



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

**UIT-T**

SECTOR DE NORMALIZACIÓN  
DE LAS TELECOMUNICACIONES  
DE LA UIT

**G.975**

(10/2000)

SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN,  
SISTEMAS Y REDES DIGITALES

Secciones digitales y sistemas digitales de línea –  
Sistemas en cables submarinos de fibra óptica

---

**Corrección de errores en recepción para  
sistemas submarinos**

Recomendación UIT-T G.975

(Anteriormente Recomendación del CCITT)

---

RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE G  
**SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES**

CONEXIONES Y CIRCUITOS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES	G.100–G.199
CARACTERÍSTICAS GENERALES COMUNES A TODOS LOS SISTEMAS ANALÓGICOS DE PORTADORAS	G.200–G.299
CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES DE PORTADORAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.300–G.399
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS TELEFÓNICOS INTERNACIONALES EN RADIOENLACES O POR SATÉLITE E INTERCONEXIÓN CON LOS SISTEMAS EN LÍNEAS METÁLICAS	G.400–G.449
COORDINACIÓN DE LA RADIOTELEFONÍA Y LA TELEFONÍA EN LÍNEA	G.450–G.499
EQUIPOS DE PRUEBAS	G.500–G.599
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.600–G.699
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.700–G.799
REDES DIGITALES	G.800–G.899
SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DIGITALES DE LÍNEA	G.900–G.999
Generalidades	G.900–G.909
Parámetros para sistemas en cables de fibra óptica	G.910–G.919
Secciones digitales a velocidades binarias jerárquicas basadas en una velocidad de 2048 kbit/s	G.920–G.929
Sistemas digitales de transmisión en línea por cable a velocidades binarias no jerárquicas	G.930–G.939
Sistemas de línea digital proporcionados por soportes de transmisión MDF	G.940–G.949
Sistemas de línea digital	G.950–G.959
Sección digital y sistemas de transmisión digital para el acceso del cliente a la RDSI	G.960–G.969
<b>Sistemas en cables submarinos de fibra óptica</b>	<b>G.970–G.979</b>
Sistemas de línea óptica para redes de acceso y redes locales	G.980–G.989
Redes de acceso	G.990–G.999

*Para más información, véase la Lista de Recomendaciones del UIT-T.*

## **Recomendación UIT-T G.975**

### **Corrección de errores en recepción para sistemas submarinos**

#### **Resumen**

Esta Recomendación se refiere principalmente a la implementación de la función de corrección de errores en recepción (FEC) en los sistemas de cable submarino de fibra óptica que funcionan en frecuencia de gigabits por segundo. Las aplicaciones que se abordan en esta Recomendación son las de los sistemas con repetidor de amplificación óptica y los sistemas ópticos sin repetidor (que se describen en UIT-T G.973 [3]). La utilización de la función FEC en los equipos terminales de transmisión submarina no es obligatoria.

#### **Orígenes**

La Recomendación UIT-T G.975, revisada por la Comisión de Estudio 15 (1997-2000) del UIT-T, fue aprobada por la Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (Montreal, 27 de septiembre – 6 de octubre de 2000).

## PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

## NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

## PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB.

© UIT 2001

Es propiedad. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o utilizarse, de ninguna forma o por ningún medio, sea éste electrónico o mecánico, de fotocopia o de microfilm, sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

## ÍNDICE

### Página

1	Alcance .....	1
2	Referencias.....	1
3	Términos y definiciones.....	1
4	Abreviaturas.....	2
5	Aspectos de la FEC.....	2
5.1	Principios generales de la función FEC.....	2
5.2	Capacidad de comprobación de errores.....	3
5.3	Interés de la función FEC para los sistemas submarinos.....	4
5.4	Canales entre terminales.....	4
6	Definición de la función FEC.....	4
6.1	Definiciones.....	4
6.2	Algoritmo de corrección de errores en recepción.....	4
6.3	Propiedades del código RS(255,239).....	5
6.4	Estructura de la trama FEC.....	5
6.4.1	Arquitecturas de codificador FEC y de decodificador FEC.....	5
6.4.2	Estructura de trama.....	8
6.4.3	Aleatorización.....	8
6.4.4	Relación de redundancia.....	8
7	Calidad de la función FEC.....	9
7.1	Calidad teórica de la función FEC.....	9
7.2	Ganancia de codificación.....	10
	Apéndice I – Estructura de la trama FEC (opcional).....	11
I.1	Arquitectura del codificador y del decodificador FEC.....	11
I.2	Estructura de alineación de la trama.....	14
I.3	Codificación.....	15
I.4	Relación de redundancia.....	15

## Recomendación UIT-T G.975

### Corrección de errores en recepción para sistemas submarinos

#### 1 Alcance

Esta Recomendación se refiere principalmente a la implementación de la función de corrección de errores en recepción (FEC, *forward error correction*) en los sistemas de cable submarino por fibra óptica que funcionan en frecuencias de gigabits por segundo. Las aplicaciones que se abordan en esta Recomendación son las de los sistemas con repetidor de amplificación óptica y los sistemas ópticos sin repetidor (que se describen en UIT-T G.973 [3]). La utilización de la función FEC en los equipos terminales de transmisión submarina (TTE) no es obligatoria.

Esta Recomendación no pretende conseguir la compatibilidad horizontal del sistema. Por consiguiente la selección de las estructuras de trama FEC que en ella se describen es cuestión de ingeniería conjunta.

Las velocidades de transmisión de datos que se consideran en esta Recomendación son 2,5 Gbit/s STM-16 (UIT-T G.707 [1]) y los múltiplos enteros de 2,5 Gbit/s (tributarias STM-16 entrelazadas).

La cláusula 5 presenta los aspectos principales de la función FEC implementada en los sistemas submarinos y, en particular, la facilidad de comprobación de errores.

La cláusula 6 da la definición del algoritmo de corrección de errores en recepción a utilizar que responde a un código Reed-Solomon y las directrices para la implementación de este algoritmo en los equipos terminales de transmisión submarina (TTE, *terminal transmission equipments*).

La cláusula 7 trata de la medición de la calidad de este código Reed-Solomon y de la ganancia prevista en el balance de potencia de transmisión óptica.

#### 2 Referencias

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes.

- [1] UIT-T G.707 (1996), *Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona*.
- [2] UIT-T G.972 (1997), *Definición de términos pertinentes a los sistemas de cable submarino de fibra óptica*.
- [3] UIT-T G.973 (1996), *Características de los sistemas de cable submarino de fibra óptica sin repetidores*.

#### 3 Términos y definiciones

Esta Recomendación utiliza los términos siguientes definidos en otras Recomendaciones:

- Jerarquía digital síncrona (SDH, *synchronous digital hierarchy*): véase UIT-T G.707 [1].
- Módulo de transporte síncrono (STM, *synchronous transport module*): véase UIT-T G.707 [1].

- Sistema de cable submarino de fibra óptica: véase UIT-T G.972 [2].
- Equipo terminal de transmisión (TTE, *terminal transmission equipment*): véase UIT-T G.972 [2].
- Balance de potencia óptica: véase UIT-T G.972 [2].
- Canal de servicio: véase UIT-T G.972 [2].
- Canal de servicio telefónico: véase UIT-T G.972 [2].
- Tasa de errores en la línea: véase UIT-T G.972 [2].
- Corrección de errores en recepción (FEC, *forward error correction*): véase UIT-T G.972 [2].
- Trama FEC: véase UIT-T G.972 [2].
- Codificador FEC: véase UIT-T G.972 [2].
- Decodificador FEC: véase UIT-T G.972 [2].

## 4 Abreviaturas

En esta Recomendación se utilizan las siguientes siglas.

BER	Proporción de bits erróneos ( <i>bit error ratio</i> )
EDFA	Amplificador de fibra dopada con Erblio ( <i>erbium-doped fibre amplifier</i> )
FEC	Corrección de errores en recepción ( <i>forward error correction</i> )
GF	Campo de Galois ( <i>Galois field</i> )
RS	Reed-Solomon

## 5 Aspectos de la FEC

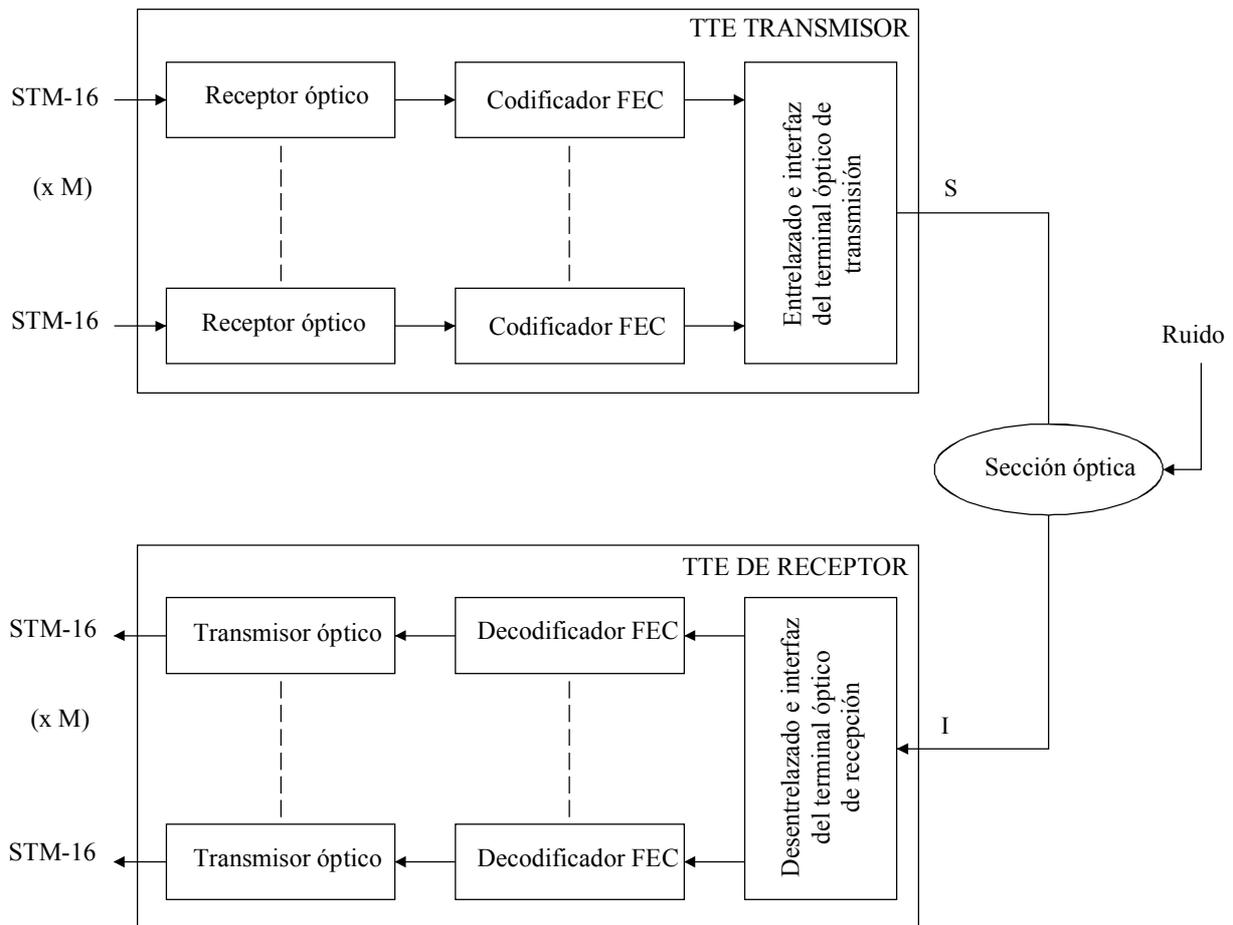
### 5.1 Principios generales de la función FEC

La función FEC definida en esta Recomendación actúa sobre la base del STM-16. Cuando se entrelazan  $M$  señales STM-16 (siendo  $M$  un número entero distinto de 0) para lograr velocidades de transmisión de datos de  $M \times 2,5$  Gbit/s, la codificación se efectúa antes del entrelazado de las  $M$  señales STM-16 afluentes y la decodificación se efectúa después del desentrelazado de la señal de línea óptica.

La función FEC comprende fundamentalmente:

- un codificador FEC en el equipo terminal de transmisión (TTE) que acepta bits de información y añade símbolos redundantes calculados, produciendo datos codificados en velocidades binarias superiores;
- un decodificador FEC en el equipo terminal de transmisión receptor (TTE) que efectúa la corrección de errores al tiempo que extrae la redundancia para regenerar los datos codificados por el codificador FEC.

La figura 1 describe cómo los procedimientos de codificación y de decodificación se efectúan únicamente al nivel del equipo terminal de transmisión (TTE), con señales eléctricas, que aprovechan todo el sistema de cable submarino de fibra óptica compuesto por la propia fibra óptica y posiblemente módulos ópticos tales como amplificadores ópticos que utilizan tecnología EDFA.



T1520650-96

**Figura 1/G.975 – Diagrama de bloques de un sistema submarino que utiliza una función FEC**

## 5.2 Capacidad de comprobación de errores

La implementación de la función FEC permite la comprobación en línea de la tasa de errores binarios de la línea antes de la corrección ( $BER_{\text{entrada}}$ ) conociendo el número exacto de los bits corregidos ( $BER_C$ ). Los errores que quedan sin corregir después de la corrección de errores en recepción ( $BER_{\text{salida}}$ ) (errores restantes cuando el número de errores de línea supera la capacidad del decodificador para corregirlos) pueden considerarse despreciables en el cálculo de la  $BER_{\text{entrada}}$  ( $BER_{\text{entrada}} = BER_C + BER_{\text{salida}} \approx BER_C$ ), para tasas de errores reducidas.

Las condiciones que pueden hacer que esta igualdad sea inexacta ( $BER_{\text{entrada}} > 10^{-3}$ ) harán que el sistema pierda intermitentemente el estado de alineación de trama FEC (para la definición de trama FEC, véase 5.4). De hecho, una tasa de errores binarios de  $10^{-3}$  representa el límite a partir del cual la función FEC es ineficaz.

El código de corrección de errores en recepción indica la evolución de los errores de línea (los valores medibles de la  $BER_{\text{entrada}}$  están comprendidos entre  $10^{-3}$  y  $10^{-15}$ ) al tiempo que evita los fallos del sistema corrigiendo estos errores. En consecuencia, la función FEC puede dar dinámicamente una evaluación de los márgenes del sistema respecto al nivel necesario de calidad. Si se ve que es necesario el mantenimiento de la línea, puede preverse éste antes que se produzca una degradación efectiva de la transmisión.

### 5.3 Interés de la función FEC para los sistemas submarinos

La implementación de una función de corrección de errores en recepción (FEC) en los sistemas de cable submarino de fibra óptica aporta ventajas significativas en el balance total de potencia óptica del enlace y disminuye al mismo tiempo el valor mínimo de la BER de línea del sistema (véase 7.2).

La ganancia resultante en el balance de potencia óptica obtenida con la técnica FEC puede utilizarse seguidamente para mejorar:

- Los parámetros de la línea:  
En las aplicaciones submarinas sin repetidor, la función FEC se utilizará probablemente para aumentar la longitud máxima del salto.  
En las aplicaciones submarinas con amplificación óptica, la función FEC se utilizará probablemente para aumentar las distancias entre repetidores o para relajar las especificaciones de los componentes ópticos de la fibra.
- La calidad global de la comunicación, al protegerla contra condiciones degradadas de explotación no deseadas (fallos de componentes o del cable debidos al envejecimiento, por ejemplo).

En contrapartida, la utilización de la función FEC en los equipos terminales de transmisión submarina (TTE) supone un aumento de la velocidad binaria en la línea.

### 5.4 Canales entre terminales

Teniendo en cuenta que en la composición de la FEC se introduce una estructura de trama (véase 6.4.2), es posible transmitir señales afluentes de marcación para los sistemas que cursan varias señales STM-16 entrelazadas, o transmitir canales de servicio o de servicio telefónico utilizando los bits no utilizados de la estructura de trama.

## 6 Definición de la función FEC

### 6.1 Definiciones

**6.1.1 código de bloque:** Códigos que se caracterizan por el hecho de que el codificador acepta  $K$  símbolos de información de la fuente de información y añade un conjunto de  $R$  símbolos redundantes derivados de los símbolos de información, conforme al algoritmo de codificación.

**6.1.2 código cíclico:** Se dice que un código lineal es cíclico cuando todo desplazamiento cíclico de una palabra de código es asimismo una palabra de código.

**6.1.3 código sistemático:** Con dichos códigos, la palabra de información no se perturba de forma alguna en el codificador y los símbolos redundantes se añaden separadamente a cada bloque.

**6.1.4 palabra de información:** La palabra de información contiene  $K$  símbolos de información.

**6.1.5 palabra de código:** Bloque de  $N$  símbolos que transporta los  $K$  símbolos de información y los  $R$  símbolos redundantes ( $N = K + R$ ).

### 6.2 Algoritmo de corrección de errores en recepción

El código de corrección de errores en recepción utilizado para proteger la información STM-16 contra los errores en línea de los sistemas de cable submarino de fibra óptica es un código Reed-Solomon que ya se especifica en la Recomendación CMTT CCIR 723: el código RS(255,239). Dicho RS es un código no binario (el algoritmo FEC actúa sobre símbolos de 8 bits) y pertenece a la familia de códigos de bloque cíclicos lineales sistemáticos.

El polinomio generador del código viene dado por la expresión:

$$G(z) = \prod_{i=0}^{15} (z - \alpha^i)$$

donde  $\alpha$  es la raíz del polinomio binario primitivo  $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ . Un byte de datos  $(d_7, d_6, \dots, d_1, d_0)$  se identifica con el elemento  $d_7 \cdot \alpha^7 + d_6 \cdot \alpha^6 + \dots + d_1 \cdot \alpha^1 + d_0$  en  $GF(256)$ , el campo finito con 256 elementos.

### 6.3 Propiedades del código RS(255,239)

Ante la amplia variedad de códigos de corrección de errores en recepción, la selección de un código de corrección de errores en recepción particular consiste parcialmente en la adaptación de las características de una técnica de codificación a los objetivos del sistema que se pretenden.

La elección del código Reed-Solomon para los sistemas de cable submarino de fibra óptica viene determinada fundamentalmente por las propiedades siguientes:

- una capacidad importante de corrección de errores respecto a la relación de redundancia aplicada a la palabra de información: el algoritmo RS(255,239) puede corregir hasta 8 símbolos de bytes erróneos en una palabra de código única de longitud 255;
- una complejidad reducida del codificador FEC y del decodificador FEC;
- una estructura de codificación compatible con las transmisiones binarias, si se efectúa una operación de demultiplexación;
- una capacidad importante de corrección de los errores en ráfagas. Esta propiedad intrínseca de los códigos Reed-Solomon se realza incluso por el entrelazado de códecs elementales RS(255,239). Esta técnica, aplicada en los sistemas de cable submarino de fibra óptica que funciona a 2,5 Gbit/s lleva la capacidad de corrección de errores hasta ráfagas de longitud máxima de 1 024 bits para 16 códecs entrelazados.

Además, los códigos Reed-Solomon siguen estando entre los códigos más eficaces que pueden implementarse utilizando los circuitos y la tecnología de soporte lógico más avanzados.

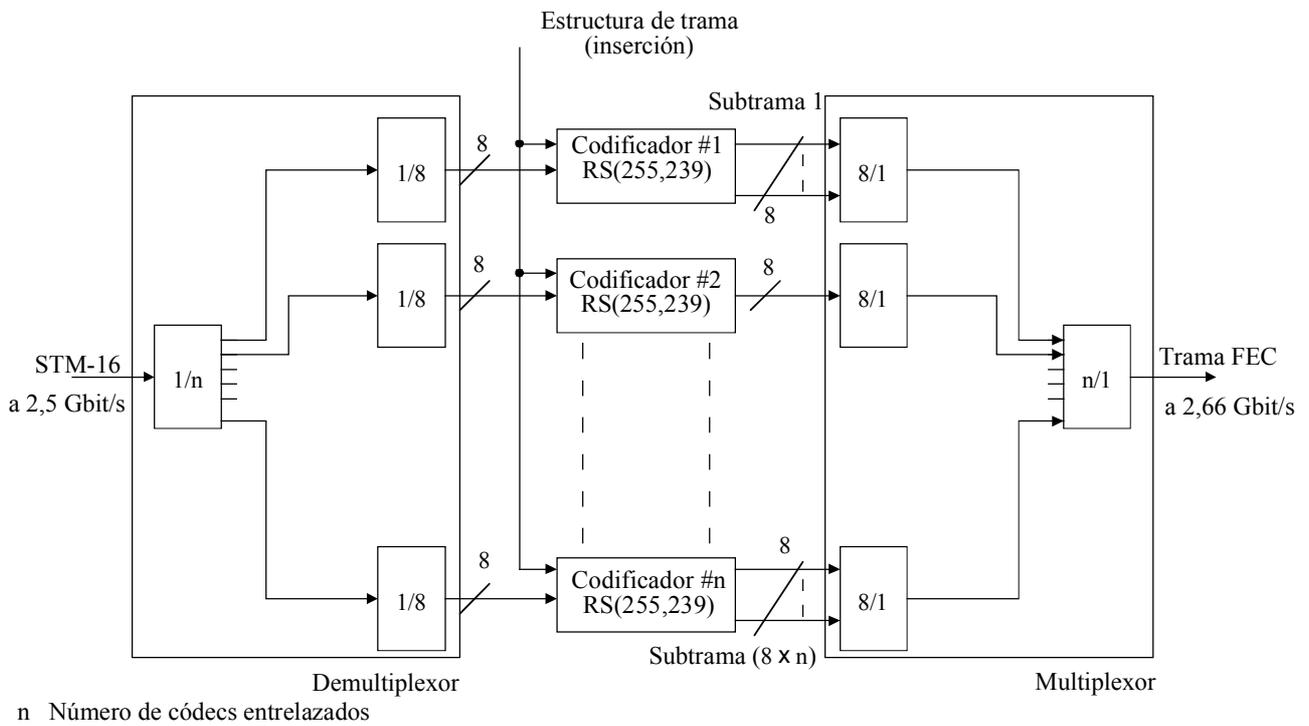
### 6.4 Estructura de la trama FEC

Otra estructura de la trama FEC (opcional) se consigna el apéndice I como información adicional.

#### 6.4.1 Arquitecturas de codificador FEC y de decodificador FEC

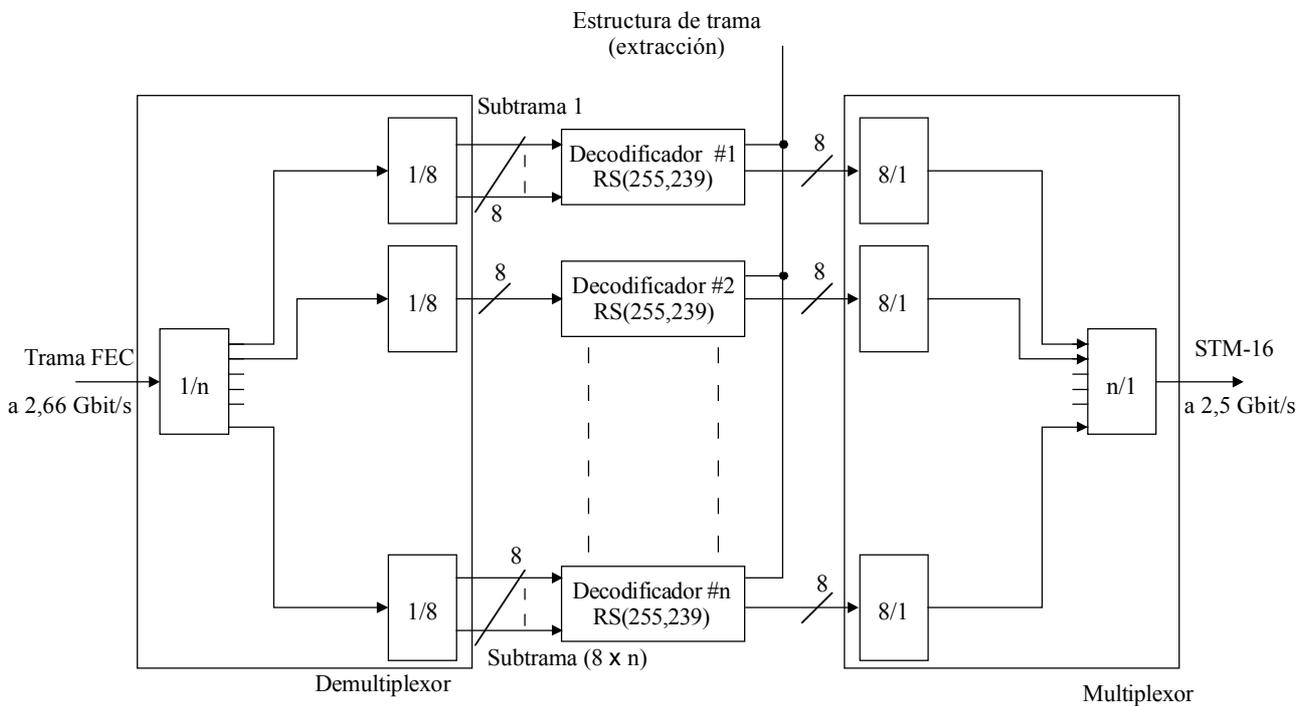
Para mejorar la inmunidad del sistema de cable submarino de fibra óptica a los errores por ráfagas, pueden entrelazarse diversos códigos RS(255,239). En las figuras 2 y 3,  $(n)$  denota el orden de entrelazado ( $n$  es un entero distinto de cero).

Dado el entrelazado de índice " $n$ " de los códigos RS(255,239), las figuras 2 y 3 detallan las arquitecturas del codificador y del decodificador FEC, respectivamente.



T1520660-96

**Figura 2/G.975 – Arquitectura del codificador FEC**



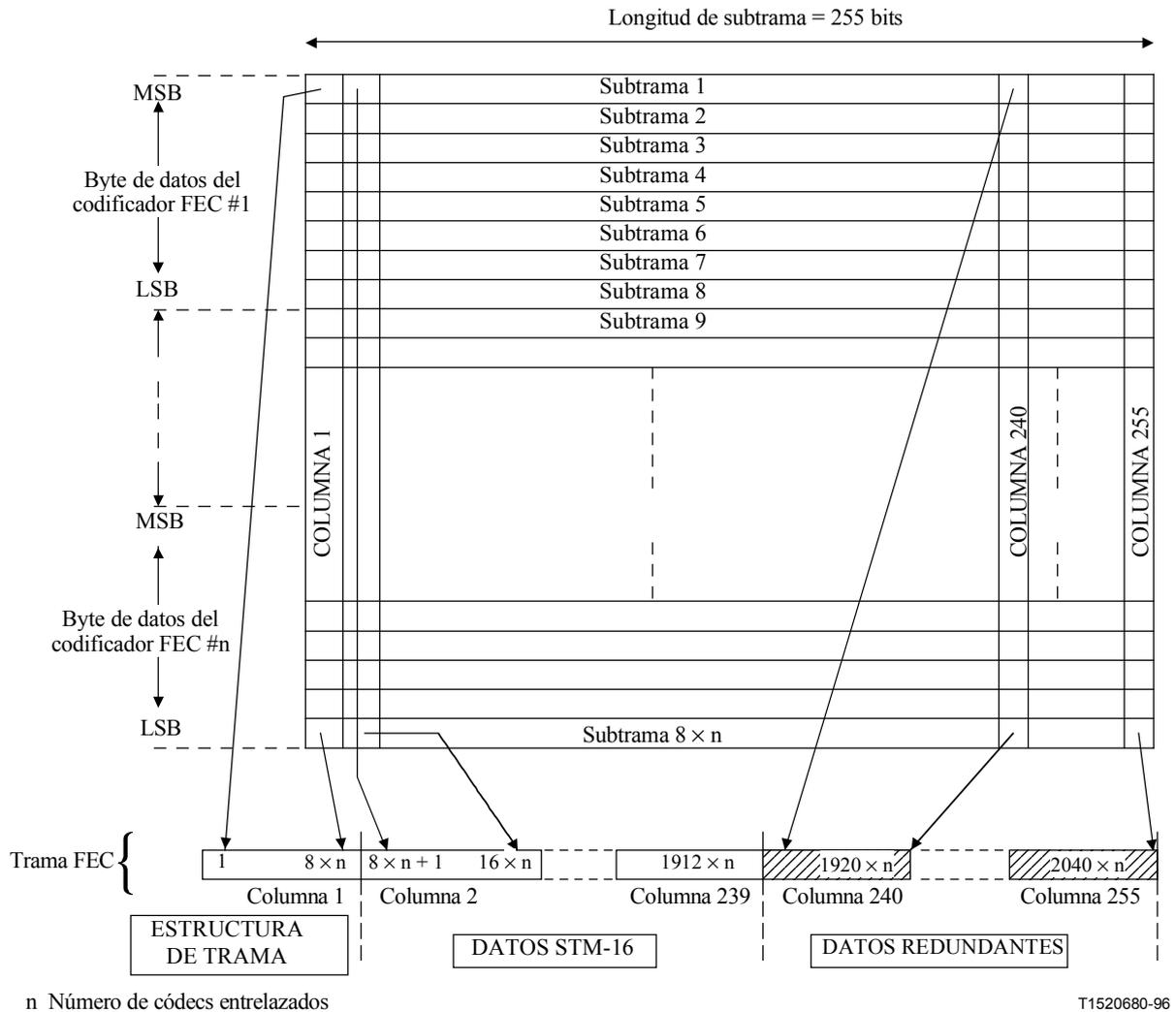
T1520670-96

**Figura 3/G.975 – Arquitectura del decodificador FEC**

Para lograr la integridad de los datos, el multiplexor digital y el demultiplexor digital representados en las figuras 2 y 3 son estrictamente simétricos. Además, se utilizan los mismos multiplexores digitales y demultiplexores digitales para el codificador FEC y el decodificador FEC.

Debido al hecho de que cada algoritmo elemental Reed-Solomon procesa información de bytes y por tanto funciona con 8 trenes de datos paralelos, los demultiplexores dan  $(8 \times n)$  trenes de datos a los  $(n)$  códecs entrelazados, mientras que los multiplexores efectúan la operación inversa.

Suponiendo estas arquitecturas de codificador y de decodificador FEC, la figura 4 describe la construcción de la trama FEC.



**Figura 4/G.975 – Construcción de la trama FEC**

Debido al entrelazado de códigos RS(255,239) de índice  $n$ , la trama FEC tiene una longitud de  $(2040 \times n)$  bits y está compuesta de subtramas entrelazadas de  $(8 \times n)$  bits.

Como consecuencia de la simetría de los demultiplexores digitales y de los multiplexores digitales en cada lado de los algoritmos Reed-Solomon, la secuencia de bits de datos STM-16 de la trama FEC es idéntica a la de la señal de entrada STM-16.

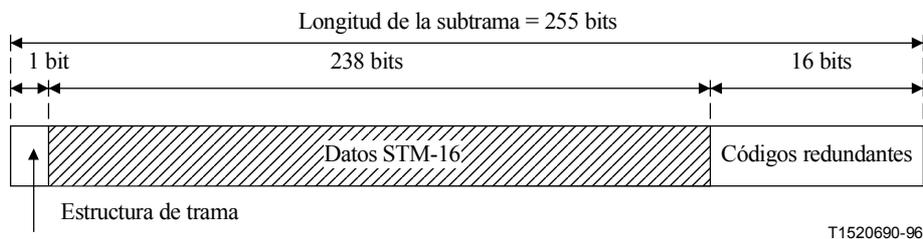
### 6.4.2 Estructura de trama

Se añade una estructura de trama a la trama FEC a fin de insertar una palabra de alineación de trama FEC, necesaria para efectuar el sincronismo de la trama FEC con la estructura del decodificador FEC en el equipo terminal de transmisión (TTE) receptor.

Los restantes bits de repuesto pueden utilizarse para cursar señales de marca afluentes, canales de servicio o canales de servicio telefónico.

La trama FEC (véase la figura 5) que se representa en 6.4.1 puede dividirse en subtramas de  $(8 \times n)$  255 bits de longitud. Cada subtrama contiene la información siguiente:

- el bit 1 de cada subtrama indica la estructura de trama [palabra de alineación de trama FEC, marcas afluentes para identificación del tren datos STM-16 en los sistemas que llevan grupos múltiples de secuencias STM-16 (si es necesario) o canales de servicio o de servicio telefónico para la comunicación entre terminales];
- los bits 2 a 239 de cada subtrama llevan la información STM-16;
- los bits 240 a 255 de cada subtrama llevan los bits redundantes calculados por el algoritmo RS(255,239).



**Figura 5/G.975 – Contenido de las subtramas de la trama FEC**

### 6.4.3 Aleatorización

Los datos STM-16 de la trama FEC ya están aleatorizados como se indica en UIT-T G.707 [1]. Por tanto, no es preciso, por lo general, efectuar una nueva aleatorización de la trama FEC.

No obstante, debe haber la posibilidad de inhibir la facilidad de aleatorización cuando ésta se implementa en el equipo terminal de transmisión submarina (TTE).

La aleatorización de la trama FEC puede efectuarse con el procedimiento siguiente: la trama FEC se aleatoriza, exceptuando los bits de la estructura de trama FEC, mediante un polinomio  $x^7 + x + 1$  que se inicia para cada trama en el primer bit que sigue a la estructura de la trama FEC.

Los primeros bits de la secuencia del aleatorizador son 1111111. A partir de ahí, el aleatorizador funciona de forma continua durante el paso de toda la trama FEC.

### 6.4.4 Relación de redundancia

La relación de redundancia de la función FEC definida en UIT-T G.975 es igual a 1/14. En consecuencia, las velocidades binarias de línea de los sistemas de cable submarino de fibra óptica que utilizan la corrección de errores directa son las siguientes:

- una señal afluente STM-16:  $2\,488,320 \times 15/14$  Gbit/s;
- dos señales afluentes STM-16: 2 señales multiplexadas a  $2\,488,320 \times 15/14$  Mbit/s;
- $M$  señales afluentes STM-16 ( $M$  es un entero distinto de cero):  $M$  señales multiplexadas a  $2\,488,320 \times 15/14$  Mbit/s.

## 7 Calidad de la función FEC

### 7.1 Calidad teórica de la función FEC

Un criterio para evaluar la calidad intrínseca de corrección del código RS(255,239) es la relación teórica entre la BER de línea tras la corrección de la función FEC ( $BER_{salida}$ ) y la BER de línea antes de la corrección de la función FEC ( $BER_{entrada}$ ).

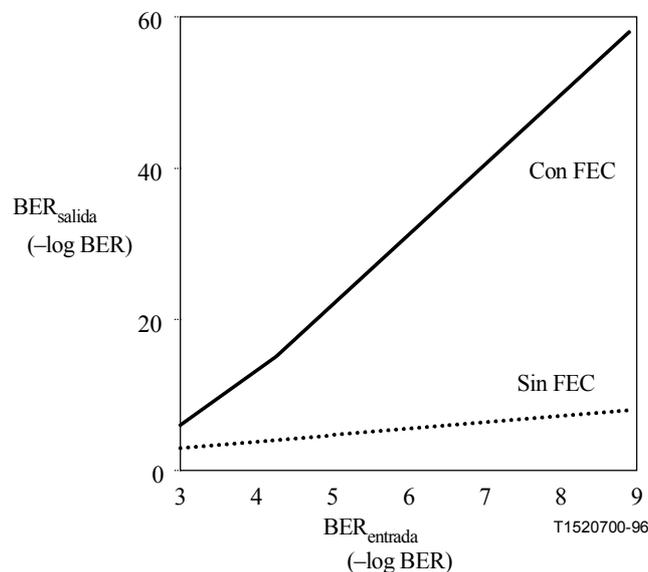
Para los códigos RS, este criterio puede calcularse matemáticamente con la hipótesis de que los errores se producen independientemente unos de otros y de que el decodificador no falla nunca (probabilidad de decodificación incorrecta igual a cero):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{UE} = \sum_{i=9}^N \frac{i}{N} \cdot \binom{N}{i} \cdot P_{SE}^i \cdot (1 - P_{SE})^{N-i} \quad \text{con } N = 255 \\ BER_{entrada} = 1 - (1 - P_{SE})^{1/8} \\ BER_{salida} = 1 - (1 - P_{UE})^{1/8} \end{array} \right.$$

siendo:

- $P_{UE}$  Probabilidad de un error incorregible
- $P_{SE}$  Probabilidad de un símbolo (byte) con error
- $N$  Longitud de la palabra de código (255)

La figura 6 y el cuadro 1 dan una indicación de la calidad intrínseca teórica del código RS(255,239).



**Figura 6/G.975 – Salida teórica en función de la BER de entrada**

**Cuadro 1/G.975 – Salida teórica en función de la BER de entrada**

$BER_{entrada}$	$BER_{salida}$
$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-15}$
$10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-24}$
$10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-33}$

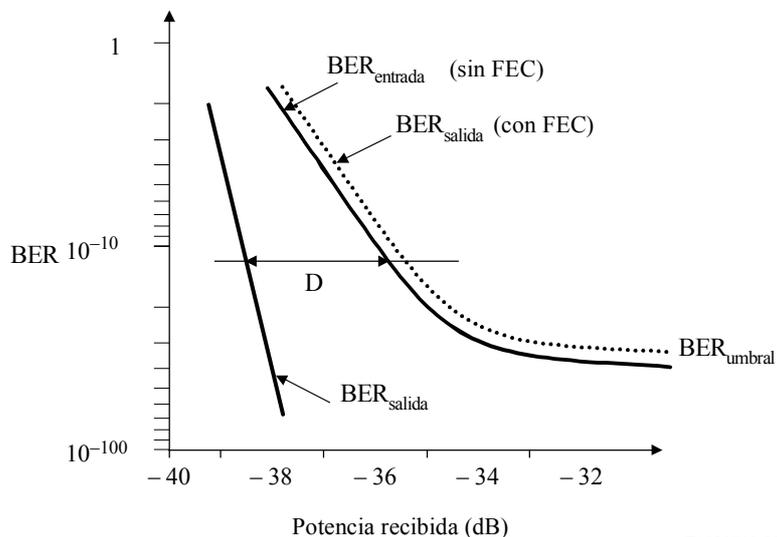
Se considera generalmente que la independencia estadística entre errores consecutivos tiene relación con la técnica de entrelazado Reed-Solomon: según este enfoque, un canal por ráfagas se transforma en varios canales de errores independientes.

Para una  $BER_{entrada}$  superior a  $10^{-3}$ , la probabilidad de codificación incorrecta no es despreciable (la decodificación incorrecta se produce cuando el decodificador intenta la corrección pero actúa incorrectamente porque el esquema de errores sobrepasa su capacidad de corrección) y hace que el cálculo previo de la  $BER_{salida}$  sea inexacto. En dichos casos, las curvas de la  $BER_{salida}$  en función de la  $BER_{entrada}$  están incluso situadas por debajo de la curva "sin FEC" de la figura 6.

Este cálculo es idéntico con independencia del sistema de cable submarino de fibra óptica, aunque no da indicación de la degradación que aporta el aumento de la velocidad binaria en línea a las características del canal de transmisión óptica.

## 7.2 Ganancia de codificación

También puede evaluarse la calidad de la función FEC mediante la ganancia de codificación, es decir, la diferencia en la potencia óptica de entrada al receptor necesaria para el funcionamiento de la codificación y la decodificación con la que se consigue un nivel especificado de calidad de la comunicación ( $BER = 10^{-10}$  en la figura 7).



**Figura 7/G.975 – Esquema de evaluación de la ganancia de codificación (D)**

Al corregir la  $BER_{entrada}$ , la función FEC aporta una ganancia de codificación positiva al sistema. Esta ganancia de codificación se atenúa ligeramente por el efecto que aportan los símbolos redundantes.

El valor de la ganancia de codificación depende intrínsecamente de la estructura global del sistema de cable submarino de fibra óptica (distancias entre repetidores, parámetros de fotodetección y potencia de salida del amplificador óptico, en particular).

Cuando un umbral de la BER de línea penaliza el sistema de cable submarino de fibra óptica, uno de los efectos más valiosos de la función FEC es el de reducir estos umbrales de BER de línea hasta niveles aceptables que el sistema físico no podría nunca lograr sin la FEC, independientemente de la potencia de entrada al receptor.

La ganancia de codificación prevista para el sistema de cable submarino de fibra óptica es de 4 a 5 dB por tramo de fibra.

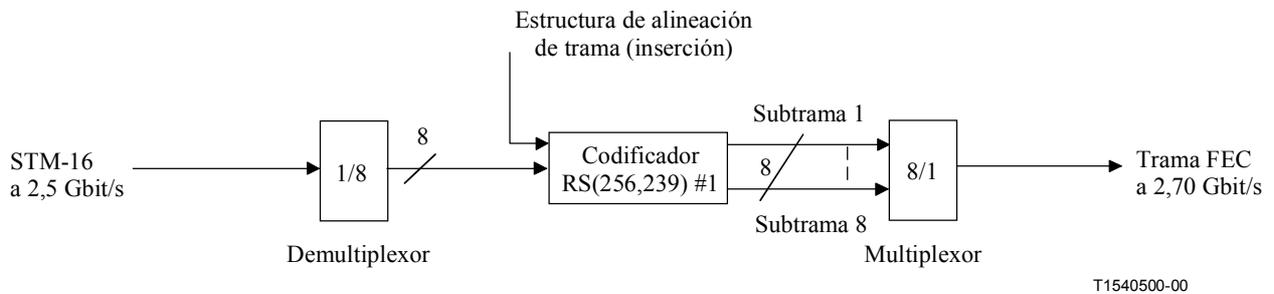
## APÉNDICE I

### Estructura de la trama FEC (opcional)

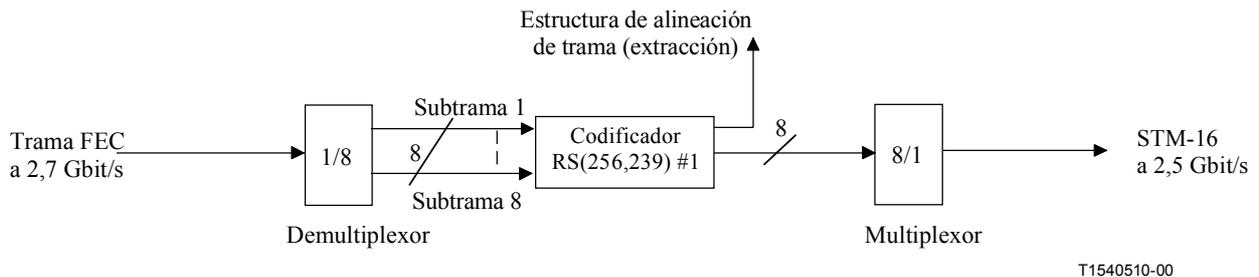
#### I.1 Arquitectura del codificador y del decodificador FEC

Frente a los 255 bits de longitud de la subtrama descrita en el cuerpo principal, se pueden utilizar 256 bits si se añade un bit de relleno a aquella. La subtrama de 256 bits resultante es divisible por cuatro, lo que permite realizar cuatro cálculos en paralelo pudiendo utilizarse un IC FEC con un caudal de 2,667 Gbit/s.

La arquitectura del codificador FEC y del decodificador FEC para STM-16 se muestra en las figuras I.1 e I.2, en las que toda la señal se calcula mediante un sólo IC FEC. En los sistemas STM-64, las señales se demultiplexan en cuatro grupos de señal, cada una de las cuales se procesa con un solo IC FEC. La arquitectura del codificador FEC y la del decodificador FEC para STM-64 se muestra en las figuras I.1 e I.4.



**Figura I.1/G.975 – Arquitectura del codificador FEC en los sistemas STM-16**



**Figura I.2/G.975 – Arquitectura del decodificador FEC en los sistemas STM-64**

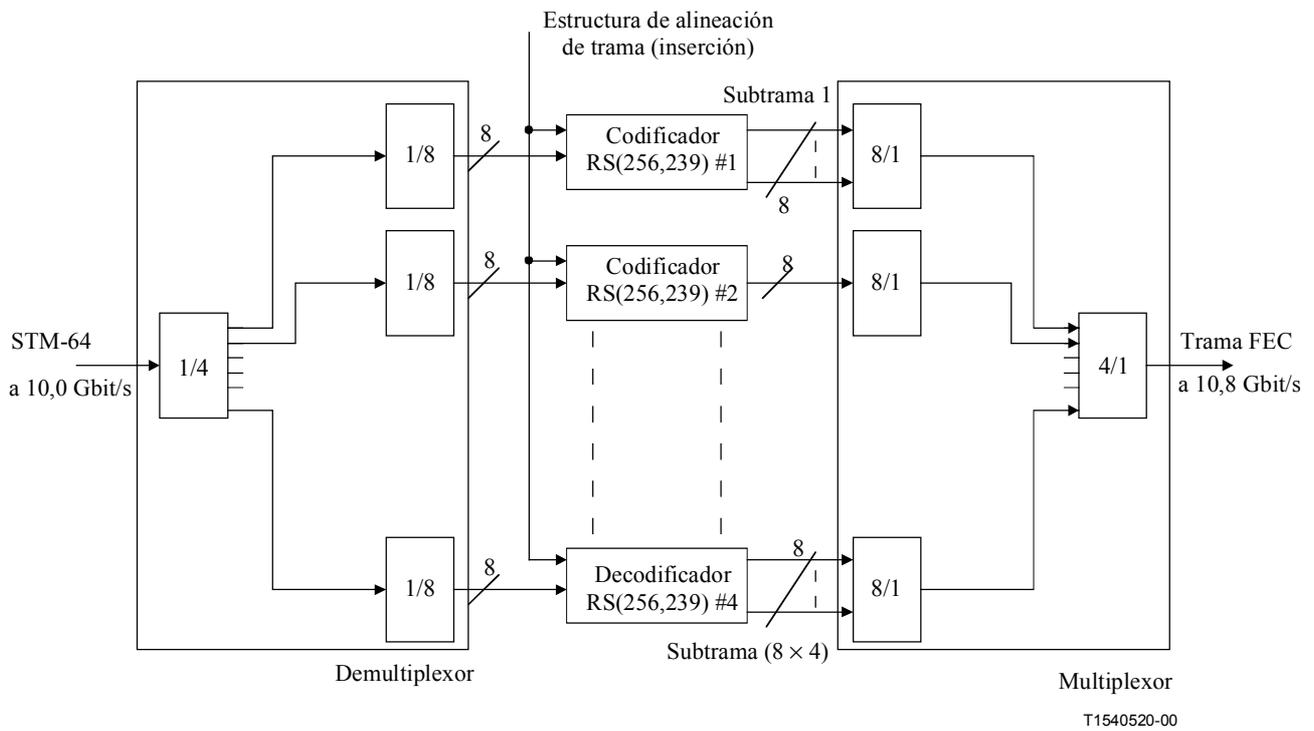


Figura I.3/G.975 – Arquitectura del codificador FEC en los sistemas STM-64

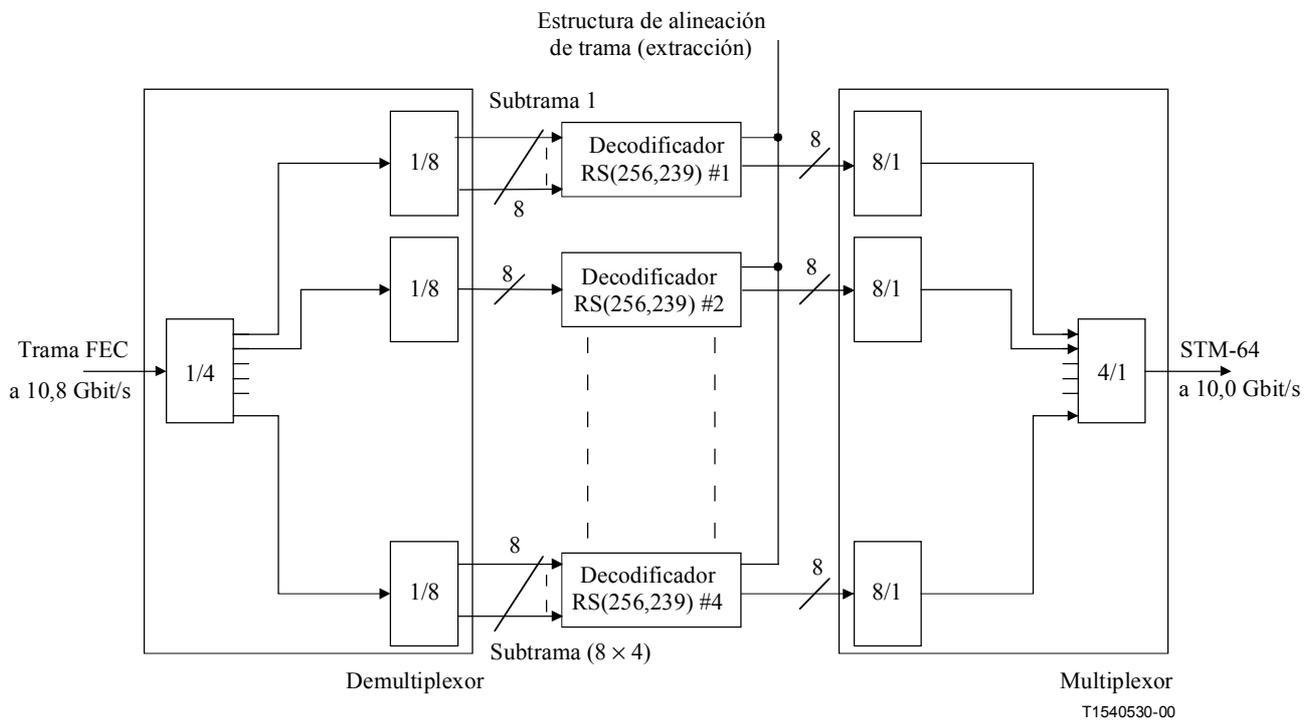
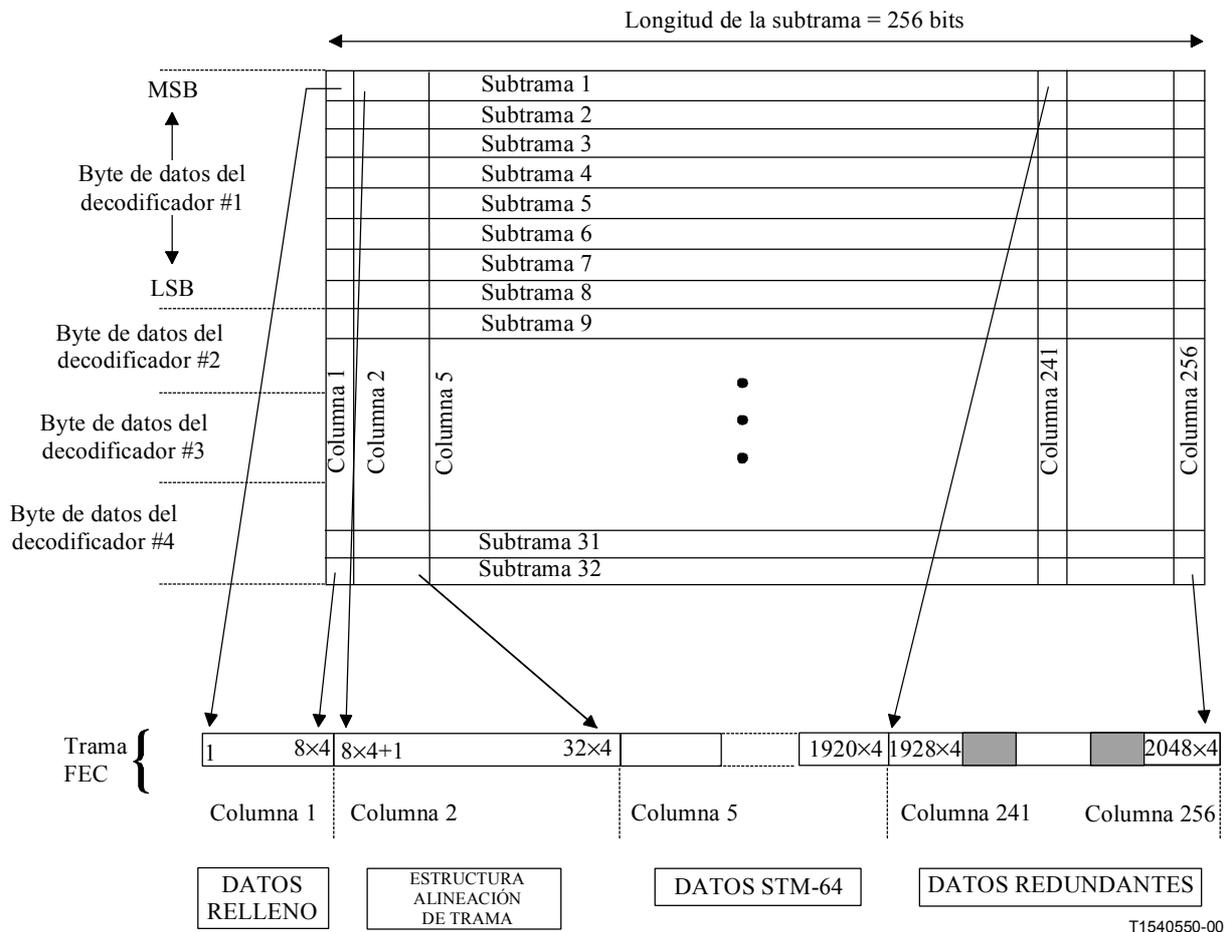


Figura I.4/G.975 – Arquitectura del decodificador FEC en los sistemas STM-64





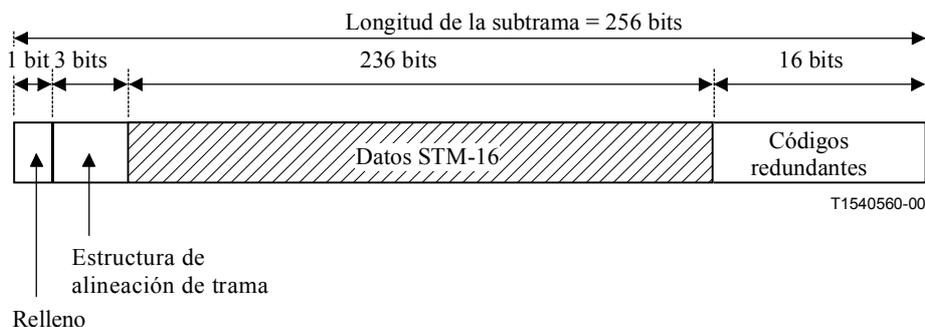
**Figura I.6/G.975 – Construcción de la trama FEC en los sistemas STM-64**

Las tramas FEC de STM-16 y STM-64 tienen respectivamente 2 048 y 2 048 × 4 bits de longitud, y están formadas por subtramas de un sólo bit y de cuatro bits intercalados, respectivamente. Las secuencias de los bits de datos STM-16 y STM-64 de la trama FEC son idénticas, respectivamente, a las de la señal de entrada STM-16 y STM-64.

## I.2 Estructura de alineación de la trama

Para poder realizar cuatro cálculos en paralelo que hagan posible utilizar un IC FEC de alto caudal, se añade un bit a la subtrama de 255 bits descrito en 6.4.2. La subtrama resultante de 256 bits contiene la siguiente información:

- El bit 1 es de relleno.
- Los bits 2 a 4 transportan la estructura de alineación de la trama, ya sea la palabra de alineación de trama FEC, los marcadores tributarios para la identificación de la corriente de datos STM-16 en los sistemas que transportan múltiplos de STM-16 (de ser necesario) o los canales de servicio para la comunicación entre terminales.
- Los bits 5 a 240 de la subtrama transportan la información STM-16.
- Los bits 241 a 256 de la subtrama transportan los bits redundantes, calculados mediante el algoritmo RS(255,239).



**Figura I.7/G.975 – Formato de subtrama de 256 bits que permite el cálculo en paralelo**

### I.3 Codificación

Los datos STM-16 de la trama FEC ya están codificados, como muestra UIT-T G.707 [1]. Por consiguiente no suele ser necesario codificar de nuevo la trama FEC.

No obstante, si se implementa en el equipo terminal de transmisión (TTE) submarino, acaso debiera inhibirse la facilidad de codificación.

La codificación de la trama FEC puede realizarse del siguiente modo: se aplica a la trama FEC, con excepción de los bits de la estructura de alineación de trama, un polinomio  $x^7 + x + 1$  iniciado en el primer bit de cada trama tras la estructura de alineación de la trama FEC.

Los primeros bits de la secuencia del codificador son 11111111. Después, el codificador continua ininterrumpidamente a lo largo de toda la trama FEC.

### I.4 Relación de redundancia

La relación de redundancia de la función FEC descrita en el apéndice I es igual a 5/59. Por consiguiente, las velocidades binarias de línea de los sistemas de cable submarino de fibra óptica que utilizan la característica de corrección de errores en recepción descrita en el apéndice I son las siguientes:

- un STM-16 transportado como tributario:  $2\,488,320 \times 64/59$  Mbit/s;
- un STM-64 transportado como tributario:  $9\,953,280 \times 64/59$  Mbit/s.

## SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie B	Medios de expresión: definiciones, símbolos, clasificación
Serie C	Estadísticas generales de telecomunicaciones
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
<b>Serie G</b>	<b>Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales</b>
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Transmisiones de señales radiofónicas, de televisión y de otras señales multimedios
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	RGT y mantenimiento de redes: sistemas de transmisión, circuitos telefónicos, telegrafía, facsimil y circuitos arrendados internacionales
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos y comunicación entre sistemas abiertos
Serie Y	Infraestructura mundial de la información y aspectos del protocolo Internet
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación