucional y de decodificación de Viterbi es un esquema típico de FEC que está siendo introducido en muchos sistemas por satélite.

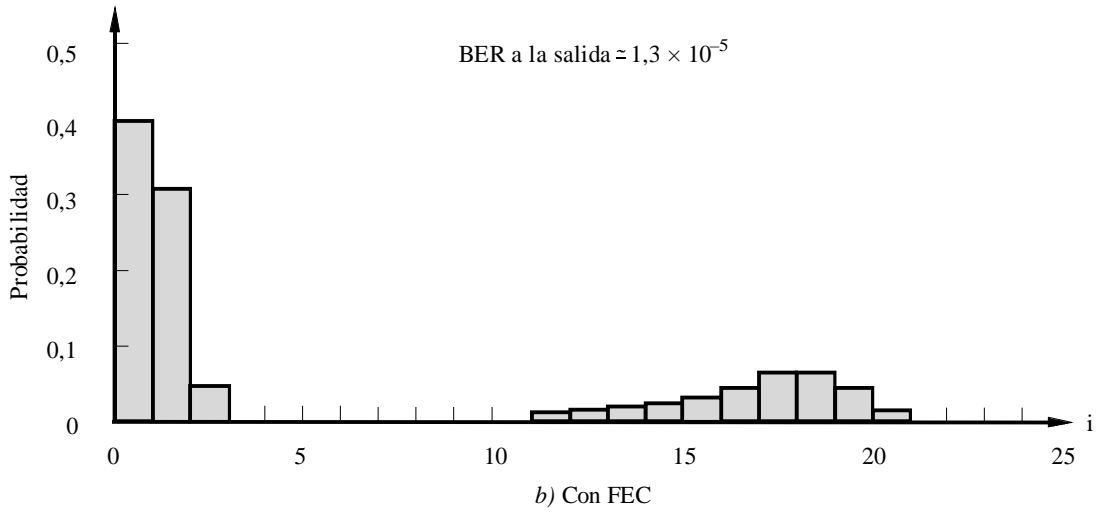
Este método requiere el almacenamiento de secuencias de dígitos y la posterior comparación de dichas secuencias con el tren de impulsos digitales recibido, para determinar cuál de ellas tiene mayores probabilidades de ser correcta. Los errores en la salida del decodificador son provocados por la selección incorrecta de una secuencia o trayecto de datos. Esta selección incorrecta provoca errores a la salida del decodificador, pero éstos no se producen forzosamente de manera consecutiva. La longitud del suceso de error está en función de la configuración del códec, particularmente de la longitud de la memoria del trayecto. En el caso de una decodificación de Viterbi, un código 1/2 de 64 estados con una longitud impuesta de 7 suele tener una longitud de memoria del trayecto de unos 37 bits. Esta longitud de memoria del trayecto es mayor que cualquier error que ocurre con probabilidad significativa.

La fig. 9 muestra resultados experimentales típicos de la distribución de errores sin la decodificación FEC y con ella, en términos de intervalos sin error.

FIGURA 9
Distribución de errores con y sin FEC



a) Sin FEC (error aleatorio)

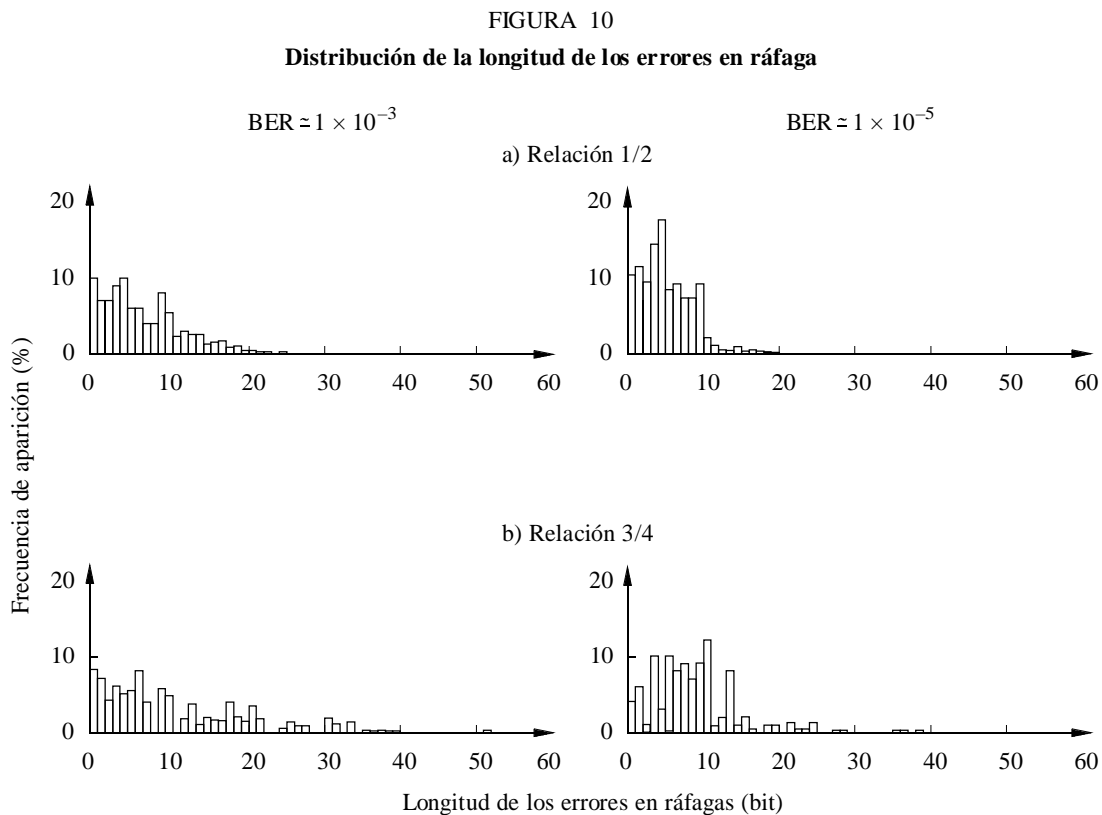


b) Con FEC

(Codificación convolucional de $K = 7$ y relación 1/2 decodificación de Viterbi)

Existen grandes diferencias; la primera tiene una cresta típica de distribuciones aleatorias, mientras que la última tiene dos crestas. Una cresta (al lado derecho) muestra la distribución de los intervalos entre errores en ráfagas, e implica que aparecen de manera aleatoria. La otra cresta (al lado izquierdo) muestra la distribución de los bits erróneos dentro de una ráfaga con errores.

La fig. 10 ilustra los resultados experimentales de la distribución de la longitud de los errores en la ráfaga para las relaciones 1/2 y 3/4 y para dos valores de BER. La longitud de una ráfaga con errores viene definida como el número de bits existentes entre el primer error que aparece en la ráfaga y el último. La fig. 11 muestra la relación entre la longitud media de errores en la ráfaga y la BER después de la decodificación.

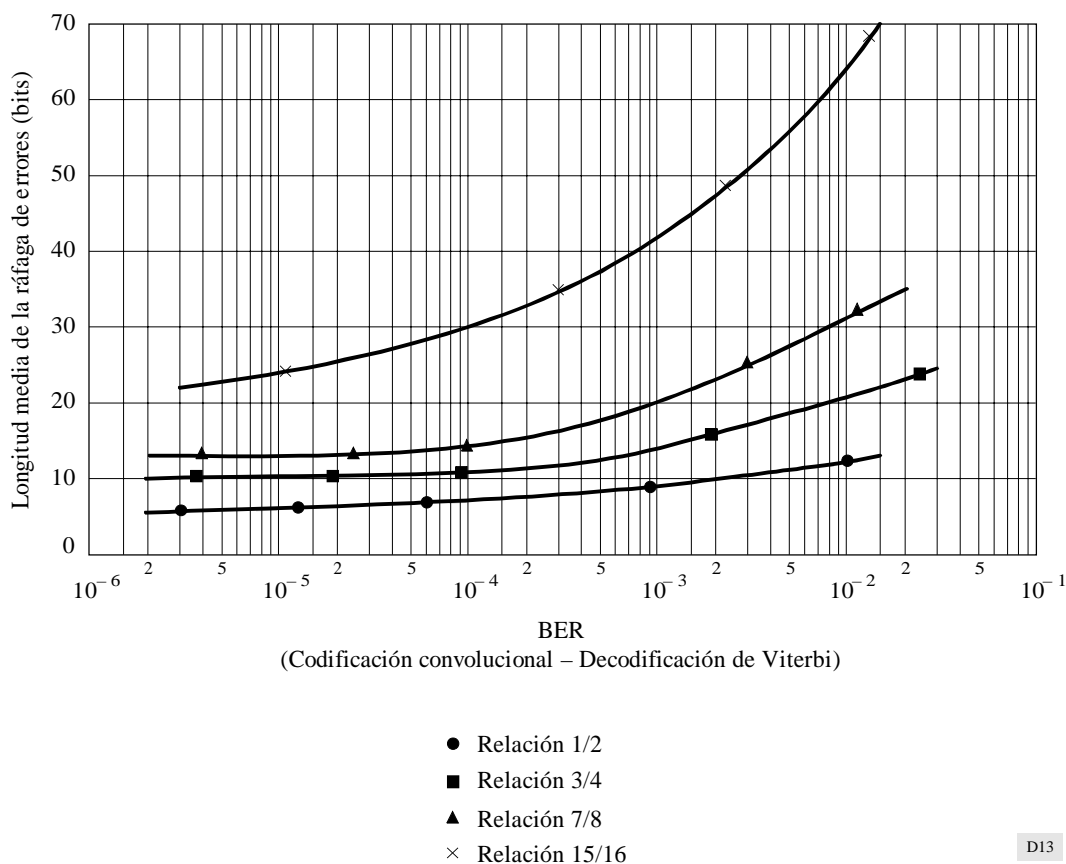


(Codificación convolucional – Decodificación de Viterbi)

D12

En estas figuras puede observarse que, a medida que la velocidad de codificación y la BER son mayores, mayor es la duración de las ráfagas con errores. En general, la longitud media de los sucesos de ráfagas con errores es de aproximadamente cinco y diez bits para códigos de relaciones 1/2 y 3/4, respectivamente. Unos pocos sucesos de ráfagas con errores exceden de 20 bits en longitud. Es importante señalar que no todos los bits en un suceso de ráfaga con errores son erróneos. La proporción de errores en una ráfaga puede considerarse de aproximadamente 1/2, es decir, el número medio de errores incluidos en una ráfaga es dos o tres para códigos de relación 1/2 y aproximadamente cinco para códigos de relación 3/4. Estos experimentos se llevaron a cabo con una estación terrena de norma E1 INTELSAT en un bucle de satélite que utilizaba una portadora IBS a 64 kbit/s.

FIGURA 11
Distribución entre la longitud media de los errores en ráfaga y la BER



D13

Como resultado del análisis anterior, la BER después de la decodificación viene dada por:

$$P_e (\text{BER después de la decodificación}) = \frac{L_b/2}{L_b + E_{fb}}$$

donde el intervalo medio entre errores en ráfaga, E_{fb} , puede obtenerse:

$$E_{fb} = \left(\frac{1}{2 P_e} - 1 \right) L_b \simeq L_b / 2 P_e$$

y L_b : longitud media de un error en ráfaga.

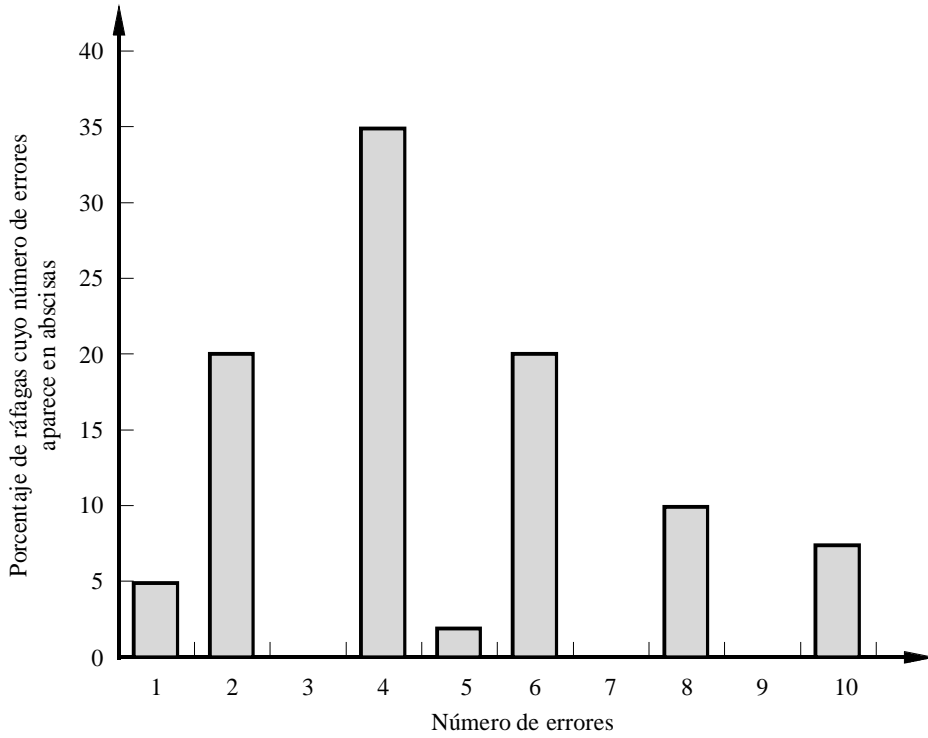
Otro efecto que debe considerarse es la dependencia de la estructura de los errores en ráfaga respecto de la multiplexación de los canales de 64 kbit/s a velocidades primarias (2048 kbit/s) o superiores; en las figs. 12a y 12b aparece ilustrado este concepto, para una BER de 10^{-6} . La fig. 12a muestra un histograma del número de errores por ráfaga en el caso de una señal compuesta de 1920 kbit/s (30 intervalos de tiempo) en un tren de 2048 bits multiplexado de acuerdo con la Recomendación UIT-T G.704. Sin embargo, en un canal de 64 kbit/s, el número de errores por ráfaga tiende a ser más reducido, como puede observarse en la fig. 12b.

5.2.3 Codificación convolucional-decodificación secuencial

La decodificación secuencial es un algoritmo de decodificación probabilista en el cual el cálculo de la métrica del trayecto se lleva a cabo únicamente para un trayecto que ya haya sido examinado. La decisión acerca del trayecto que debe extenderse sólo se basa en la métrica de los trayectos ya examinados.

FIGURA 12a

Histograma del número de errores por ráfaga



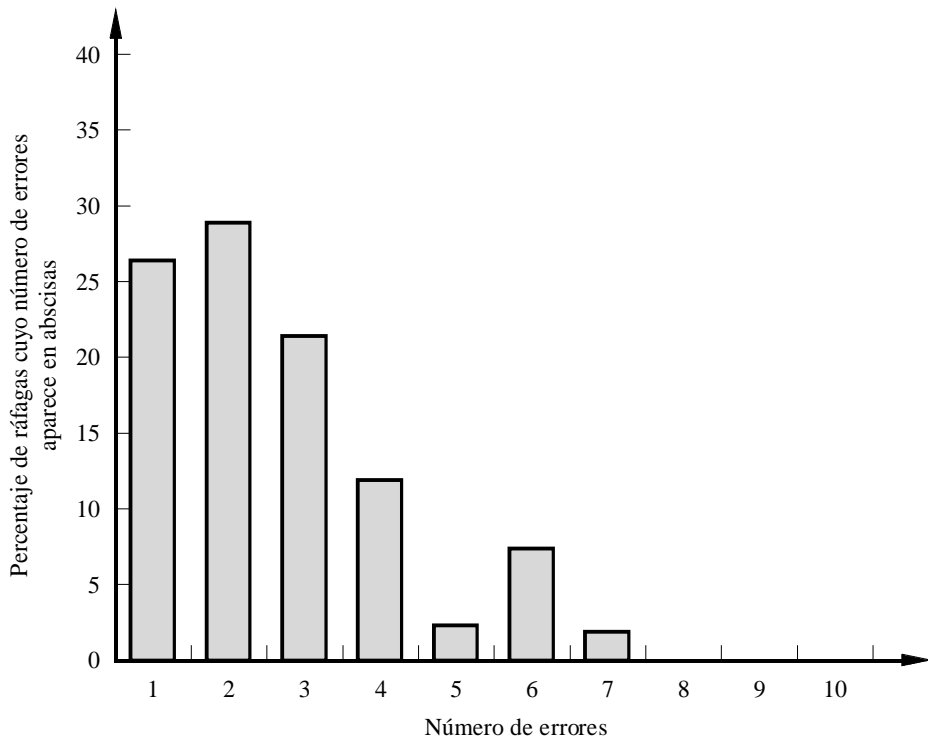
BER = 10^{-6}

FEC (Relación 1/2) aplicada a una velocidad binaria de 2 048 kbit/s

D14

FIGURA 12b

Histograma del número de errores por ráfaga en un canal de 64 kbit/s incorporado a un multiplex de velocidad primaria de 2 048 kbit/s (Recomendación UIT-T G.704)



BER = 10^{-6}

FEC (Relación 1/2) aplicada a una velocidad primaria de 2 048 kbit/s

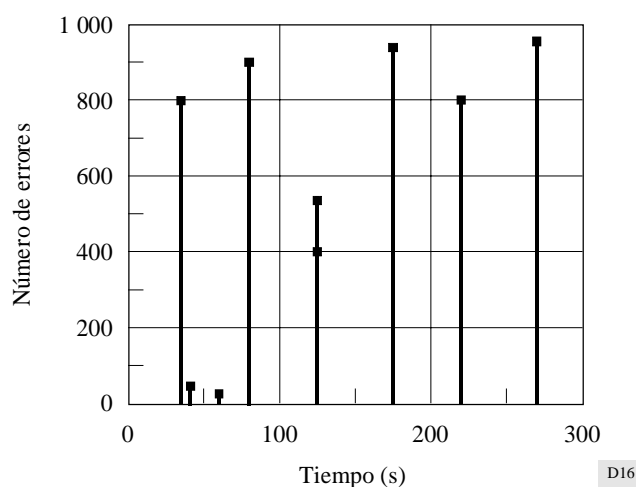
D15

A diferencia de la decodificación Viterbi, en la cual la complejidad de los cálculos aumenta de manera exponencial con la longitud impuesta, la decodificación secuencial permite una mayor duración impuesta, gracias a la cual la BER mejoraría considerablemente. Ello se explica porque en un código convolucional, la BER disminuye de manera exponencial con la longitud impuesta.

Entre los diversos tipos de algoritmos de decodificación secuencial utilizados corrientemente destacan el algoritmo Fano y el algoritmo de pila. Este punto trata del segundo de esos dos algoritmos. Los errores en la salida del decodificador obedecen principalmente al desbordamiento de la memoria intermedia de pila y/o a un exceso del tiempo de decodificación.

La fig. 13 contiene un ejemplo de la distribución de errores en la BER decodificada de aproximadamente 3×10^{-4} para un decodificador secuencial con relación 1/2 funcionando el algoritmo de grupo stack a una velocidad de datos de 64 kbit/s. Puede advertirse que la salida de decodificador incluye cierto número de largas ráfagas de errores, cada una de las cuales excede con mucho los 65 bits, y pequeños errores aleatorios entre ráfagas de errores prolongadas.

FIGURA 13
Distribución de errores en la salida del decodificador secuencial



5.3 Efectos de los minutos degradados, segundos con muchos errores y segundos con error

5.3.1 Análisis cualitativo

Los efectos de los errores en ráfagas causados por la codificación FEC convolucional son los siguientes:

Minutos degradados (DM)

Un minuto degradado (DM) incluye cinco errores o más. En el caso de decodificación Viterbi de relación 3/4, que a menudo produce errores en ráfagas con cinco errores o más, la probabilidad de Dm puede aumentar ligeramente comparada con los errores aleatorios, incluso con la misma proporción media de errores. En el caso de decodificación de Viterbi de relación 1/2, este aumento pudiera ser mucho menor.

Segundos con muchos errores (SES)

Un segundo con muchos errores (SES) incluye 65 errores o más. Debido a que el número de errores en una ráfaga con errores producidos por dicha FEC es menor de 65, un SES incluirá varias decenas de errores en ráfaga. Como resultado de esto, puede no haber ninguna diferencia significativa en la probabilidad de SES entre ráfagas y errores aleatorios.

Segundos con error (ES)

Cuando los conjuntos de errores ocurren como en el caso de canal con FEC, la probabilidad de ES disminuirá en comparación con los errores aleatorios con la misma proporción media de errores.

La influencia de los errores en ráfaga será menor debido al hecho de que la mayoría de los enlaces por satélite multiplexan muchos canales y a que los errores en ráfaga se dispersan sobre todos los canales multiplexados.

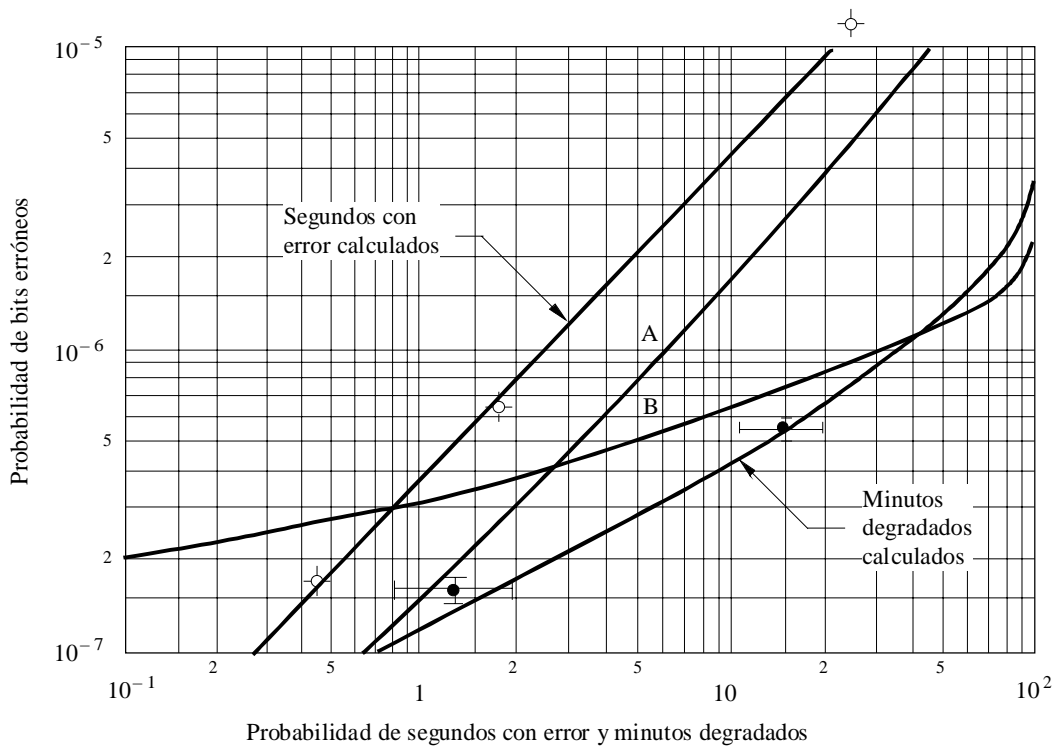
5.3.2 Mediciones

5.3.2.1 Codificación BCH

Se han realizado mediciones en un terminal de tráfico AMDT a 120 Mbit/s de EUTELSAT explotado en el modo ráfagas, con bucle en FI donde se añadió ruido. Una secuencia pseudoaleatoria de 64 kbit/s fue generada por un analizador de BER y se midió el porcentaje de segundos con error, minutos degradados y segundos con muchos errores, de conformidad con la Recomendación UIT-T G.821.

Las mediciones se realizaron para los dos intervalos de tiempo asociados con los casos a) y d) del § 5.2.1 y pudo observarse una desviación evidente con respecto a la ley de Poisson para las estadísticas de segundos con error y minutos degradados (fig. 14).

FIGURA 14
Estadísticas de segundos con error y minutos degradados a 64 kbit/s



- ⊕ Segundos con error medidos (BCH relación 7/8) e intervalos de confianza
 - ⊙ Minutos degradados medidos (BCH relación 7/8) e intervalos de confianza
- } Intervalo de tiempo (a)

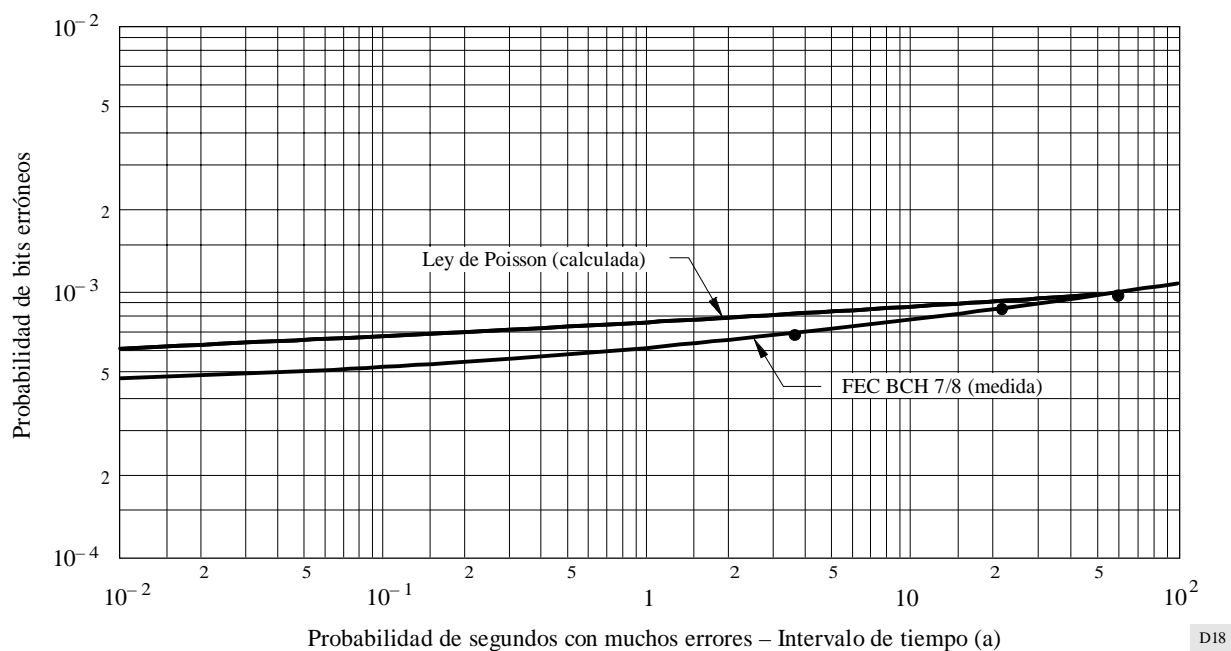
Curvas A: Segundos con error, ley de Poisson
B: Minutos degradados, ley de Poisson

D17

En lo que se refiere a los segundos con muchos errores, pudo observarse un desplazamiento marginal de los pequeños porcentajes de tiempo en la distribución cuando se utiliza la FEC (fig. 15). Este desplazamiento es, no obstante, bastante pequeño y no muy significativo cuando se considera la uniformidad de la distribución, aun cuando los intervalos de confianza calculados demuestran que se ha producido un desplazamiento real.

Estas mediciones concuerdan con la predicción teórica explicada en el § 5.4.2.

FIGURA 15
Probabilidad de segundos con muchos errores



D18

5.3.2.2 Codificación convolucional-decodificación de Viterbi

Se han efectuado mediciones similares para el caso de codificación convolucional y decodificación de Viterbi, como se muestra en las figs. 16 a 19. Pueden observarse los resultados obtenidos para relaciones de 1/2 y 3/4 a 64 kbit/s y para la relación 3/4 en un canal de 64 kbit/s de un tren de 2 048 kbit/s.

5.3.2.3 Codificación convolucional-decodificación secuencial

Los cuadrados de la fig. 18 indican ES y DM para el decodificador secuencial en un canal con ruido gaussiano blanco aditivo. Se advierte que la calidad de funcionamiento ES del decodificador secuencial es mejor que la de un sistema no codificado y que los resultados son gráficamente paralelos a los de este último sistema. La calidad de funcionamiento DM, sin embargo, es muy diferente de la de un sistema no codificado, pero similar a la del sistema utilizado para la decodificación Viterbi.

Tanto la calidad de funcionamiento ES como DM de un decodificador secuencial son mejores que las de un decodificador Viterbi. Ello se explica porque, según se indica en el § 2.3, para la misma BER media, el decodificador secuencial introduce ráfagas de errores más prolongadas que la decodificación Viterbi, los cuales pueden ser fácilmente superiores a centenares de bits, así como ráfagas cortas de errores aleatorios entre las ráfagas de errores largas.

Así pues, el porcentaje de ES del decodificador secuencial es mejor que el de la decodificación Viterbi; esta última introduce cierto número de errores aleatorios, así como breves ráfagas de errores. Además, dado que la definición DM excluye los eventos SES, la calidad de funcionamiento DM del decodificador secuencial es superior a la de la decodificación Viterbi.

Los corchetes de la fig. 19 indican la calidad de funcionamiento SES para el decodificador secuencial. En el caso de BER bajas a moderadas, el porcentaje de SES del decodificador potencial disminuye gradualmente y es inferior al correspondiente a la decodificación Viterbi. Esto se debe a que el decodificador secuencial, en general, introduce varias ráfagas de errores de más de 65 bits.

FIGURA 16

Porcentaje de minutos degradados para un canal de 64 kbit/s multiplexado (Rec. UIT-T G.704) en un tren binario de 2 048 kbit/s (FEC de relación 3/4, aleatorizador con autosincronismo de acuerdo con la especificación IDR de INTELSAT)

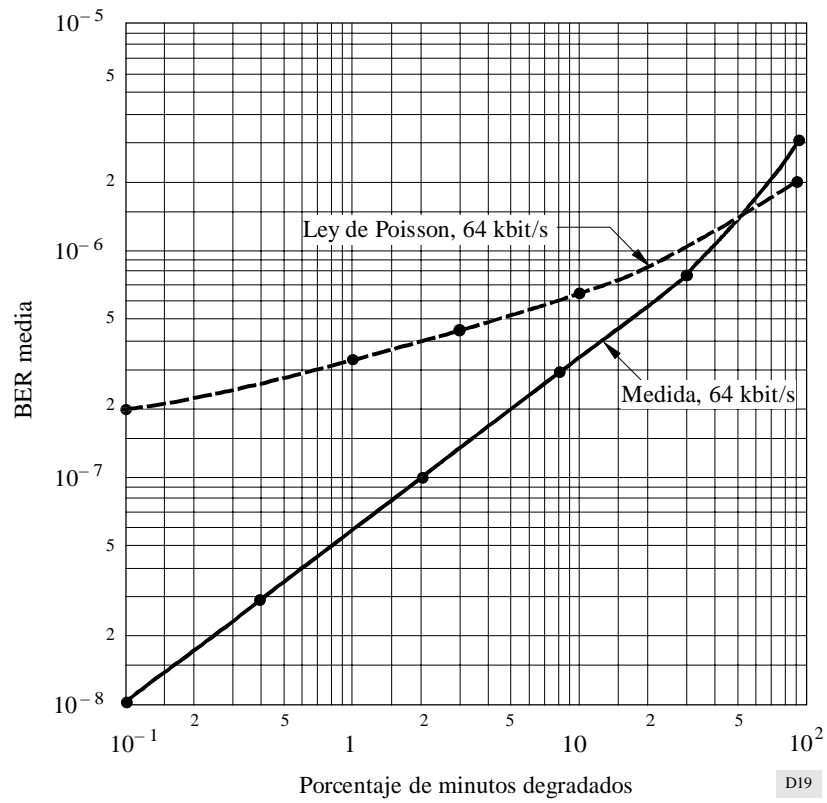
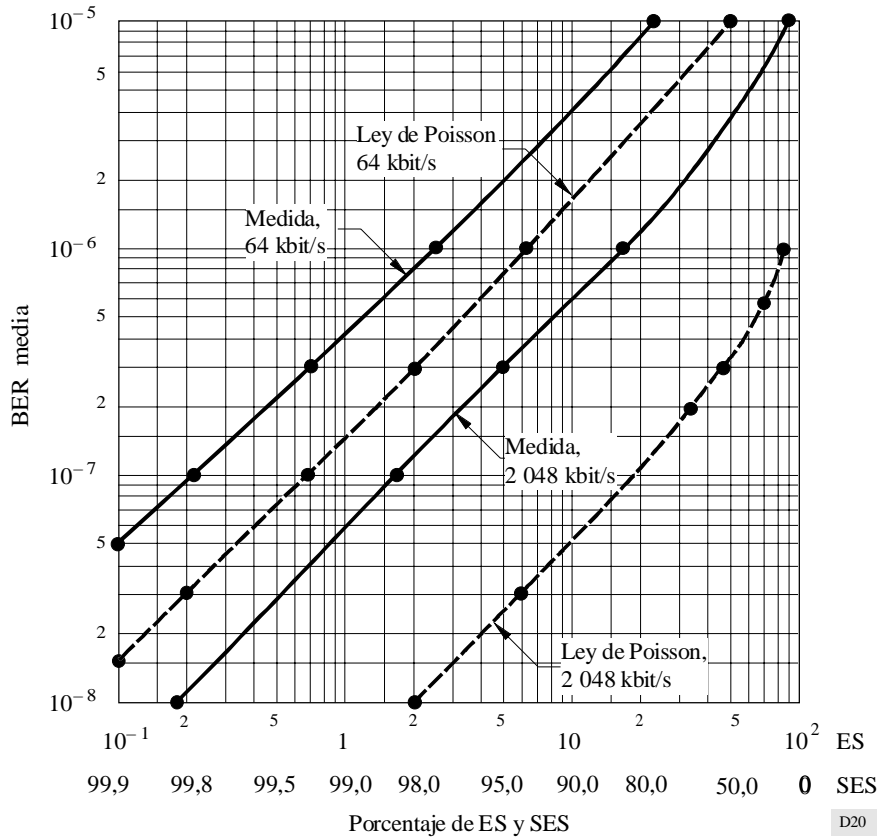


FIGURA 17

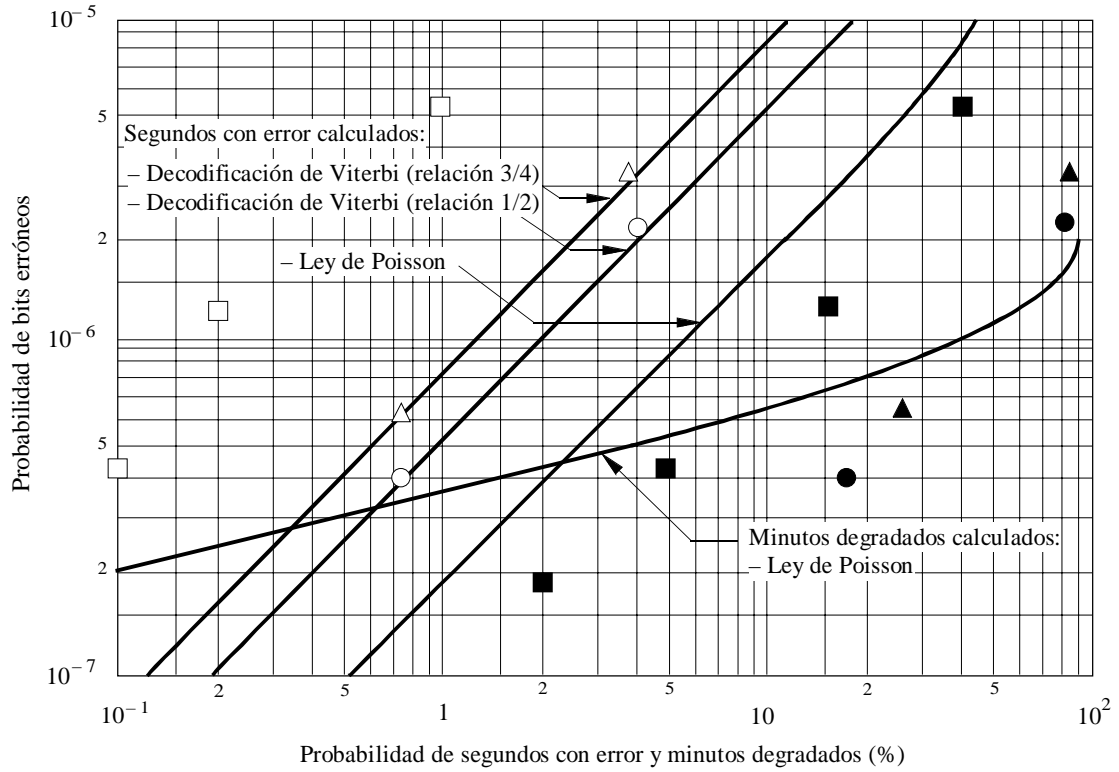
Porcentaje de segundos con error y segundos sin error en un canal de 64 kbit/s multiplexado en un tren de 2 048 kbit/s (Rec. UIT-T G.704) y para un tren de 2 048 kbit/s (FEC de relación 3/4, aleatorizador con autosincronismo de acuerdo con la especificación IDR de INTELSAT)



D20

FIGURA 18

Estadísticas de segundos con error y minutos degradados para un tren binario a 64 kbit/s
(sin aleatorización de datos ni codificación diferencial)



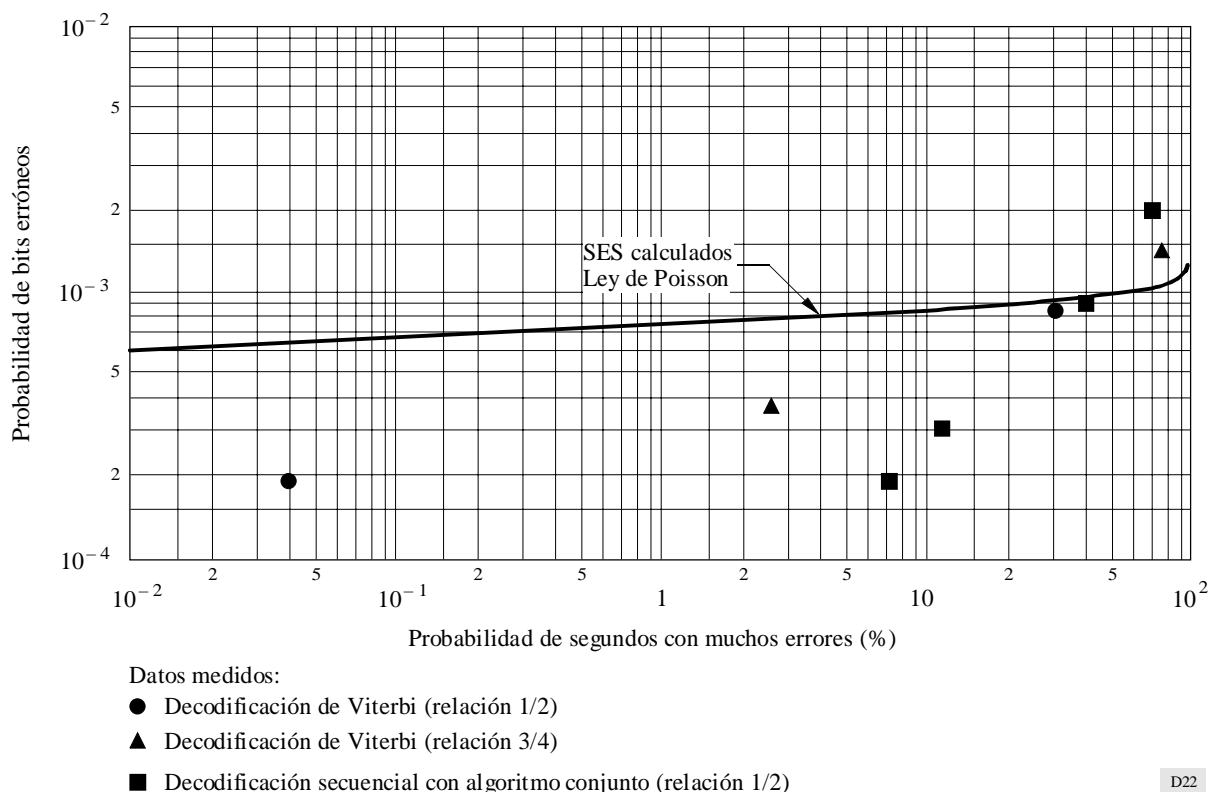
Datos medidos (segundos con error):

- Decodificación de Viterbi (relación 1/2)
- △ Decodificación de Viterbi (relación 3/4)
- Decodificación secuencial con algoritmo conjunto (relación 1/2)

Datos medidos (minutos degradados):

- Decodificación de Viterbi (relación 1/2)
- ▲ Decodificación de Viterbi (relación 3/4)
- Decodificación secuencial con algoritmo conjunto (relación 1/2)

FIGURA 19
 Probabilidad de segundos con muchos errores (SES) para un tren binario a 64 kbit/s



5.3.3 *Análisis cuantitativo*

En la fig. 20 aparece la probabilidad de minutos degradados en función de la PBE para tres casos distintos de distribución de error denominados α , β_m y β_w . El caso α es el caso aleatorio considerado en este anexo. En los casos β_m y β_w se supone que los errores se encuentran agrupados pero las ráfagas de errores aparecen de forma aleatoria. El caso β_m («m» de moderado) hace la suposición de que aparecen sistemáticamente tres errores por ráfaga. El caso β_w («w» de «worst», más desfavorable) supone que aparecen de forma sistemática cinco errores por ráfaga. Al pie de la figura se indican las fórmulas utilizadas para el cálculo de las curvas. De hecho, a las ráfagas se les aplica las fórmulas de Poisson.

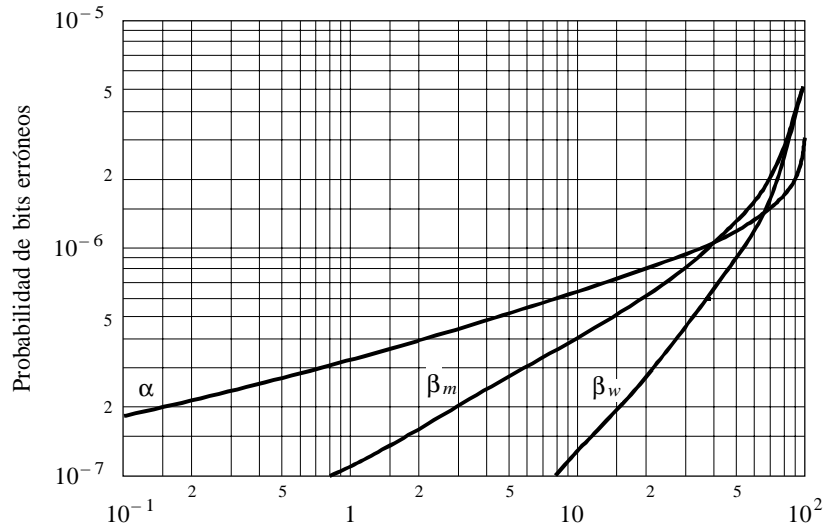
En la zona de baja PBE, la probabilidad de minutos degradados aumenta a medida que lo hace la característica de ráfaga. Además, si las ráfagas presentan sistemáticamente más de cinco errores cada una, cualquier minuto que reciba una ráfaga se considera degradado de la misma forma que si hubiese sólo cinco errores. Pero si hay más errores por ráfaga, éstas se encontrarán más separadas y aparecerán más minutos sin ráfagas. Por consiguiente, β_w es la distribución en el caso más desfavorable por lo que respecta a este parámetro .

Si las distribuciones de error de las figs. 10a) y 10b) (para BER = 10^{-5}) son aproximadamente uniformes y las apariciones de ráfagas con errores se consideran sucesos independientes, es posible calcular la característica de minutos degradados y de segundos sin error.

En el cuadro 6 se resumen los resultados de los cálculos, incluido el caso de errores dobles, que es típico en los sistemas con codificación diferencial. Los cálculos se han realizado suponiendo que desde el punto de vista de la BER, las características del circuito se ajustan a las del modelo d) de la fig. 3. Los valores que aparecen en el cuadro 6 muestran que las ráfagas de errores pueden afectar de forma significativa las características de un circuito digital en lo que se refiere a los requisitos de la Recomendación UIT-T G.821. Sin embargo, en este análisis no se ha considerado el efecto de la estructura múltiplex. Se necesitan nuevos estudios a este respecto. Según los resultados de tales estudios, deberá tenerse especial cuidado al diseñar sistemas que utilizan FEC para cumplir los objetivos de DM.

FIGURA 20

Probabilidad de minutos degradados (DM) suponiendo una probabilidad de bits erróneos constante



Probabilidad de que aparezcan 5 o más errores en 384×10^4 bits
(es decir, probabilidad de minutos degradados a 64 kbit/s) (%)

Caso α : Canal con errores aleatorios

$$P(DM) = 1 - \left[1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} \right] e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P$$

Caso β_m : Canal con una característica de ráfaga moderada (3 errores por ráfaga)

$$P(DM) = 1 - (1 + x) e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P/3$$

Caso β_w : Canal con una característica de ráfaga del caso más desfavorable (5 errores por ráfaga)

$$P(DM) = 1 - e^{-x} \quad x = 384 \cdot 10^4 P/5$$

donde:

P : probabilidad de bits erróneos

$P(DM)$: probabilidad de minutos degradados

D23

CUADRO 6

Objetivo	Características (porcentaje de tiempo disponible)				
	Rec. UIT-T G.821	Errores sencillos	Errores dobles	Ráfagas de errores (codificación de relación 1/2)	Ráfagas de errores (codificación de relación 3/4)
Minutos degradados	2,0	1,87	2,67	6,2	6,7
Segundos con error	1,6	1,56	1,4	1,2	1,16

5.4 Simulación matemática

Para demostrar que un sistema particular cumple los requisitos de la Recomendación UIT-T G.821 es necesario conocer:

- las estadísticas de la PBE con porcentaje de tiempo;
- el modelo matemático mediante el cual se calculan los ES, DM y SES, para describir la distribución de errores en la etapa a 64 kbit/s teniendo en cuenta el tipo de FEC aplicado y el método de multiplexación utilizado.

Se han estudiado los dos modelos que figuran a continuación.

5.4.1 Distribución contagiosa de Neyman-A

Un modelo estadístico que puede utilizarse para describir la agrupación de sucesos probabilísticos es la distribución contagiosa de Neyman-A. En particular, esta distribución puede describir la característica de ráfaga de la aparición de errores debidos a los efectos de propagación y de interferencia en los sistemas de transmisión digital por satélite. La aplicación de este modelo asegura que las ráfagas con errores son independientes, es decir, aparecen de forma aleatoria y su duración también es aleatoria (aunque los errores en algunos esquemas FEC llegan típicamente en ráfagas de 3 ó 4 a la salida del decodificador, es necesario evaluar el promedio real de errores en un canal demultiplexado específico a partir del conocimiento del sistema).

El modelo contagioso de Neyman-A viene dado por:

$$P(n) = \frac{(PBE/A)^n}{n!} e^{-NA} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k^n}{k!} (NA)^k e^{-kPBE/A}$$

donde:

$P(n)$: probabilidad de que se produzcan n errores en N bits transmitidos

NA : número medio de ráfagas

PBE/A : valor medio de errores por ráfaga.

De este modo, puede determinarse la probabilidad de segundos sin error y minutos degradados, respectivamente por:

$$P(0) = e^{-NA} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(NA)^k}{k!} e^{-kPBE/A} \quad \text{con } N = 64 \text{ kbits}$$

$$P(DM) = 1 - \sum_{n=0}^4 P(n) \quad \text{con } N = 3,84 \text{ Mbits}$$

5.4.2 Representación analítica para un código BCH

Cuando se conoce el sistema de transmisión (tipo de FEC utilizado, esquema de multiplexación, etc.), pueden deducirse fórmulas analíticas en lugar de mediciones para predecir las estadísticas de los parámetros ES, DM y SES con PBE.

Pueden obtenerse expresiones analíticas y podrán obtenerse predicciones exactas en el caso de FEC BCH 7/8 utilizado en los sistemas de AMDT a 120 Mbit/s de INTELSAT y EUTELSAT (véase el cuadro 7).

CUADRO 7

Resumen de las fórmulas empleadas para calcular los porcentajes de segundos con error (ES), minutos degradados (DM) y segundos con muchos errores (SES)

BCH 7/8

Porcentaje ES	$P = 100 \times \{(1 - e^{-L})\} \times u$ $L = \text{PBE} \times 42\,333,3$ $u = 0,667 \quad \text{Para el caso a)}$ $u = 0,881 \quad \text{Para el caso d)}$
Porcentaje DM	$P = 100 \times \{1 - (1 + L + L^2/2! \times (1 - u_2) + L^3/3! \times (1 - u_3) + L^4/4! \times (1 - u_4)) \times e^{-L}\}$ $L = \text{PBE} \times 2,54 \times 10^6$ $u_2 = 0,227 \quad u_3 = 0,506 \quad u_4 = 0,702 \quad \text{Para el caso a)}$ $u_2 = 0,111 \quad u_3 = 0,510 \quad u_4 = 0,713 \quad \text{Para el caso d)}$
Porcentaje SES	$P = 100 \times \{1 - (1 + L + L^2/2! + \dots + L^{38}/38!) \times e^{-L}\}$ $L = \text{PBE} \times 42\,333,3$

5.5 Repercusiones en el diseño de sistemas que funcionan en la banda 14/11 GHz

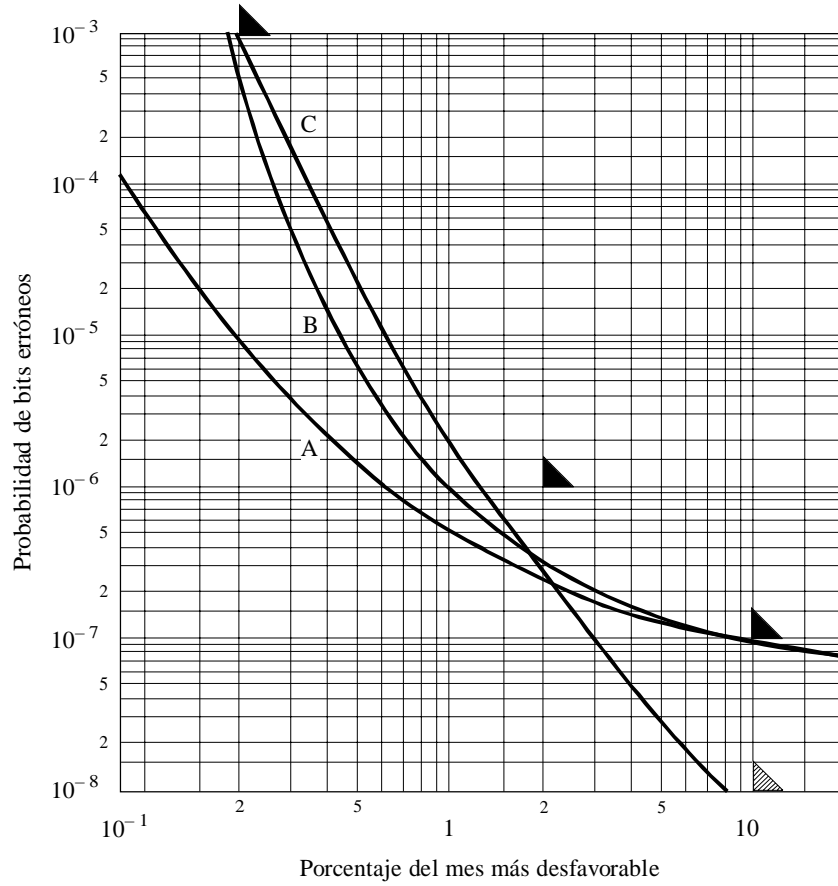
Para los sistemas en las bandas 14/11 GHz que funcionan en zonas climáticas europeas, el criterio limitativo de los valores especificados en la Recomendación UIT-R S.614 en el caso de un enlace por satélite no codificado es la PBE «a largo plazo». Ello es debido a que la diferencia del valor C/N necesario a la entrada del demodulador de la estación terrena para lograr unas PBE de 10^{-7} y 10^{-3} es mayor que la diferencia en los niveles de desvanecimiento correspondientes entre el 10% y el 0,2% del mes más desfavorable (total).

En la fig. 21 (curvas A y B) puede apreciarse el comportamiento de un sistema que funciona en la banda de 14/11 GHz y cuyas características son tales que se cumple exactamente el criterio a largo plazo de 10^{-7} . Las curvas A y B se refieren al comportamiento en términos de porcentajes de tiempo cuando se puede aplicar al sistema las estadísticas de propagación típicas de un clima costero europeo (curva A) y de un clima alpino-mediterráneo (curva B).

En caso de utilizar FEC la situación requiere un análisis más detallado. Por un lado, la diferencia de los valores de $(C/N + I)$ necesarios a la entrada del demodulador para los dos niveles de BER es inferior al del caso en que no existe codificación debido a la ganancia de codificación, lo que tiende a limitar el diseño de los requisitos a corto plazo; por otro lado, durante el 10% del mes más desfavorable se necesita un comportamiento mejor que el de una BER de 10^{-7} para compensar el carácter de ráfagas de la aparición de errores, lo que exige unos requisitos de comportamiento muy rigurosos en condiciones de cielo despejado.

En las figs. 21 y 22, aparece ilustrado lo dicho hasta ahora: la fig. 21 (curva C) muestra el comportamiento de un enlace por satélite con el código de bloque BCH 7/8 y la fig. 22 (curvas A y B), el comportamiento de un enlace con codificación convolucional y FEC de relación 1/2 y 3/4 respectivamente, cuando el sistema ha sido dimensionado para cumplir exactamente el criterio a corto plazo con estadísticas de propagación del clima alpino-mediterráneo, que es el caso más desfavorable para Europa.

FIGURA 21
 Características de un sistema que funciona en las bandas 14/11 GHz
 diseñado para cumplir exactamente los objetivos
 de esta Recomendación

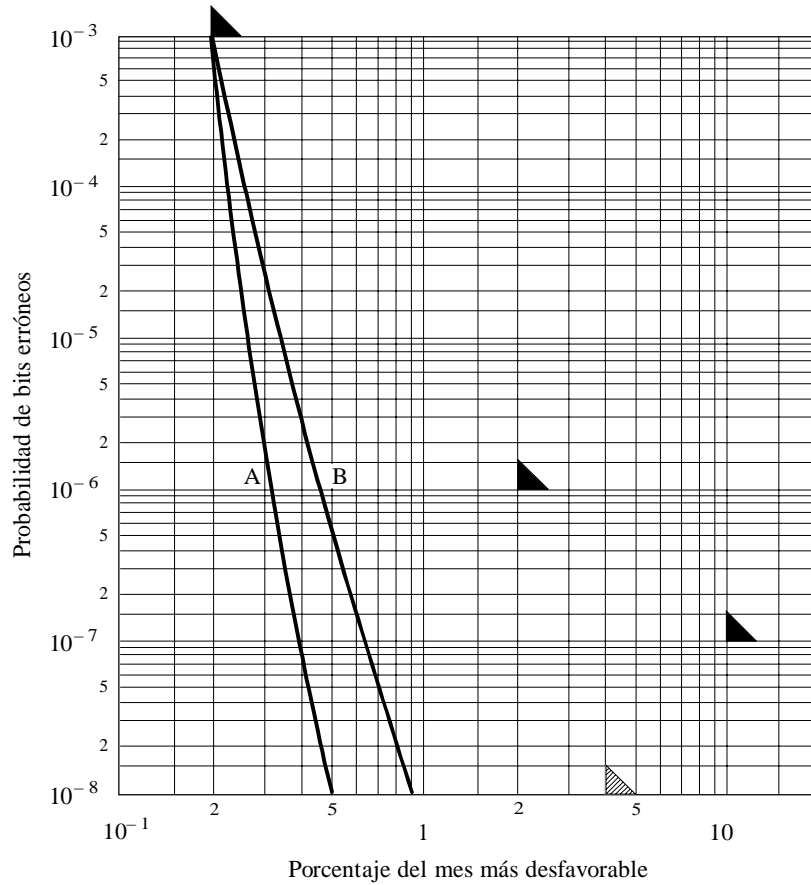


▲ Valores recomendados en esta Recomendación

▨ Código BCH

Curvas A: Sin FEC Clima costero europeo
 B: Sin FEC Clima alpino-mediterráneo
 C: FEC BCH 7/8 Clima alpino-mediterráneo

FIGURA 22
 Características de un sistema que funciona en las bandas 14/11 GHz
 diseñado para cumplir exactamente los objetivos
 de esta Recomendación



▲ Valores recomendados en esta Recomendación

▨ Codificación convolucional

Curvas A: FEC convolucional de relación 1/2 Clima alpino-mediterráneo
 B: FEC convolucional de relación 3/4 Clima alpino-mediterráneo

5.6 Conclusiones

En este punto se han examinado las características de la distribución de errores en los sistemas de comunicaciones por satélites que emplean diversos tipos de FEC y se han analizado sus efectos sobre los minutos degradados (DM), segundos con muchos errores (SES) y segundos con errores (ES) utilizados para definir la Recomendación UIT-T G.821.

- La FEC, tanto la codificación de bloques como la codificación convolucional, produce una distribución de errores en ráfagas.
 - La probabilidad de DM en sistemas con FEC puede ser ligeramente superior que en sistemas sin FEC con una BER media equivalente.
 - No habrá una diferencia sustancial en la probabilidad de que ocurran SES en función de que se utilice o no FEC, para la misma BER.
 - La probabilidad de ES será menor en sistemas con FEC que en sistemas sin ella, para la misma BER.
 - La influencia de los errores en ráfagas puede disminuir cuando el enlace por satélite multiplexe un cierto número de canales.
 - La distribución de errores puede simularse matemáticamente mediante el desarrollo de la distribución de Poisson. Este punto requiere ulterior estudio.
-