

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 640 519**

51 Int. Cl.:

H04L 1/00 (2006.01)

H04B 10/00 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.07.2008** E 16155931 (5)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.06.2017** EP 3048749

54 Título: **Corrección de errores de avance adaptativo a la velocidad para sistemas de transporte óptico**

30 Prioridad:

06.08.2007 US 834169

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

03.11.2017

73 Titular/es:

**ALCATEL LUCENT (100.0%)
148/152 route de la Reine
92100 Boulogne-Billancourt, FR**

72 Inventor/es:

**DE LIND VAN WIJNGAARDEN, ADRIAAN, J.;
GILES, RANDY, CLINTON;
KOROTKY, STEVEN, K. y
LIU, XIANG**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 640 519 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Corrección de errores de avance adaptativo a la velocidad para sistemas de transporte óptico

Antecedentes de la invención

Campo de la invención

- 5 La presente invención se refiere a sistemas de transporte óptico (OT) y, más específicamente, a la mejora de la capacidad y/o rentabilidad de un OT durante su vida útil mediante la utilización de corrección de errores hacia adelante (FEC) adaptable a la velocidad.

Descripción de la técnica relacionada

- 10 En los sistemas de transporte óptico (OT) actuales, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) se utiliza ampliamente para proporcionar una capacidad de transmisión de datos adecuada. La velocidad de transmisión de datos de la señal óptica, denominada aquí la "velocidad de la señal óptica", de cada canal WDM se especifica normalmente a 2,5, 10 o 40 Gb/s según la norma de la red óptica síncrona (SONET) y basada en la demanda de tráfico proyectado y en las condiciones de enlace óptico. Una vez establecidas en la etapa de despliegue del sistema, las velocidades ópticas de señal típicamente permanecen fijas a lo largo de la vida útil del OT porque cambiar las velocidades de la señal óptica es imposible o muy costoso debido a cambios de hardware y software.

- 15 Para cumplir con los requisitos de calidad de servicio (QoS) especificados, generalmente se requiere que cada canal WDM garantice una tasa de error de bits de salida relativamente baja (BER), típicamente del orden de 10^{-16} . Dado que se espera que los requisitos de QoS se cumplan durante toda la vida del OT, se asigna un margen de rendimiento inicial sustancial a cada canal WDM en la etapa de despliegue para acomodar la pérdida subsiguiente del margen de rendimiento debido al envejecimiento de los componentes del sistema, por ejemplo, transmisores ópticos, amplificadores, receptores, filtros y multiplexores/demultiplexores) y degradación general en el estado del enlace óptico. El margen de rendimiento se define generalmente como la diferencia, en decibelios (dB), entre la calidad de la señal real (factor Q) y el factor Q de umbral en el que se considera que el sistema apenas tiene un rendimiento aceptable. El factor Q (en dB) está relacionado con el BER como sigue:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{10^{Q(dB)/20}}{\sqrt{2}} \right) \quad (1)$$

- 20 Por ejemplo, para un BER de 10^{-3} , el factor Q es de 9,8 dB. Dado que la pérdida típica del margen de rendimiento debido al envejecimiento es de aproximadamente 4 dB durante unos 20 años (una vida útil típica especificada por los operadores de redes/sistemas ópticos), un OT actual suele configurarse para tener un margen de rendimiento adicional de aproximadamente 4 dB a la Inicio de vida (BOL) del sistema para garantizar un funcionamiento fiable durante su vida útil.

- 25 Además, el margen de rendimiento para un enlace de transmisión dado entre dos transpondedores ópticos (OT) depende de la condición del enlace de transmisión, tal como la relación señal/ruido óptico (OSNR) después de la transmisión de señal, dispersión cromática (CD) y características de dispersión en modo de polarización (PMD), interferencia WDM y penalizaciones de filtrado óptico. El OSNR después de la transmisión de señales depende además de la atenuación de la señal en la fibra óptica, la potencia de la señal y la amplificación óptica. No es raro que, en un momento dado, diferentes canales WDM tengan márgenes de rendimiento diferentes. Debido a que, según la demanda, un canal WDM dado puede ser reencaminado para establecer un enlace de transmisión diferente entre dos OT y la longitud de onda de la señal puede ser sintonizada, el margen de rendimiento para el canal WDM puede variar significativamente (por ejemplo, subir y bajar) a través del tiempo. Esta variación puede afectar negativamente al rendimiento general del OT y/o requerir que el margen de rendimiento adicional inicial se incremente adicionalmente por encima del valor de alojamiento de envejecimiento de aproximadamente 4 dB.

- 30 El documento EP 1 278 325 A2 describe un sistema de transmisión óptica en el que la potencia de transmisión óptica se incrementa para compensar la degradación del enlace (causada, por ejemplo, por el envejecimiento) de tal manera que se mantiene una tasa de errores de bits aceptable en el receptor. El sistema utiliza umbrales de margen de rendimiento adaptativo durante la configuración y supervisión de la ruta, respectivamente, teniendo en cuenta los efectos del envejecimiento. Si el factor Q de una trayectoria establecida desciende por debajo de un umbral respectivo, un regenerador se conmuta en la trayectoria o se asigna otra ruta.

Sumario de la invención

- 35 Una realización representativa de la invención proporciona un procedimiento para operar un sistema de transporte óptico, que comprende las etapas de: (A) estimar, utilizando una unidad de control de velocidad, un margen de rendimiento para un enlace óptico entre al menos un primer y segundo transpondedores ópticos (OT) de una pluralidad de OT conectados a través de uno o más enlaces ópticos, en el que el primer y el segundo OT están

adaptados para comunicarse entre sí utilizando un código de corrección de errores de avance (FEC) adaptativo a la velocidad; y (B) configurar, utilizando la unidad de control de velocidad antes mencionada, el primer y segundo OT para cambiar una tasa del código FEC en base al margen de rendimiento estimado.

Breve descripción de los dibujos

5 Otros aspectos, características y beneficios de la presente invención resultarán más evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, las reivindicaciones adjuntas y los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 muestra un diagrama de bloques de un sistema de transporte óptico (OT);

La figura 2 muestra diagramas de bloques de procesadores de datos de transmisor y receptor que pueden usarse en los transpondedores ópticos del OT mostrados en la figura 1;

10 La figura 3 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento de funcionamiento del OT de la figura 1 de acuerdo con una realización de la invención; y

Las figuras 4A-C comparan gráficamente características representativas de un OT de la técnica anterior y el OT mostrado en la figura 1.

Descripción detallada

15 En general, el ruido asociado con un canal de comunicación puede causar errores en el receptor. Las técnicas de corrección de errores hacia delante (FEC), tales como las que emplean códigos RS (Reed-Solomon) y BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem), mejoran la fiabilidad del canal óptico añadiendo redundancia a los datos, que se utiliza en el receptor para detectar y corregir los errores. Por lo general, más redundancia permite comunicaciones más confiables, pero a costa de consumir ancho de banda adicional o reducir el rendimiento.

20 Un código FEC se caracteriza por una tasa de código FEC, R_c , definida como una relación del número de bits de información originales k al número total de bits transmitidos n , incluyendo el último número tanto los bits de información como los bits redundantes, es decir, $R_c = k/n$. Una tasa de código FEC también se puede caracterizar en términos de una velocidad FEC-sobrecarga, R_o , definida como la relación entre el número de bits redundantes y el número de bits de información originales en una trama FEC, es decir, $R_o = (N - k)/k$. La relación entre la tasa de código FEC y la tasa de sobrecarga FEC viene dada por la siguiente ecuación: $R_c = (1 + R_o)^{-1}$.

25 Un beneficio importante del uso de FEC es que el margen de rendimiento de un canal de señal puede aumentarse significativamente. Por ejemplo, un código RS FEC típico con una sobrecarga del 7 % puede reducir el BER de aproximadamente 6×10^{-5} antes de la corrección a menos de aproximadamente 10^{-16} después de la corrección, aumentando así el margen de rendimiento en unos 6,5 dB. De manera similar, un código FEC de baja densidad de comprobación de paridad (LDPC) con una sobrecarga del 7 % puede reducir el BER de aproximadamente 1×10^{-3} antes de la corrección a menos de aproximadamente 10^{-16} después de la corrección, aumentando así el margen de rendimiento en unos 8,5 dB. Es factible aumentar aún más el margen de rendimiento de un código FEC basado en el uso de decodificación blanda u otras técnicas de decodificación avanzadas adecuadas. El aumento del margen de rendimiento proporcionado por FEC es a menudo referido como la "ganancia de codificación". Los códigos FEC LDPC representativos se describen en las siguientes publicaciones: (1) Publicación de la Solicitud de Patente U.S. n.º 2007/0113147; (2) J. Hagenauer, "Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes (RCP Codes) and Their Applications", IEEE Trans. Commun., Vol. 36, n.º 4, páginas 389-400, abr. 1988; (3) M. R. Yazdani y A.H. Banihashemi, "On Construction of Rate-Compatible Low-Density Parity-Check Codes", IEEE Commun. Letters, vol. 8, n.º 3, páginas 159-161, Mar. 2004; y (4) N. Chen, Y. Chang y D. Yang, "Generation of Rate-Compatible LDPC Codes Base don Linear Transformation", Comunicaciones y Electrónica, ICCE - Primera Conferencia Internacional, octubre de 2006, páginas 311-314.

35 En las comunicaciones ópticas, se utiliza FEC, por ejemplo, en (i) OT de largo alcance para reducir el número de regeneradores 3R (volver a temporizar, volver a formar, volver a transmitir) y (ii) sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para aumentar las velocidades de datos de canales WDM individuales. El uso de códigos FEC en sistemas de red óptica síncrona (SONET) y sistemas de jerarquía digital síncrona (SDH) se describe, por ejemplo, en la patente U.S. n.º 6.829.741. El uso de códigos FEC de RS y LDPC para la transmisión de señales ópticas con entrada de desconexión (OOK) y diferencial de desplazamiento de fase (DPSK) se describe, por ejemplo, en un artículo de G. Kramer, A. Ashikhmin, A.J. van Wijngaarden y X. Wei, "Spectral efficiency of coded phase-shift keying for fiber-optic communication", J. Lightwave Technol., 2003, vol. 21, páginas 2438-2445.

45 Suponga que el BER después de la decodificación FEC (denominado en adelante "BER corregido") que se especifica como aceptable para un sistema de transporte óptico (OT) es de 10^{-16} , lo que significa que, en promedio, un error de bit se considera tolerable por 10^{16} bits de información descodificados. Esto significa además que la probabilidad de un evento de error es incluso menor que eso, porque la salida de un código FEC típicamente da múltiples errores si se superan las capacidades de corrección de errores del código. En el despliegue, un OT de la técnica anterior que emplea un código RS FEC puede configurarse para tener un BER antes de la corrección de al menos aproximadamente 10^{-9} para proporcionar un margen de rendimiento adicional de aproximadamente 4 dB sobre el umbral BER correspondiente de 6×10^{-5} para acomodar la pérdida de margen de rendimiento debido al envejecimiento del sistema. Sin embargo, un problema con el enfoque de la FEC en las OTS es que, al comienzo de

la vida (BOL), el margen de rendimiento es usualmente excesivamente alto. Tener un margen de rendimiento excesivamente alto significa que parte del potencial del sistema en términos de rendimiento global o rentabilidad permanece inutilizado durante un período de tiempo sustancial, lo cual es usualmente indeseable para el operador de red.

5 Los problemas en la técnica anterior se abordan proporcionando un OT en la que una ganancia de codificación FEC puede ajustarse según sea necesario durante la vida útil del OT para mantener un margen de rendimiento que es suficiente pero no excesivo para la condición actual del OT. Por ejemplo, en el BOL de una OET, se puede usar una tasa de código FEC relativamente alta (tasa de sobrecarga relativamente pequeña de FEC) para proporcionar suficiente ganancia de codificación para que el OT tenga un margen de rendimiento adecuado. A medida que el OT
10 envejece, la tasa de código FEC puede reducirse (la tasa de sobrecarga FEC se puede aumentar) para proporcionar más ganancia de codificación y compensar la pérdida de margen de rendimiento. Además, los ajustes de la tasa de FEC se pueden hacer durante una reconfiguración del OT para acomodar los cambios en la condición de la transmisión de enlace. Un atributo importante de este enfoque es que la velocidad de señal óptica para un canal WDM dado permanece fija, por ejemplo, a 10 o 40 Gb/s, de modo que no se producen cambios de hardware, por
15 ejemplo en el circuito de recuperación de datos y reloj (CDR) necesarios, y los efectos de los impedimentos de la transmisión, tales como la dispersión cromática, la dispersión en modo de polarización, la no linealidad de la fibra y el filtrado óptico, no se ven afectados por los ajustes de la tasa de codificación. Con este enfoque, el OT puede mantener ventajosamente un margen de rendimiento adecuado, pero no excesivo, durante toda su vida útil y posibles reconfiguraciones de red. Aunque la capacidad efectiva de transmisión de datos del sistema podría reducirse un poco después de cada ajuste al alza de la tasa de código FEC, el rendimiento total del sistema (o capacidad) y la extensión de la utilización de los recursos del sistema son significativamente más altos en un OT de la invención que los En un OT comparable de la técnica anterior.

La figura 1 muestra un diagrama de bloques de un ejemplo de un OT **100**. El OT **100** está conectado a una red de transporte óptica externa a través de enlaces **102a** y **102c** ópticos (por ejemplo, fibras ópticas) y se muestra de
25 manera ilustrativa que tiene multiplexores **110a-b** ópticos de adición-gota (OADM) conectados entre sí a través de un enlace **102b** óptico (por ejemplo, una fibra óptica). Cada OADM **110** puede añadir y/o dejar caer señales ópticas originadas y/o dirigidas a los respectivos transpondedores **120** ópticos (OT). Por ejemplo, los OT **120a, c** se configuran para recibir señales ópticas caídas por OADM **110a-b**, respectivamente, de un múltiplex WDM transportado por OT **100**. Similarmente, los OT **120b, d** están configurados para generar señales ópticas para su adición a través de OADM **110a-b**, respectivamente, al múltiplex WDM.

Cada uno de los OT **120a-d** está adaptado para utilizar FEC (FF) adaptativa de velocidad (RAF). Más específicamente, para al menos un canal WDM, el OT **120** utiliza un código FEC cuya tasa R_c puede ajustarse según sea necesario, mientras que la tasa de señal óptica permanece fija (sin cambios). En una realización, el OT **120** está configurado para usar un código RS FEC compatible con la velocidad, cuya tasa R_c puede ajustarse a
35 cualquiera de los valores siguientes: 15/16, 7/8, 3/4 y 1/2, lo que se traduce en ganancias de codificación brutas de aproximadamente 6,2, 7,6, 8,9 y 10,2 dB, respectivamente. En otra realización, el OT **120** está configurado para usar un código FEC LDPC, cuya tasa R_c es seleccionable a partir de los siguientes valores: 15/16, 7/8, 3/4, 1/2 y 3/8, para obtener ganancias de codificación brutas de aproximadamente 8, 9, 10,5, 12 y 13,5 dB, respectivamente.

La tasa de código FEC utilizada por cada OT **120a-d** está controlada por una unidad de control de velocidad (RCU) **130**. En una realización, ejecutando un código FEC y detectando y corrigiendo errores, un OT **120** es capaz de proporcionar información BER a RCU **130**. Recopilando y analizando información de BER de varios OT **120**, la RCU **130** es capaz de determinar el margen de rendimiento actual para cada enlace óptico y/o canal WDM. Si la RCU **130** determina que el margen de rendimiento actual es adecuado, entonces la RCU no toma ninguna medida. Sin embargo, si la RCU **130** determina que el margen de rendimiento presente ha caído por debajo de un valor de umbral predeterminado, entonces la RCU configura los correspondientes OT **120** para cambiar sus respectivas
45 tarifas de código FEC. Preferentemente, la RCU **130** está adaptada para seleccionar la tasa más alta posible del código FEC que proporcione un margen de rendimiento aceptable para el enlace de transmisión entre las dos OT comunicativas. Por ejemplo, la RCU **130** puede configurar un OT **120** ejecutando un código LDPC FEC con tasa $R_c = 15/16$ para cambiar su valor R_c a 7/8 cuando se espera un déficit de rendimiento estimado de menos de 1 dB. El cambio resultante en la ganancia de codificación bruta se traduce en un aumento del margen de rendimiento de aproximadamente 1 dB, que podría ser suficiente para superar el déficit.

En otra realización, la RCU **130** puede realizar ajustes de tasa de código FEC basada en un margen de rendimiento previsto para cada uno de los canales WDM entre dos OT comunicantes. El margen de rendimiento predicho puede deducirse de las condiciones del enlace de transmisión óptica entre las dos OT comunicantes. Estas condiciones se describen mediante una pluralidad de parámetros, tales como la longitud del enlace, la relación señal/ruido óptico (OSNR) después de la transmisión sobre el enlace, la longitud de onda de la señal óptica que se transmite y recibe por los dos OT, dispersión cromática (CD) y características de dispersión en modo de polarización (PMD), diafonía WDM, penalización no lineal de fibra, penalización por filtración óptica y número de años en servicio para cada OT. Tenga en cuenta, sin embargo, que los diferentes canales WDM no necesitan tener las mismas tasas de código
55 FEC.

En una realización, la RCU **130** está además adaptado para configurar dos OT comunicantes para particionar los

5 datos de información originales en afluentes de datos que son compatibles con la norma de red óptica síncrona (SONET). Más específicamente, los afluentes de datos particionados pueden tener tasas de información de aproximadamente 40 Gb/s (OC768), 10 Gb/s (OC192), 2,5 Gb/s (OC48), 622 Mb/s (OC12) y 155 Mb/s (OC3). La Tabla 1 muestra particiones ejemplares de señales ópticas de 42,7-Gb/s y 10,7-Gb/s en tributarios de datos compatibles con SONET a diferentes velocidades de FEC. Tenga en cuenta que los datos "ficticios" podrían tener que ser añadidos a los datos de información y datos FEC redundantes para llenar las ranuras que todavía permanecen disponibles debido al hecho de que la señal óptica SONET tiene una velocidad de datos global fija.

Tabla 1. Distribución ejemplar de datos de señales ópticas en tributarios de datos compatibles con SONET

	$R_c=15/16$	$R_c=7/8$	$R_c=3/4$	$R_c=5/8$	$R_c=1/2$	$R_c=3/8$	$R_c=1/4$
42,7-Gb/s	1× OC768	3× OC192	3× OC192	2× OC192	2× OC192	1× OC192	1× OC192
		2× OC48	3× OC12	2× OC48	2× OC12	2× OC48	1× OC12
		3× OC12		2× OC12		1× OC12	
10,7-Gb/s	1× OC192	3× OC48	3× OC48	2× OC48	2× OC48	1× OC48	1× OC48
		2× OC12	3× OC3	2× OC12	2× OC3	2× OC12	1× OC3
		3× OC3		2× OC3		1× OC3	

10 En otra realización, la RCU **130** está además adaptada para configurar dos OT comunicantes para particionar los datos de información originales en afluentes de datos que son compatibles con el estándar Ethernet. Por ejemplo, las velocidades de datos de 10 Gb/s, 1 Gb/s, 100 Mb/s y 10 Mb/s son compatibles con el estándar Ethernet (ver norma IEEE 802.3).

15 A diferencia de las redes inalámbricas, donde los códigos compatibles con la velocidad se utilizan generalmente junto con las solicitudes de repetición automática (ARQ) y los bits redundantes se transmiten según la demanda, el OT **100** está preferentemente configurado para transmitir siempre bits redundantes junto con bits de información. Una razón importante para esta preferencia es que, en redes de transporte óptico, la distancia entre un transmisor y un receptor correspondiente puede ser muy grande, por ejemplo, más larga de 100 km, y frecuentemente del orden de 1.000 km, o incluso más larga que ésta. En consecuencia, la latencia asociada con una ARQ y la retransmisión de bits redundantes podrían ser desventajosamente grandes. Para evitar esta latencia, ninguno de los OT **120** está configurado para utilizar una ARQ. En cambio, la RCU **130** se comunica continuamente con los OT **120** para poder ajustar las tarifas de código FEC según sea necesario en base a la información BER, condiciones de enlace óptico y demandas de tráfico. Además, tal como se ha discutido anteriormente, puede ser necesario un ajuste de la tasa FEC durante una reconfiguración del enlace de transmisión entre dos OT comunicantes, y la velocidad deseada puede ser "predeterminada" basándose en las condiciones de enlace previstas y la demanda de tráfico. En ese caso, la RCU **130** Puede configurarse para ajustar las tasas de código FEC sin depender de la información BER actual de los OT.

20 La figura 2 muestra diagramas de bloques de un procesador de datos de receptor (RDP) **220a** y un procesador de datos de transmisor (TDP) **220b** que se puede usar, por ejemplo, en el OT **120**, de acuerdo con una realización de la invención. El RDP **220a** tiene un detector óptico (no mostrado explícitamente en la figura 2) adaptado para convertir señales ópticas, por ejemplo, recibidas a través de un enlace de comunicación, en las correspondientes señales eléctricas de una corriente **221** de bits. La corriente **221** de bits lleva tanto bits de información como bits redundantes en una proporción definida por el código FEC empleado en el transmisor. Por ejemplo, para un código FEC de tasa $R_c = p/(p + q)$, donde p y q son enteros positivos, la corriente **221** de bits contiene q bits redundantes por p bits de información. Los bits suministrados por la corriente **221** de bits se almacenan en un tampón **222** y son desentrelazados en un desintercalador (D-INT) **224** para generar una pluralidad de corrientes de bits **225-1** a **225-N**, cada una teniendo una tasa de bits N -veces menor que la corriente **221** de bits. Un decodificador FEC **226** recibe corrientes **225** de bits y aplica un algoritmo de decodificación FEC que coincide con el algoritmo de codificación FEC utilizado en el transmisor. La salida del algoritmo de decodificación es una pluralidad de corrientes de bits **227-1** a **227-k** que llevan los bits de información recuperados. Dependiendo del algoritmo de codificación FEC particular, N puede ser diferente o igual que k . Las corrientes **227** de bits se intercalan apropiadamente en un intercalador (INT) **228** para generar una corriente **229** de bits correspondiente a la corriente de bits de información original aplicada al transmisor por clientes remotos. La corriente **229** de bits se almacena en un tampón **230**, por ejemplo, para su posterior distribución a clientes locales. Obsérvese que la partición adicional de la corriente **229** de bits de información a tributarios de datos compatibles con SONET de acuerdo con las reglas de partición utilizadas en el transmisor. Estas reglas de partición dependen de la velocidad FEC, y las particiones ejemplares se muestran en la Tabla 1.

45 El TDP **220b** tiene un tampón **202** que almacena bits de información destinados a la transmisión a un receptor remoto que tiene un RDP, tal como un RDP **220a**. El tampón **202** aplica los bits de información almacenados, a través de una corriente **203** de bits, a un desintercalador (D-INT) **204**, donde dicha corriente de bits es desentrelazada apropiadamente para generar una pluralidad de flujos de bits **205-1** a **205-k**. Un codificador FEC **206** recibe corrientes **205** de bits y aplica a ellos un algoritmo de codificación FEC para generar una pluralidad de

corrientes **207-1** a **207-N** de bits que llevan tanto los bits de información original como los bits redundantes. Por ejemplo, el codificador FEC **206** Puede utilizar un código FEC de la tasa $R_c = p/(P + q)$ para generar q bits redundantes por p bits de información (véase el bloque **206a**). Las corrientes de bits **207** se entrelazan en un intercalador (INT) **208** para generar una corriente **209** de bits entrelazados correspondiente a las corrientes **207** de bits. Los bits codificados FEC de la corriente **209** de bits se almacenan en un tampón **210** de salida y se aplican, a través de una corriente **211** de bits de salida, a un modulador óptico (no mostrado explícitamente en la figura 2) que genera señales ópticas, por ejemplo, que representan una trama SONET, para su transmisión al receptor remoto.

La RCU **130** controla las velocidades de código FEC utilizadas por el codificador **206** y el decodificador **226**. En una situación en la que los procesadores **220a-b** de datos están configurados para comunicarse entre sí, por ejemplo, a través de un enlace **102b** óptico, la RCU **130** configura el codificador **206** y decodificador **226** para ejecutar algoritmos de codificación y decodificación FEC complementarios, respectivamente, que tienen velocidades de código FEC iguales. Cuando es necesario realizar un ajuste de la velocidad, la RCU **130** configura ambos OT **220a-b** para ajustar sus velocidades de código FEC de modo que se conserva la naturaleza complementaria de los algoritmos de codificación y decodificación FEC.

En una realización, el codificador **206** y el decodificador **226** utilizan códigos compatibles con la velocidad, en los que los bits de palabra de código de códigos de velocidad FEC más altos están incrustados en códigos de velocidad FEC más bajos. Una ventaja de este enfoque es que toda una familia de códigos puede codificarse y decodificarse utilizando una implementación de hardware común para el codificador y el decodificador. Pueden implementarse códigos compatibles con la velocidad, por ejemplo, a través de la perforación de los bits redundantes, la extensión de los bits redundantes, o mediante la transformación lineal de las matrices de comprobación de paridad FEC. Los códigos compatibles con la tasa representativa se describen en las siguientes publicaciones: (1) Patente n.º U.S. 6.892.342, (2) Publicación de Solicitud de Patente U.S. n.º 2007/0022362, y (3) las publicaciones citadas anteriormente por Hagenauer; Yazdani, et al.; y Chen, et al.

La figura 3 muestra un diagrama de flujo de un procedimiento **300** del OT **100** en funcionamiento de acuerdo con una realización de la invención. En la etapa **302** del procedimiento **300**, la RCU **130** (ver también las figuras 1-2) configura varios OT **120** para usar las respectivas tasas de código FEC iniciales (por defecto). Estas velocidades iniciales pueden basarse, por ejemplo, en los presupuestos de topología, diseño y óptica del OT. La etapa **302** puede realizarse, por ejemplo, en el despliegue inicial del OT **100**. En la etapa **304**, la RCU **130** se comunica con OT **120** para obtener datos BER para cada enlace **102** óptico y/o canal WDM. En la etapa **306**, la RCU **130** procesa los datos de BER recogidos en la etapa **304** para determinar el margen de rendimiento. Esta determinación puede incluir comparar el BER(s) con un valor BER objetivo.

En la etapa **308**, la RCU **130** determina si el margen de rendimiento es óptimo. En una implementación, el término "óptimo" significa que el margen de rendimiento determinado no es ni excesivo ni demasiado bajo. En una implementación de la etapa **308**, el margen de rendimiento determinado se compara con dos valores de umbral, por ejemplo, un valor umbral superior y un valor umbral inferior, para determinar si el margen de rendimiento presente cae dentro del intervalo definido por esos dos valores de umbral. Los valores de umbral superior e inferior se establecen generalmente basándose en consideraciones generales del rendimiento del sistema, que pueden incluir, pero no se limitan a, capacidad del sistema, demandas de tráfico y/o latencia de codificación/decodificación. Por ejemplo, en una configuración del sistema, el valor de umbral inferior se puede ajustar en aproximadamente 0,2 dB, y el valor de umbral superior se puede ajustar en aproximadamente 1,6 dB. Si se determina en la etapa **308** que el margen de rendimiento está dentro del intervalo deseable, entonces la RCU **130** no toma ninguna acción y el procesamiento del procedimiento **300** regresa a la etapa **304**. Sin embargo, si se determina que el margen de rendimiento está fuera del intervalo deseable, entonces el procesamiento del procedimiento **300** se dirige a la etapa **310**.

En la etapa **310**, la RCU **130** configura varios OT **120** para hacer ajustes de velocidad de código FEC apropiados. Los ajustes de la velocidad del código FEC pueden incluir un ajuste de la velocidad al alza y/o un ajuste de la tasa descendente. Más específicamente, si se determina que el margen de rendimiento es excesivo, entonces se puede realizar un ajuste de la tasa al alza. Es probable que un ajuste de la tasa alcista sea posterior a la fase de despliegue inicial, cuando las tarifas predeterminadas del código FEC resultan demasiado conservadoras. Además, cuando se predice una reconfiguración de red programada para aumentar el margen de rendimiento de un canal WDM que conecta dos OT comunicantes, la RCU **130** Puede tener el conocimiento requerido y especificar un nuevo tipo de FEC a través de un ajuste apropiado de la tasa al alza para lograr el margen de rendimiento óptimo. En una realización, la etapa **310** selecciona la tasa más alta posible del código FEC que proporciona un margen de rendimiento aceptable para el enlace de transmisión entre los OT comunicantes.

Si se determina que el margen de rendimiento es demasiado bajo, se realiza un ajuste de la velocidad descendente. Como ya se indicó anteriormente, se pueden realizar múltiples ajustes de la tasa descendente durante la vida útil del OT **100** debido al envejecimiento de los componentes del sistema y al deterioro general de la condición de los enlaces ópticos. Además, cuando se predice una reconfiguración de red programada para reducir el margen de rendimiento de un canal WDM, la RCU **130** puede tener el conocimiento requerido y especificar un nuevo tipo de FEC a través de un ajuste apropiado de la tasa descendente para lograr el margen de rendimiento óptimo. Después de la etapa **310**, el procesamiento del procedimiento **300** se dirige de nuevo a la etapa **304**. Tenga en cuenta que en

el procedimiento **300**, la RCU **130** puede en paralelo optimizar dinámicamente las tasas de FEC para múltiples canales WDM.

Las figuras 4A-C comparan gráficamente características representativas de un OT de la técnica anterior y una realización de OTS **100**, en lo sucesivo denominada OTS **400**. Más específicamente, en cada una de las figuras 4A-C, las características respectivas del OTS y el OTS de la técnica anterior **400** se muestran por líneas discontinuas y discontinuas, respectivamente. El OTS de la técnica anterior tiene una pluralidad de OT de 2,5 Gb/s que ejecutan un código RS FEC que tiene una velocidad fija (R_c) de 239/255. El OTS **400** tiene una pluralidad de OT de 10 Gb/s que ejecutan un código FEC LDPC adaptativo de velocidad. La velocidad de la señal óptica de 2,5 Gb/s en el sistema de la técnica anterior es inferior a la velocidad de la señal óptica de 10 Gb/s en OTS **400** debido a que el OTS de la técnica anterior no puede alcanzar el margen de rendimiento inicial requerido de aproximadamente 4 dB usando OT de 10 Gb/s.

La figura 4A representa, para ambas OTS, el margen de rendimiento en función del tiempo (años en servicio). Tenga en cuenta que la resolución temporal en la figura 4A (y también en las figuras 4B-C) es de un año. En el OTS de la técnica anterior, el margen de rendimiento disminuye linealmente con el tiempo desde aproximadamente 4 dB en el BOL hasta aproximadamente 0 dB al final de vida (EOL), que es de 20 años desde el BOL. En el OTS **400**, la tasa de código FEC se establece en $R_c = 7/8$ en el BOL, lo que proporciona un margen de rendimiento de aproximadamente 0,8 dB. El margen de rendimiento disminuye linealmente con el tiempo hasta que, en algún momento durante el cuarto año, cruza el valor umbral inferior especificado para ser alrededor de 0,2 dB. En ese punto, la tasa de código FEC se ajusta a $R_c = 3/4$ de acuerdo con el procedimiento **300** (véase la figura 3). Este ajuste de la velocidad aumenta el margen de rendimiento a aproximadamente 1,6 dB. El margen de rendimiento disminuye linealmente a partir de entonces hasta que, en algún momento durante el duodécimo año, vuelve a cruzar el valor umbral inferior. En ese punto, la tasa de código FEC se ajusta adicionalmente hacia abajo a $R_c = 1/2$ de acuerdo con el procedimiento **300**. Este último ajuste de la velocidad aumenta el margen de rendimiento a cerca de 1.4 dB. El margen de rendimiento disminuye linealmente después hasta que, en algún momento durante el decimonoveno año, cruza el valor de umbral más bajo una vez más. En ese punto, la tasa de código FEC se ajusta aún más hacia abajo a $R_c = 3/8$ de acuerdo con el procedimiento **300**. Este ajuste de velocidad hace que el margen de rendimiento vuelva a ser de aproximadamente 1,6 dB. El margen de rendimiento disminuye linealmente a partir de entonces hasta que el OTS se pone fuera de servicio en la EOL.

La figura 4B representa, para ambas OTS, la capacidad normalizada del sistema en función del tiempo. Tal como se utiliza en la presente memoria, el término "capacidad del sistema" se refiere a la capacidad o rendimiento del sistema para el transporte de bits de información. En el OTS de la técnica anterior, la capacidad del sistema permanece fija desde el BOL al EOL. En el OTS **400**, la capacidad del sistema es de aproximadamente 3,7, 3,2, 2,1 y 1,6 veces la del sistema de la técnica anterior antes del primer, segundo y tercer y después de los terceros ajustes de velocidad, respectivamente. Ventajosamente, el OTS **400** proporciona en promedio aproximadamente 2,5 veces más capacidad del sistema que el OTS de la técnica anterior.

La figura 4C representa, para ambos OTS, el coste normalizado por bit de información como una función del tiempo. Para la figura 4C, se supone que, en ambos OTS, el coste del enlace óptico es el mismo y constituye el 75 % del coste total del OT de la técnica anterior. El coste de los OT de 2,5 Gb/s constituye el 25 % restante del coste del OT de la técnica anterior y los OT de 10 Gb/s utilizados en OTS **400** se supone que son tres veces más caras que los OT de 2,5 Gb/s. Ventajosamente, el coste por bit en OTS **400** es en promedio aproximadamente 40 % menor que el coste por bit en el OTS de la técnica anterior.

Aunque esta invención se ha descrito con referencia a realizaciones ilustrativas, esta descripción no pretende ser interpretada en un sentido limitativo. Aunque las realizaciones de la invención se han descrito en referencia a los códigos FEC de RS y LDPC, la invención no está limitada. Un experto en la técnica entenderá que también se pueden usar otros códigos FEC adecuados, tales como códigos concatenados, códigos convolucionales, códigos con decodificación de decisión fuerte y códigos con decodificación de decisión blanda. Se consideran que diversas modificaciones de las realizaciones descritas, así como otras realizaciones de la invención, que son evidentes para los expertos en la técnica a las que pertenece la invención, se encuentran dentro del principio y alcance de la invención tal como se expresa en las siguientes reivindicaciones.

A menos que se indique explícitamente lo contrario, cada valor numérico y rango deben interpretarse como aproximados como si la palabra "alrededor" o "aproximadamente" precediera al valor del valor o rango.

Se comprenderá además que los expertos en la técnica pueden realizar diversos cambios en los detalles, materiales y disposiciones de las partes que se han descrito e ilustrado con el fin de explicar la naturaleza de esta invención sin apartarse del alcance de la presente invención tal como se expresa en las siguientes reivindicaciones.

Debe entenderse que las etapas de los procedimientos ejemplares expuestos en la presente memoria descriptiva no se requieren necesariamente que se lleven a cabo en el orden descrito, y el orden de las etapas de tales procedimientos debe ser entendido como meramente ejemplar. Del mismo modo, pueden incluirse etapas adicionales en tales procedimientos, y ciertas etapas pueden omitirse o combinarse, en procedimientos consistentes con diversas realizaciones de la presente invención.

5 La referencia en la presente memoria descriptiva a "una realización" significa que una característica particular, estructura o característica particular descrita en relación con la realización puede incluirse al menos en una realización de la invención. Las apariciones de la frase "en una realización" en varios lugares de la memoria descriptiva no se refieren necesariamente a la misma realización, ni realizaciones separadas o alternativas que se excluyan mutuamente de otras formas de realización. Lo mismo se aplica al término "aplicación".

10 También a los efectos de esta descripción, los términos "acople", "acoplamiento", "acoplado", "conectar", "conectarse" o "conectarse" se refieren a cualquier manera conocida en la técnica o desarrollada más tarde en la que se permite que se pueda transferir energía entre dos o más elementos, y se contempla la interposición de uno o más elementos adicionales, aunque no se requiere. Por el contrario, los términos "directamente acoplados", "directamente conectados", etc., implican la ausencia de tales elementos adicionales.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de operación de un sistema de transporte óptico, que comprende:
 - 5 - estimar, utilizando una unidad (130) de control de velocidad, un margen (306) de rendimiento para un enlace óptico entre al menos un primer y segundo transpondedores (120a, 120b, 120c, 120d) ópticos de una pluralidad de transpondedores ópticos conectados a través de uno o más enlaces ópticos, en el que el primer y el segundo transpondedores (120a, 120b, 120c, 120d) ópticos están adaptados para comunicarse entre sí utilizando un código de corrección de errores de avance adaptativo a la velocidad; y
 - 10 - configurar, utilizando la unidad (130) de control de velocidad antes mencionada, el primer y segundo transpondedores (120a, 120b, 120c, 120d) ópticos para cambiar una tasa del código (310) de corrección de errores de avance adaptativo a la velocidad basándose en el margen de rendimiento estimado.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende, además:
 - 15 - determinar por la unidad de control de velocidad una tasa de errores de bits para al menos uno de los transpondedores ópticos primero y segundo;
 - comparar por la unidad de control de velocidad, la tasa de error de bits determinada con una tasa de error de bit objetivo para estimar el margen de rendimiento.
3. El procedimiento de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, que comprende, además:
 - estimar por la unidad de control de velocidad, el margen de rendimiento basado en una o más características del enlace óptico entre el primer y segundo transpondedores ópticos.
- 20 4. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que la una o más características incluyen una o más de: longitud del enlace óptico, relación señal óptica/ruido después de la transmisión de señal a través del enlace óptico, longitud de onda de una señal que se transmite a través del enlace óptico, cantidad de dispersión cromática, cantidad de dispersión en modo de polarización, diafonía de canal óptico, penalización no lineal de fibra, penalización por filtración óptica y número de años en servicio para al menos uno de los transpondedores ópticos primero y segundo.
- 25 5. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, en el que: los transpondedores ópticos primero y segundo se comunican entre sí utilizando una velocidad de señal óptica de al menos aproximadamente 10 Gb/s.
6. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, en el que los transpondedores ópticos primero y segundo están separados por una distancia de al menos 100 km.
- 30 7. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, en el que el código de corrección de errores de avance comprende uno o más de un código de verificación de paridad de baja densidad, un código Reed-Solomon, un código convolucional y un código compatible con la velocidad.
8. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, que comprende, además:
 - 35 - comparar, mediante la unidad de control de velocidad, una tasa de error de bits presente para las comunicaciones entre los transpondedores ópticos primero y segundo con una tasa de error de bits objetivo para determinar un margen de rendimiento presente;
 - comparar, mediante la unidad de control de velocidad, el margen de rendimiento presente con al menos un primer valor de umbral; y
 - reducir por la unidad de control de velocidad, la velocidad del código de corrección de errores de avance si el margen de rendimiento actual es menor que el primer valor de umbral.
- 40 9. El procedimiento de la reivindicación 8, que comprende, además:
 - comparar, mediante la unidad de control de velocidad, el margen de rendimiento actual con un segundo valor de umbral que es mayor que el primer valor de umbral; y
 - aumentar la velocidad del código de corrección de errores de avance si el margen de rendimiento actual es mayor que el segundo valor de umbral.

FIG. 1

100

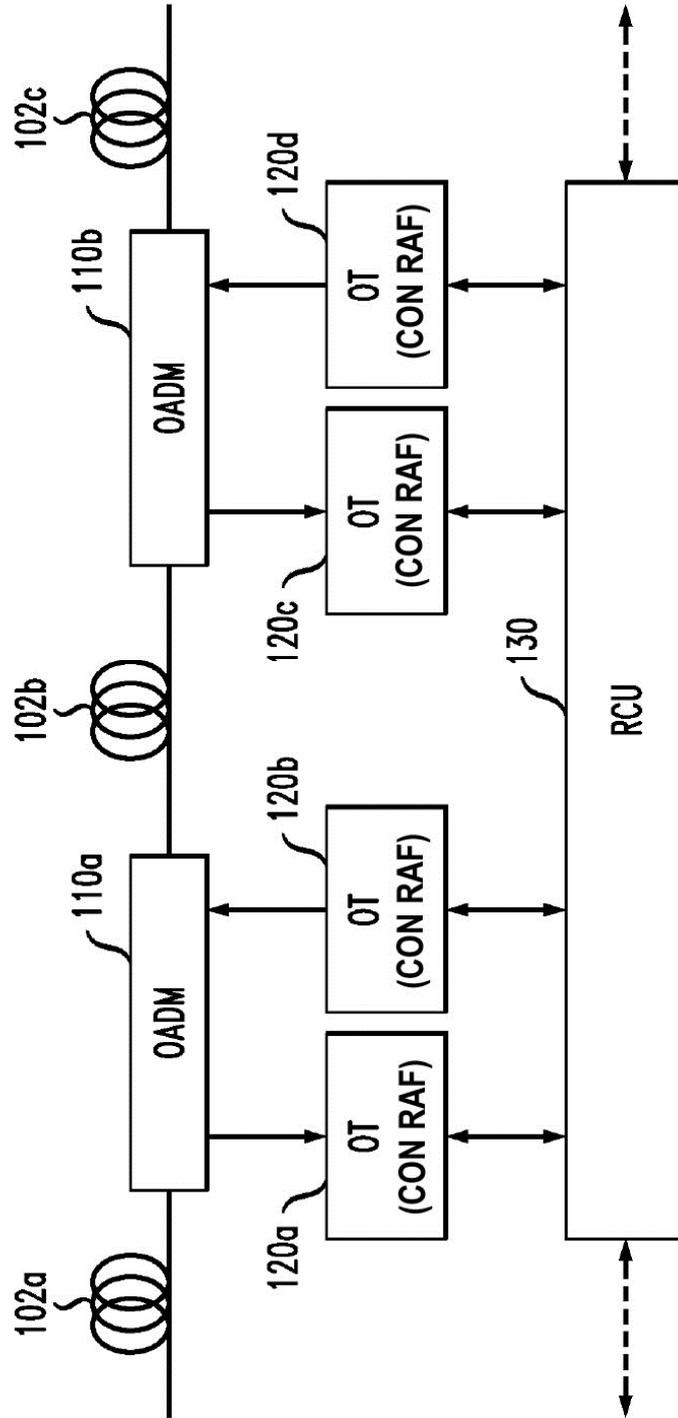


FIG. 2

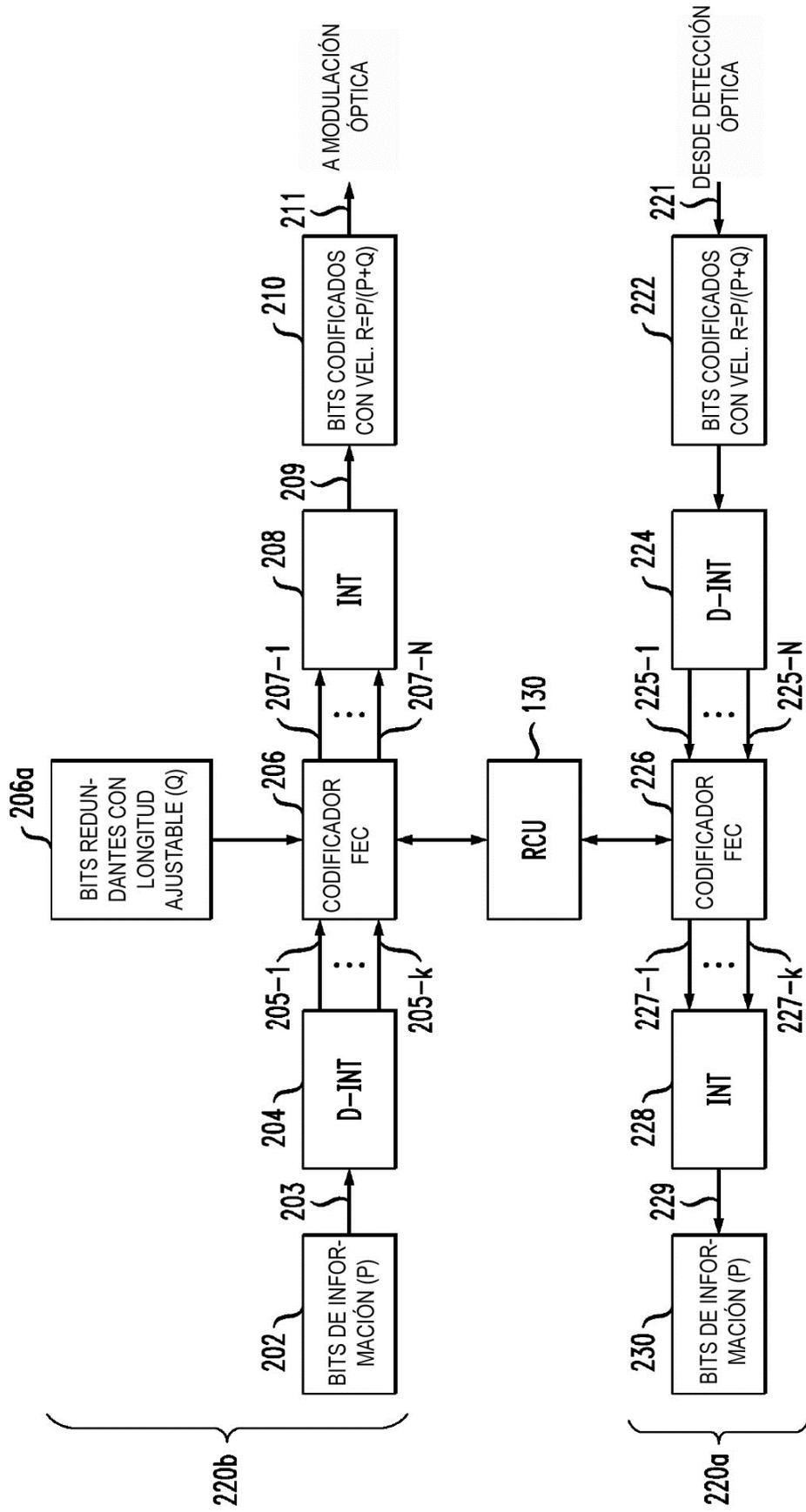


FIG. 3

300

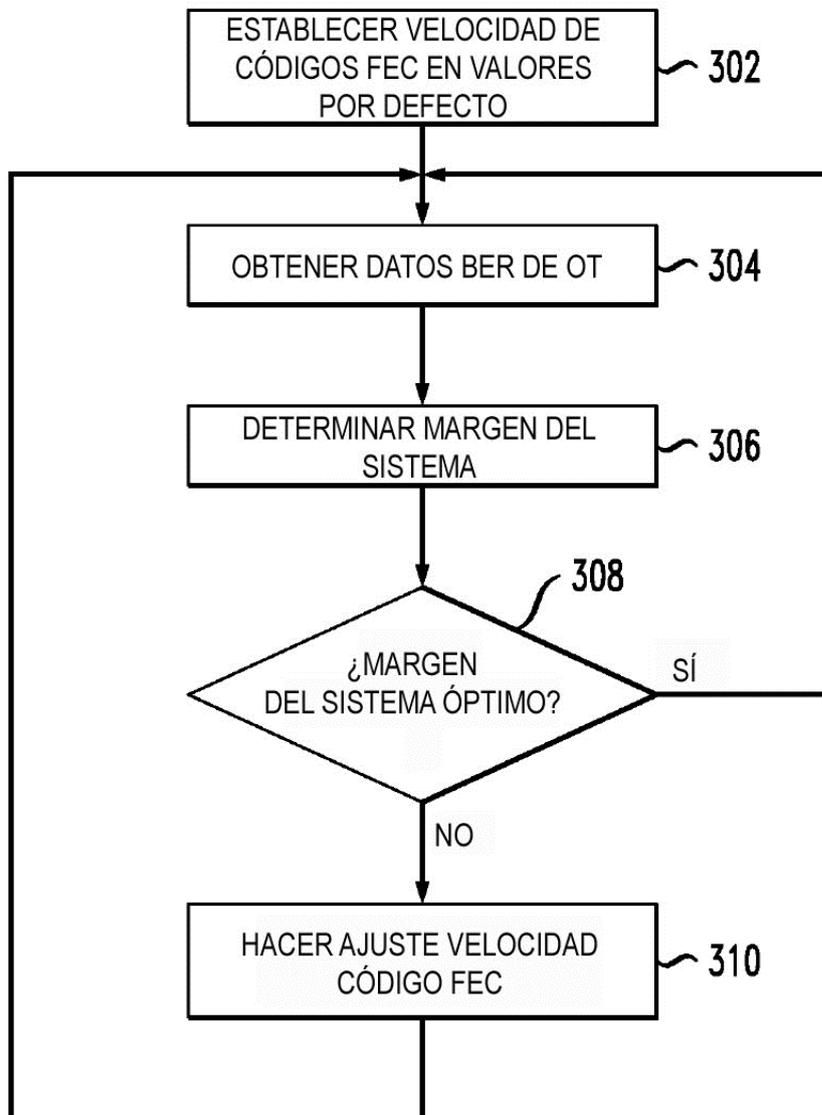


FIG. 4A

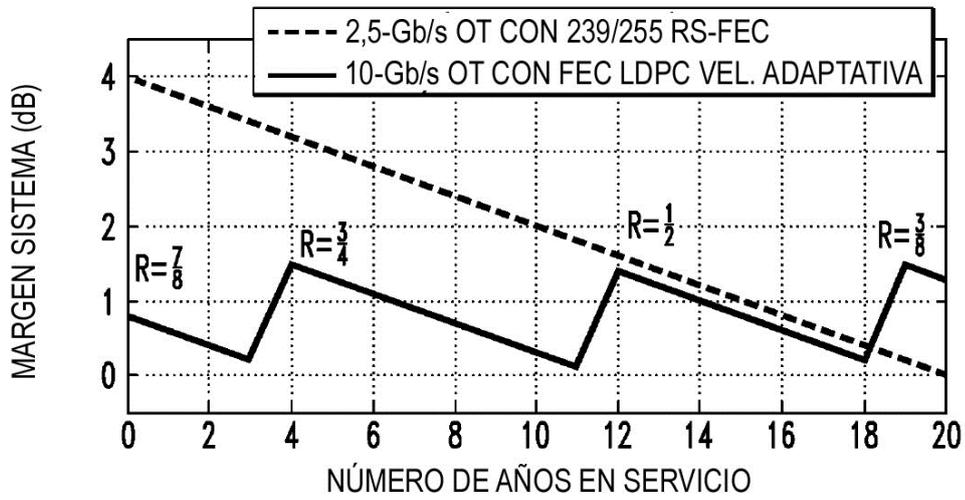


FIG. 4B

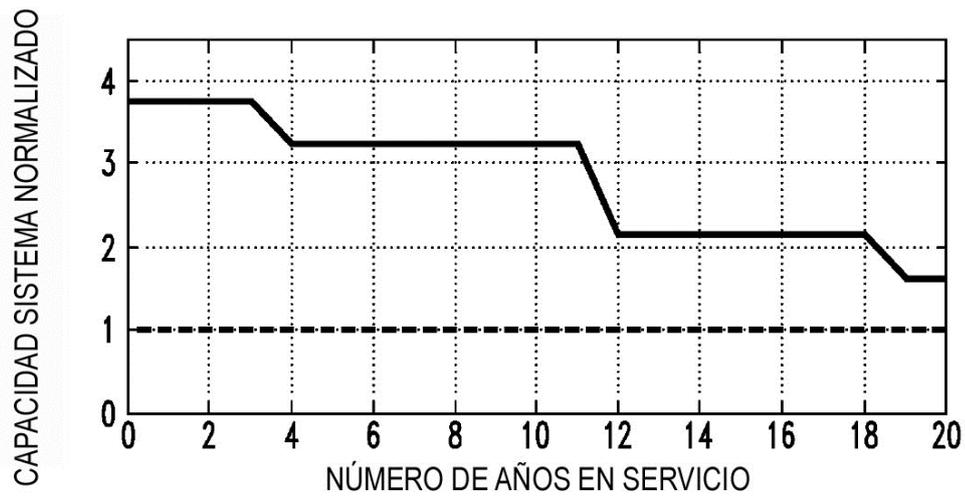


FIG. 4C

