



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

G.8251

(11/2001)

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

Redes digitales – Objetivos de calidad y disponibilidad

**Control de la fluctuación de fase y de la
fluctuación lenta de fase en la red óptica
de transporte**

Recomendación UIT-T G.8251

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
CALIDAD DE SERVICIO Y DE TRANSMISIÓN	G.1000–G.1999
CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN	G.6000–G.6999
EQUIPOS TERMINALES DIGITALES	G.7000–G.7999
REDES DIGITALES	G.8000–G.8999
Objetivos de calidad y disponibilidad	G.8200–G.8299
Funciones y capacidades de la red	G.8300–G.8399
Características de las redes con jerarquía digital síncrona	G.8400–G.8499
Gestión de red de transporte	G.8500–G.8599
Integración de los sistemas de satélite y radioeléctricos con jerarquía digital síncrona	G.8600–G.8699
Redes ópticas de transporte	G.8700–G.8799

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

Recomendación UIT-T G.8251

Control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase en la red óptica de transporte

Resumen

Esta Recomendación UIT-T especifica los límites de red máximos de la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase que no deberán ser rebasados y la tolerancia mínima de los equipos a la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase que deberá proporcionarse en toda interfaz basada en la red óptica de transporte (OTN).

Los requisitos de las características de fluctuación de fase y fluctuación lenta de fase especificados en esta Recomendación UIT-T deben ser observados con el fin de asegurar la interoperabilidad de los equipos construidos por diferentes fabricantes y una calidad de funcionamiento satisfactoria de la red.

Orígenes

La Recomendación UIT-T G.8251, preparada por la Comisión de Estudio 15 (2001-2004) del UIT-T, fue aprobada por el procedimiento de la Resolución 1 de la AMNT el 29 de noviembre de 2001.

Palabras clave

Exactitud de la frecuencia, fluctuación de fase a la salida, fluctuación lenta de fase a la salida, gama de tiro hacia adentro, gama de tiro hacia fuera, generación de fluctuación de fase, generación de fluctuación lenta de fase, límites de red, reloj de ODUk, tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada, tolerancia a la fluctuación lenta de fase a la entrada, transferencia de fluctuación de fase.

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 no 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 2002

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

ÍNDICE

	Página
1 Alcance.....	1
2 Referencias.....	2
3 Definiciones.....	3
4 Abreviaturas y acrónimos.....	3
5 Límites de red para la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase máxima a la salida en una interfaz de OTUk.....	4
5.1 Límites de red para la fluctuación de fase.....	5
5.2 Límites de red para la fluctuación lenta de fase.....	5
6 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces de red.....	6
6.1 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces de OTN.....	6
6.1.1 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU1.....	7
6.1.2 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU2.....	8
6.1.3 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU3.....	9
6.2 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces del cliente CBR2G5, CBR10G y CBR40G.....	10
Anexo A – Especificación del reloj de ODUk (ODC).....	10
A.1 Alcance.....	10
A.2 Aplicaciones.....	14
A.3 Exactitud de la frecuencia.....	14
A.4 Gamas de tiro hacia adentro y hacia afuera.....	14
A.4.1 Gama de tiro hacia adentro.....	14
A.4.2 Gama de tiro hacia afuera.....	15
A.5 Generación de ruido.....	15
A.5.1 Generación de fluctuación de fase.....	15
A.5.2 Generación de fluctuación lenta de fase.....	16
A.6 Tolerancia al ruido.....	17
A.7 Transferencia de fluctuación de fase.....	17
A.7.1 Transferencia de fluctuación de fase del ODCb.....	17
A.7.2 Transferencia de fluctuación de fase del ODCr.....	18
A.7.3 Transferencia de fluctuación de fase del ODCp.....	19
A.8 Respuesta transitoria.....	19

Apéndice I – Relación entre los requisitos de la fluctuación de fase en la interfaz de red y la tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada	20
I.1 Requisitos de fluctuación de fase en la interfaz de red	20
I.2 Tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada de los equipos de red.....	21
Apéndice II – Efecto de la OTN en la distribución de la sincronización vía clientes STM-N.....	23
II.1 Introducción	23
II.2 Cadena de referencia de sincronización provisional	23
II.3 Límite de red de sincronización	24
II.4 Memoria de canal variable	25
II.5 Histéresis de memoria intermedia máxima	25
Apéndice III – Modelo ficticio de referencia (HRM) para la acumulación de fluctuación de fase de un regenerador 3R.....	26
Apéndice IV – Análisis de la acumulación de fluctuación de fase en un regenerador 3R	27
IV.1 Introducción	27
IV.2 Modelo 1	28
IV.2.1 Pormenores del modelo.....	29
IV.2.2 Resultados del modelo	34
IV.2.3 Referencias (para el apéndice IV)	51
IV.3 Modelo 2	52
IV.3.1 Introducción	52
IV.3.2 Estructura de los bloques de construcción equivalentes para la simulación de ruido.....	52
IV.4 Generación de fluctuación de fase de los regeneradores que utilizan la conversión serie-paralelo.....	53
Apéndice V – Información adicional sobre los requisitos relativos al error de fase del dispositivo que anula la correspondencia (ODCp) y la generación de fluctuación de fase de banda ancha del dispositivo que anula la correspondencia	54
V.1 Introducción	54
V.2 Error de fase del dispositivo que anula la correspondencia	55
V.3 Generación de fluctuación de fase de banda ancha del dispositivo que anula la correspondencia debida a los espaciamientos causados por la tara fija en la trama de OTUk.....	57
Apéndice VI – Funciones atómicas de la OTN	59
VI.1 Introducción	59

Introducción

En una OTN, la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase se acumulan en los trayectos de transmisión de acuerdo con las características de generación y de transferencia de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase de cada uno de los equipos interconectados. Estos equipos pueden ser, por ejemplo, regeneradores 3R, dispositivos del cliente que establecen la correspondencia y dispositivos del cliente que la anulan/desincronizadores.

Una cantidad excesiva de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase puede afectar adversamente tanto a las señales digitales (por ejemplo, por generación de errores de bit, deslizamientos de trama y otras anomalías) como a las señales de banda de base analógicas (por ejemplo, por modulación de fase no deseada de la señal transmitida). Las consecuencias de esas degradaciones dependerán, en general, del servicio concreto que se transporta y del equipo de terminación o adaptación que interviene.

Por consiguiente, es necesario, fijar límites a la cantidad máxima de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase, y a la correspondiente tolerancia mínima a la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase en las interfaces de red, para garantizar una calidad adecuada de las señales transmitidas y un diseño adecuado de los equipos.

Estos límites de red son independientes del servicio concreto que se transporta.

Recomendación UIT-T G.8251

Control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase en la red óptica de transporte

1 Alcance

El objeto de esta Recomendación UIT-T es definir los parámetros y los límites necesarios para un control eficaz de la cantidad de fluctuación lenta y fluctuación lenta de fase presentes en las interfaces red-nodo (NNI, *network-node interface*) de la OTN.

Las interfaces de red OTN, a las que se aplica la presente Recomendación UIT-T, se definen en términos de velocidades binarias y estructuras de trama en la Rec. UIT-T G.709; las características pertinentes de los equipos se describen en la Rec. UIT-T G.798 y las características ópticas en la Rec. UIT-T G.959.1. La Rec. UIT-T G.872 contiene información adicional sobre la arquitectura de la OTN.

Los límites de red dados en la cláusula 5, las especificaciones de la tolerancia de las interfaces de OTN de 6.1 y las especificaciones de las interfaces de los equipos de la OTN del anexo A se refieren a la interfaz de OTUk. Las velocidades binarias pertinentes de esas especificaciones son las velocidades binarias de la OTUk. Se señala que algunos de los demás requisitos de la presente Recomendación, por ejemplo, los del reloj con el que se anula la correspondencia (ODCp, *demapper clock*), el reloj asíncrono con el que se establece la correspondencia (ODCa, *asynchronous mapper clock*) y el reloj con el que se establece la correspondencia síncrona de bits (ODCb, *bit-synchronous mapper clock*) del anexo A, se aplican a otras interfaces y otras velocidades binarias (es decir, el dispositivo que anula la correspondencia reside en la función de adaptación del sumidero que se halla entre el ODUkP y el cliente CBR, mientras que los relojes del dispositivo que establece la correspondencia asíncrona y síncrona de bits residen entre la función de adaptación de la fuente que se halla entre el ODUkP y el cliente). En esta Recomendación, cuando el término *reloj* se utiliza para referirse a un reloj de ODU (ODC), se está haciendo referencia a una fuente de frecuencia.

No se requiere que la capa física de la OTN transporte sincronización de red. Más exactamente, no es necesario que la ODUk ni ninguna de las capas por debajo de ella transporten sincronización. *La distribución de la sincronización de red es una función de la capa del cliente, por ejemplo, la SDH.* La Rec. UIT-T G.825 contiene los requisitos relativos a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase para los clientes SDH y cualquier señal de la SDH (que debe cumplir las especificaciones de la Rec. UIT-T G.825) sirve para proporcionar la sincronización (véase la Rec. UIT-T G.803). Los clientes SDH deben cumplir los requisitos de la Rec. UIT-T G.825 en lo relativo al establecimiento de la correspondencia tanto asíncrona como síncrona binaria.

En la Rec. UIT-T G.825 se especifican los requisitos en la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase para redes de la SDH. En la Rec. UIT-T G.823 se especifican los requisitos de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase para redes de la PDH y de sincronización, para las redes basadas en la velocidad binaria de primer nivel de 2048 kbit/s, y en la Rec. UIT-T G.824, en el caso de redes basadas en la velocidad binaria de primer nivel de 1544 kbit/s.

Los principios del control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase responden a la necesidad de:

- recomendar un límite de red máximo que no debe rebasarse en ninguna NNI de OTN pertinente;
- recomendar un marco coherente para la especificación de los distintos equipos digitales (es decir, para la especificación de los requisitos relativos a la transferencia, tolerancia y generación de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase);

- facilitar informaciones y directrices suficientes para que las organizaciones pertinentes puedan medir y estudiar la acumulación de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase en cualquier configuración de red.

Se señala que pueden existir tipos de NE híbridos que contienen funciones atómicas de SDH y OTN. Quizá esos NE híbridos no puedan acceder a los correspondientes puertos para efectuar mediciones con las que verificar el cumplimiento de los requisitos indicados en la presente Recomendación. Las mediciones de verificación de la conformidad de los tipos de NE híbridos quedan fuera del alcance de la presente Recomendación.

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] Recomendación UIT-T G.709/Y.1331 (2001), *Interfaces para la red de transporte óptica.*
- [2] Recomendación UIT-T G.798 (2002), *Características de los bloques funcionales del equipo de la jerarquía de la red óptica de transporte.*
- [3] Recomendación UIT-T G.959.1 (2001), *Interfaces de capa física de red óptica de transporte.*
- [4] Recomendación UIT-T G.825 (2000), *Control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase en las redes digitales basadas en la jerarquía digital síncrona.*
- [5] Recomendación UIT-T G.783 (2000), *Características de los bloques funcionales del equipo de la jerarquía digital síncrona.*
- [6] Recomendación UIT-T G.810 (1996), *Definiciones y terminología para redes de sincronización.*
- [7] Recomendación UIT-T G.823 (2000), *Control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase en las redes digitales basadas en la jerarquía de 2048 kbit/s.*
- [8] Recomendación UIT-T G.824 (2000), *Control de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase en las redes digitales basadas en la jerarquía de 1544 kbit/s.*
- [9] Recomendación UIT-T G.707/Y.1322 (2000), *Interfaz de nodo de red para la jerarquía digital síncrona.*
- [10] Recomendación UIT-T G.872 (2002), *Arquitectura de las redes de transporte ópticas.*
- [11] Recomendación UIT-T O.171 (1997), *Aparato de medida de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase de la temporización para sistemas digitales basados en la jerarquía digital plesiócrona.*
- [12] Recomendación UIT-T O.172 (2001), *Aparato de medida de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase para sistemas digitales basados en la jerarquía digital síncrona.*
- [13] Recomendación UIT-T G.803 (2000), *Arquitectura de redes de transporte basadas en la jerarquía digital síncrona.*
- [14] Recomendación UIT-T G.811 (1997), *Características de temporización de los relojes de referencia primarios.*

3 Definiciones

Los términos y definiciones utilizados en esta Recomendación que se refieren a temporización y fluctuación de fase están contenidos en las Recomendaciones UIT-T G.810 y G.825. Los términos y definiciones utilizados en esta Recomendación que se refieren a la OTN están contenidos en las Recomendaciones UIT-T G.709, G.798 y G.872. Los términos y definiciones utilizados en esta Recomendación que se refieren a la SDH están contenidos en las Recomendaciones UIT-T G.707, G.783 y G.803.

4 Abreviaturas y acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes siglas.

3R	Reamplificación, reconfiguración y retemporización (<i>reamplification, reshaping and retiming</i>)
A	Adaptación
AI	Información adaptada (<i>adapted information</i>)
AIS	Señal de indicación de alarma (<i>alarm indication signal</i>)
AP	Punto de acceso (<i>access point</i>)
CBR	Velocidad binaria constante (<i>constant bit rate</i>)
CI	Información característica (<i>characteristic information</i>)
CK	Reloj (<i>clock</i>)
CP	Punto de conexión (<i>connection point</i>)
D	Datos
FEC	Corrección de errores hacia adelante (<i>forward error correction</i>)
MC	Reloj maestro (<i>master clock</i>)
MTIE	Máximo error en el intervalo de tiempo (<i>maximum time interval error</i>)
NE	Elemento de red (<i>network element</i>)
NNI	Interfaz de modo de red (<i>network node interface</i>)
OA	Amplificador óptico (<i>optical amplifier</i>)
OCh	Canal óptico con funcionalidad completa (<i>optical channel with full functionality</i>)
OChr	Canal óptico con funcionalidad reducida (<i>optical channel with reduced functionality</i>)
ODC	Reloj de ODUk (<i>ODUk clock</i>)
ODCx	Reloj de ODUk de tipo x, donde "x" es "a", "b", "r" o "p"
ODU	Unidad de datos de canal óptico (<i>optical channel data unit</i>)
ODUk	Unidad k de datos de canal óptico (<i>optical channel data unit-k</i>)
ODUkP	Trayecto de ODUk (<i>ODUk path</i>)
ODUkT	Conexión en cascada de ODUk (<i>ODUk tandem connection</i>)
OMS	Sección múltiplex óptica (<i>optical multiplex section</i>)
OPU	Unidad de carga útil de canal óptico (<i>optical channel payload unit</i>)
OPUk	Unidad k de carga útil de canal óptico (<i>optical channel payload unit-k</i>)
OTM	Módulo de transporte óptico (<i>optical transport module</i>)
OTN	Red óptica de transporte (<i>optical transport network</i>)
OTS	Sección de transmisión óptica (<i>optical transmission section</i>)
OTU	Unidad de transporte de canal óptico (<i>optical channel transport unit</i>)

OTUk	Unidad k de transporte de canal óptico completamente normalizada (<i>completely standardized optical channel transport unit-k</i>)
PDH	Jerarquía digital plesiócrona (<i>plesiochronous digital hierarchy</i>)
PI	Proporcional más integral (<i>proportional plus integral</i>)
PLL	Bucle de enganche de fase (<i>phase-locked loop</i>)
PMD	Dispersión por modo de polarización (<i>polarization mode dispersion</i>)
ppm	partes por millón
PRBS	Secuencia binaria pseudoaleatoria (<i>pseudo-random binary sequence</i>)
PRC	Reloj de referencia primario (<i>primary reference clock</i>)
PSD	Densidad espectral de potencia (<i>power spectral density</i>)
rms	valor cuadrático medio (<i>root mean square</i>)
RS	Reed-Solomon
SDH	Jerarquía digital síncrona (<i>synchronous digital hierarchy</i>)
SEC	Reloj de equipo de SDH (<i>SDH equipment clock</i>)
Sk	Sumidero (<i>sink</i>)
So	Fuente (<i>source</i>)
SSU	Unidad de suministro de sincronización (<i>synchronization supply unit</i>)
STM	Módulo de transporte síncrono (<i>synchronous transport module</i>)
STM-N	Módulo de transporte síncrono – nivel N (<i>synchronous transport module – level N</i>)
TCP	Punto de conexión de terminación (<i>termination connection point</i>)
TDEV	Desviación de tiempo (<i>time deviation</i>)
UI	Intervalo unitario (<i>unit interval</i>)
UIpp	Intervalo unitario, cresta a cresta (<i>unit interval peak-to-peak</i>)
UTC	Tiempo Universal Coordinado (<i>coordinated universal time</i>)
VCO	Oscilador controlado por tensión (<i>voltage-controlled oscillator</i>)
WFM	Modulación de frecuencia por ruido blanco (<i>white frequency modulation</i>)
WPM	Modulación de fase de ruido blanco (<i>white phase modulation</i>)

5 Límites de red para la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase máxima a la salida en una interfaz de OTUk

Los límites de la fluctuación de fase y de la fluctuación lenta de fase indicados en esta cláusula son los niveles máximos permisibles en las interfaces de OTUk dentro de una OTN. La interfaz de OTUk se halla justo debajo de la función de adaptación OCh/OTUk de la figura 1-3/G.798 [2]. Un ejemplo de esta interfaz es la entrada a un regenerador 3R (sumidero) o la salida de un regenerador 3R (fuente).

NOTA – La OTUk se define de manera precisa en la Rec. UIT-T G.709; se trata básicamente de la señal digital cuya correspondencia se establece en el canal óptico (OCh, *optical channel*). La velocidad binaria de OTUk es básicamente la velocidad de línea asociada con el OCh y la longitud de onda correspondiente a la que se asigna el OCh. En el cuadro 7-1/G.709 se dan las velocidades binarias de OTUk, que son iguales a la inversa de los periodos binarios indicados en el cuadro 1.

Cuadro 1/G.8251 – Máxima fluctuación de fase permisible en interfaces de OTUk

Interfaz	Anchura de banda de medición, frecuencias (Hz) de –3 dB	Amplitud cresta a cresta (UIpp)
OTU1	5 k a 20 M	1,5
	1 M a 20 M	0,15
OTU2	20 k a 80 M	1,5
	4 M a 80 M	0,15
OTU3	20 k a 320 M	6,0
	16 M a 320 M	0,15
NOTA – OTU1	1 UI = $\frac{238}{(255)(2,48832)}$ ns = 375,1 ps	
OTU2	1 UI = $\frac{237}{(255)(9,95328)}$ ns = 93,38 ps	
OTU3	1 UI = $\frac{236}{(255)(39,81312)}$ ns = 23,25 ps	

5.1 Límites de red para la fluctuación de fase

El cuadro 1 da los niveles máximos permisibles de la fluctuación de fase en las interfaces de OTUk. La fluctuación de fase medida en un intervalo de 60 segundos no deberá rebasar los límites indicados en el cuadro 1 cuando se utilicen los filtros de medición especificados. Los límites deberán cumplirse para todas las condiciones operacionales y cualquiera que sea la cantidad de equipos que precedan a la interfaz. En general, estos límites de red son compatibles con la tolerancia mínima a la fluctuación de fase que todos los puertos de entrada a los equipos deben proporcionar. En el apéndice I se dan directrices para la obtención de los valores de los parámetros del cuadro 1.

Existe una estrecha relación entre los límites de red y la tolerancia a la entrada, por lo cual las frecuencias de corte de los filtros de medición de la fluctuación de fase utilizadas en el cuadro 1 tienen los mismos valores que las frecuencias esquina de la máscara de tolerancia a la fluctuación de fase utilizadas en 6.1. En el apéndice I se da más información sobre de esta relación.

Los filtros de medición paso alto del cuadro 1 tienen una característica de primer orden y un régimen de caída de 20 dB/década. Los filtros de medición paso bajo tienen una característica Butterworth lo más uniforme posible y un régimen de caída de –60 dB/década.

5.2 Límites de red para la fluctuación lenta de fase

Las interfaces de OTUk no son interfaces de sincronización. Ninguno de los relojes de ODUk es fuente significativa de fluctuación lenta de fase. No es necesario especificar los límites de la fluctuación lenta de fase de la red.

6 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces de red

6.1 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces de OTN

En esta cláusula se especifica la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de los puertos de entrada de una OTUk. Se trata de las fluctuaciones de fase y lenta de fase mínimas que deben ser toleradas a la entrada de la función atómica OCh/OTUk_A_Sk. Esto representa, por ejemplo, la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de un regenerador 3R. Los puertos de entrada de todos los equipos deben ser capaces de aceptar niveles de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase de por lo menos los límites mínimos definidos en las 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3 para garantizar que, en general, cualquier equipo puede ser conectado a cualquier interfaz apropiada dentro de una red.

NOTA 1 – Como se ha indicado anteriormente, los requisitos en materia de tolerancia tanto a la fluctuación de fase como a la fluctuación lenta de fase se aplican en el puerto de entrada de una OTUk, que es el puerto de entrada a la función atómica OCh/OTUk_A_Sk. No obstante, aunque los requisitos se aplican en esa interfaz, no todos ellos vienen regidos por dicha función atómica. Por ejemplo, el requisito de tolerancia a la fluctuación de fase de banda alta (es decir, la tolerancia por encima del punto de discontinuidad de la frecuencia más alto, que es de 1 MHz para OTU1, 4 MHz para OTU2 y 16 MHz para OTU3) lo impone el circuito de recuperación de reloj de banda ancha en la función atómica OCh/OTUk_A_Sk; sin embargo, el requisito de tolerancia a la fluctuación de fase de banda ancha (es decir, la tolerancia entre 5 kHz y 100 kHz para OTU1 y entre 20 kHz y 400 kHz para OTU2 y OTU3) lo impone el ODCr en las funciones atómicas OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk.

La tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de una interfaz de OTUk indica el nivel mínimo de ruido de fase que el puerto de entrada deberá aceptar sin que:

- se provoquen alarmas;
- se provoquen deslizamientos o pérdida de sincronización en el bucle de enganche de fase de recuperación del reloj; y
- se provoquen errores de bit por encima de lo permitido por una penalización de potencia óptica equivalente de 1 dB.

El límite de la fluctuación de fase a la entrada tolerable se mide aplicando el método de la penalización de potencia óptica de 1 dB como sigue:

La potencia de entrada óptica se reduce hasta alcanzar una BER de 10^{-10} . A continuación se incrementa la potencia en 1 dB y se aplica fluctuación de fase a la señal de entrada. La cantidad de fluctuación de fase que genera una BER de 10^{-10} es el límite de la fluctuación de fase tolerable a la entrada. Si el sistema utiliza la FEC, ésta será inhabilitada durante la medición cuando se emplee un detector de errores de bit externo. De manera alternativa, se puede medir la BER dejando la FEC habilitada y contando el número de errores de bit corregidos por unidad de tiempo.

NOTA 2 – Esta definición requiere un estudio ulterior en el que se tengan en cuenta los efectos de, por ejemplo, los amplificadores ópticos (OA, *optical amplifiers*), la dispersión por modo de polarización (PMD, *polarisation mode dispersion*) y la corrección de errores hacia adelante (FEC, *forward error correction*).

Todos los puertos de entrada de una OTUk de los equipos deberán poder tolerar una señal OCh_AI_D que tenga:

- a) las características ópticas de la Rec. UIT-T G.959.1;
- b) un desplazamiento de frecuencia (con relación al valor nominal) comprendido en la gama definida en A.3;
- c) una desviación de fase sinusoidal que tenga una característica de amplitud/frecuencia, definida en las cláusulas siguientes, que indique los límites adecuados para las diferentes interfaces.

En principio, estos requisitos deberán cumplirse cualquiera que sea el contenido de información de la señal digital. Sin embargo, para fines de pruebas, el contenido de la señal con modulación por la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase debe ser una señal de prueba estructurada como se especifica en la Rec. UIT-T G.709.

Por razones de conveniencia para la realización de pruebas, la tolerancia requerida se define en términos de amplitud de cresta a cresta y frecuencia de la fluctuación de fase sinusoidal que modula una señal digital patrón de prueba digital. Es importante reconocer que no se pretende que esta condición de prueba sea, por sí misma, representativa del tipo de fluctuación de fase que se encuentra en la práctica en una red.

En el apéndice III/G.823 se dan directrices sobre el montaje utilizado para la medición de la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase a la entrada.

En las subcláusulas que siguen se indican los requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase para cada velocidad de OTUk. Dichos requisitos especifican los niveles mínimos de fluctuación de fase que han de ser aceptados en una interfaz de OTUk.

6.1.1 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU1

El nivel de fluctuación de fase sinusoidal que deben aceptar las interfaces de OTU1 se especifica en el cuadro 2 y se ilustra en la figura 1. Un bucle de enganche de fase con frecuencia esquina igual o superior a 5 kHz que puede tolerar la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por la porción inclinada de 20 dB/década de la máscara entre 500 Hz y 5 kHz tolerará también la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por una ampliación de la zona inclinada a frecuencias más bajas, porque esa fluctuación de fase y esa fluctuación lenta de fase se hallan dentro de la anchura de banda del bucle de enganche de fase. Las interfaces de OTU1 deben tolerar estas fluctuaciones de fase y lenta de fase pero, por razones prácticas, no se exige que se midan por debajo de 500 Hz.

Cuadro 2/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada de OTU1

Frecuencia f (Hz)	Amplitud cresta a cresta (UIpp)
$500 < f \leq 5 \text{ k}$	$7500 f^{-1}$
$5 \text{ k} < f \leq 100 \text{ k}$	1,5
$100 \text{ k} < f \leq 1 \text{ M}$	$1,5 \times 10^5 f^{-1}$
$1 \text{ M} < f \leq 20 \text{ M}$	0,15

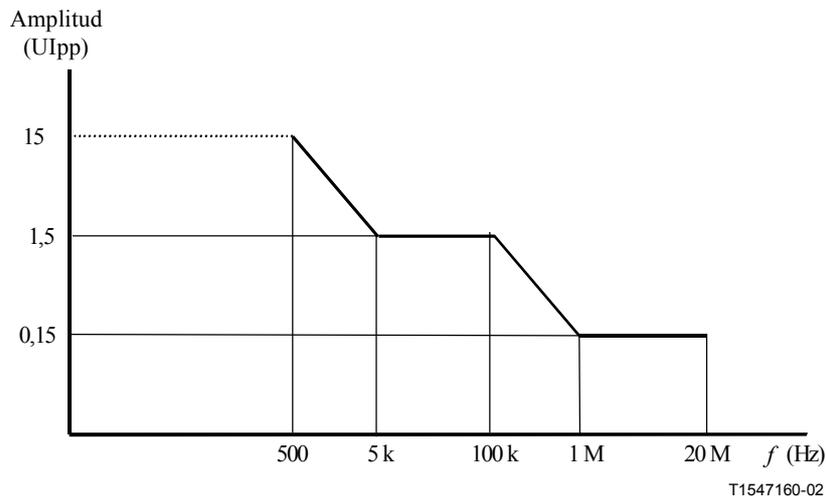


Figura 1/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada de OTU1

6.1.2 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU2

El nivel de fluctuación de fase sinusoidal que deben aceptar las interfaces de OTU2 se especifica en el cuadro 3 y se ilustra en la figura 2. Un bucle de enganche de fase con frecuencia esquina igual o superior a 20 kHz que puede tolerar la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por la porción inclinada de 20 dB/década de la máscara entre 2 kHz y 20 kHz tolerará también la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por una ampliación de la zona inclinada a frecuencias más bajas, porque esa fluctuación de fase y esa fluctuación lenta de fase se hallan dentro de la anchura de banda del bucle de enganche de fase. Las interfaces de OTU2 deben tolerar estas fluctuaciones de fase y lenta de fase pero, por razones prácticas, no se exige que se midan por debajo de 2 kHz.

Cuadro 3/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada de OTU2

Frecuencia f (Hz)	Amplitud cresta a cresta (UIpp)
$2\text{ k} < f \leq 20\text{ k}$	$3,0 \times 10^4 f^{-1}$
$20\text{ k} < f \leq 400\text{ k}$	1,5
$400\text{ k} < f \leq 4\text{ M}$	$6,0 \times 10^5 f^{-1}$
$4\text{ M} < f \leq 80\text{ M}$	0,15

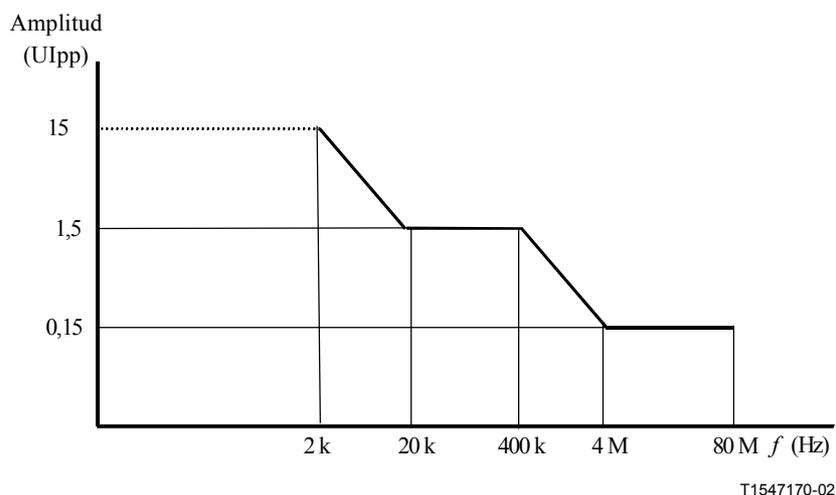


Figura 2/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal de OTU2

6.1.3 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de OTU3

El nivel de fluctuación de fase sinusoidal que deben aceptar las interfaces de OTU3 se especifica en el cuadro 4 y se ilustra en la figura 3. Un bucle de enganche de fase con frecuencia esquina igual o superior a 20 kHz que puede tolerar la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por la porción inclinada de 20 dB/década de la máscara entre 8 kHz y 20 kHz tolerará también la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase indicadas por una ampliación de la zona inclinada a frecuencias más bajas, porque esa fluctuación de fase y esa fluctuación lenta de fase se hallan dentro de la anchura de banda del bucle de enganche de fase. Las interfaces de OTU3 deben tolerar estas fluctuaciones de fase y lenta de fase pero, por razones prácticas, no se exige que se midan por debajo de 8 kHz.

Cuadro 4/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada de OTU3

Frecuencia f (Hz)	Amplitud cresta a cresta (UIpp)
$8 \text{ k} < f \leq 20 \text{ k}$	$1,2 \times 10^5 f^{-1}$
$20 \text{ k} < f \leq 400 \text{ k}$	6,0
$400 \text{ k} < f \leq 16 \text{ M}$	$2,4 \times 10^6 f^{-1}$
$16 \text{ M} < f \leq 320 \text{ M}$	0,15

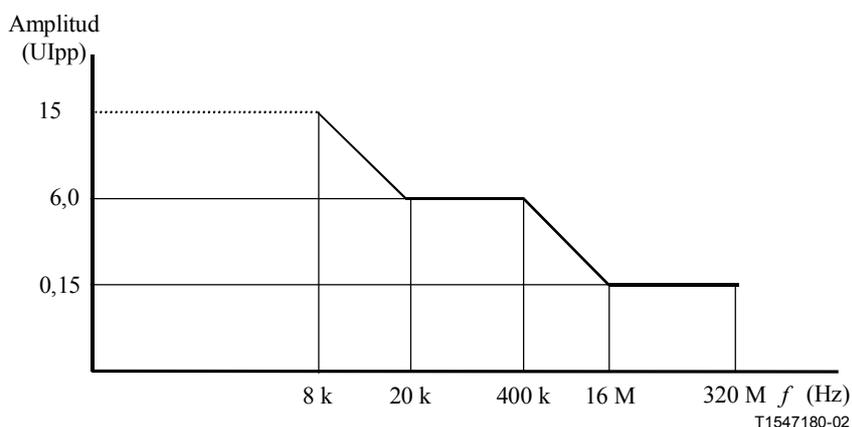


Figura 3/G.8251 – Límite de la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada de OTU3

6.2 Tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de las interfaces del cliente CBR2G5, CBR10G y CBR40G

Los requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase para CBR2G5, CBR10G y CBR40G se obtienen a partir de los requisitos correspondientes para las señales STM-16 y STM-64, respectivamente, que se dan en la Rec. UIT-T G.825.

NOTA – Los requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase y los límites de red para las señales STM-256 no se indican actualmente en la Rec. UIT-T G.825; sin embargo, se prevé que figuren en ediciones futuras de la Rec. UIT-T G.825.

Los puertos de entrada al STM, es decir, entrada a las funciones atómicas ODUkP/CBRx-a_A_So y ODUkP/CBRx-b_A_So, en el caso en que el cliente STM es STM-16, STM-64, o STM-256, deben tolerar los niveles de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase especificados en la Rec. UIT-T G.825. En el apéndice III/G.823 se dan directrices para la medición de la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase a la entrada de las interfaces de entrada a los equipos.

Anexo A

Especificación del reloj de ODUk (ODC)

A.1 Alcance

El presente anexo contiene los requisitos del reloj de ODUk (ODC, *ODUk clock*). El término *reloj* se refiere aquí a un circuito de filtrado y/o generación de reloj. Se han definido cuatro tipos de ODC, para diferentes aplicaciones (véase A.2):

- 1) ODCa para el establecimiento de la correspondencia asíncrona de los clientes en ODUk;
- 2) ODCb para el establecimiento de la correspondencia síncrona de bits de los clientes en ODUk;
- 3) ODCr para regeneración 3R; y
- 4) ODCp para la anulación de la correspondencia de los clientes a velocidad binaria constante (CBR, *constant bit rate*).

El ODCa y el ODCb generan la señal de temporización de las señales de ODUk y OTUk producidas por un elemento de red OTN. El ODCr genera la señal de temporización de la OTUk producida por un regenerador 3R. El ODCp genera la señal de temporización de la señal de un cliente CBR con correspondencia anulada.

Los cuatro tipos de ODC, las funciones atómicas en que residen y los requisitos que les son aplicables se presentan de forma resumida en el cuadro A.1. Los requisitos se describen con más detalle en las cláusulas que siguen.

Cuadro A.1/G.8251 – Resumen de tipos de reloj de ODUk (ODC)

	ODCa	ODCb	ODCr	ODCp
Función atómica	ODUkP/CBRx-a_A_So ODUkP/ATM_A_So ODUkP/GFP_A_So ODUkP/NULL_A_So ODUkP/PRBS_A_So ODUkP/non-specific-client-bitstream_A_So	ODUkP/CBRx-b_A_So	OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk (es decir, los relojes de estas funciones atómicas están concentrados en un solo ODCr; véase la Rec. UIT-T G.798)	ODUkP/CBRx_A_Sk
Exactitud de la frecuencia	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm
Modo libre soportado	sí	sí	sí	sí
Modo enganchado soportado	no	sí	sí	sí
Modo retención soportado	no	no	no	no
Gama de tiro hacia adentro	NA	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm
Gama de tiro hacia afuera	NA	±20 ppm	±20 ppm	±20 ppm
Generación de fluctuación de fase	Cuadro A.2	Cuadro A.2	Cuadro A.2	Cuadro A.3
Generación de fluctuación lenta de fase	NA	NA (nota 1)	NA	NA (nota 2)
Tolerancia a la fluctuación de fase	NA	Rec. UIT-T G.825	Cuadro 2, figura 1 (OTU1) Cuadro 3, figura 2 (OTU2) Cuadro 4, figura 3 (OTU3)	Cuadro 2, figura 1 (OTU1) Cuadro 3, figura 2 (OTU2) Cuadro 4, figura 3 (OTU3)
Tolerancia a la fluctuación lenta de fase	NA	Rec. UIT-T G.825	Cláusula 6.1	Cláusula 6.1

Cuadro A.1/G.8251 – Resumen de tipos de reloj de ODUk (ODC)

	ODCa	ODCb	ODCr	ODCp
Transferencia de fluctuación de fase	NA	Anchura de banda máxima: ODU1: 1 kHz ODU2: 4 kHz ODU3: 16 kHz Puntas de ganancia máxima: 0,1 dB para ODU1, 2 y 3 (véanse el cuadro A.4 y la figura A.1)	Anchura de banda máxima: OTU1: 250 kHz OTU2: 1000 kHz OTU3: 4000 kHz Puntas de ganancia máxima: 0,1 dB para OTU1, 2 y 3 (véanse el cuadro A.5 y la figura A.1)	Anchura de banda máxima: 300 Hz para ODU1, 2 y 3 Puntas de ganancia máxima: 0,1 dB para ODU1, 2 y 3 (véase A.6.3)
Señal de salida cuando se pierde la señal de entrada	AIS (cliente SDH) OTUk: sin obtención de trama OTUk: frecuencia inalterada	AIS (cliente SDH) OTUk: sin obtención de trama OTUk: cambio de frecuencia inicial ≤ 9 ppm	AIS (OTUk) OTUk: obtención de trama permitida Desplazamiento de frecuencia de OTUk temporal >20 ppm permitido	AIS (cliente SDH) Desplazamiento de frecuencia ≤ 20 ppm

NA No hay ningún requisito porque no es aplicable

NOTA 1 – Se prevé que la generación de fluctuación lenta de fase del ODCb sea irrelevante en comparación con la fluctuación lenta de fase en la señal del cliente CBR (por ejemplo, SDH) a la entrada, porque la anchura de banda del ODCb es relativamente amplia.

NOTA 2 – La generación de fluctuación lenta de fase intrínseca del ODCp es irrelevante en comparación con la fluctuación lenta de fase generada por el proceso de anulación de la correspondencia.

Las señales de temporización de entrada en las capas más bajas se derivan de la ODUkP_AI_CK (es decir, de la salida del ODCa, ODCb u ODCr) por multiplicación de la frecuencia. Por ejemplo, la señal de temporización de OTUk es la OTUk_AI_CK, que es la salida de la función atómica OTUk/ODUk_A_So (véase 13.3.1.1/G.798). Esta señal se deriva de la ODUk_CI_CK (información característica de la ODUk y tiene la misma frecuencia que la ODUkP_AI_CK) por multiplicación de la frecuencia por 255/239. La OTUk_AI_CK proporciona la entrada de temporización a la función atómica OCh/OTUk_A_So, cuya salida es la señal de datos OCh (OCh_AI_D).

NOTA – En el caso de establecimiento de la correspondencia asíncrona, no es necesario un único reloj maestro, esto es, un solo ODCa, en los equipos de la OTN. En dichos equipos puede haber múltiples relojes ODCa independientes para cada longitud de onda saliente (es decir, para la fuente de cada OCh, OTUk y ODUk). En el caso de establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, regeneración 3R y anulación de la correspondencia no puede haber un reloj maestro único para múltiples OCh, lo que significa que, un ODCb, ODCr u ODCp suministra la temporización para un cliente ODUk, OTUk o CBR único, respectivamente.

A.2 Aplicaciones

El ODCa y el ODCb se utilizan para establecer la correspondencia entre la cabida útil y la señal ODUk, el ODCr se utiliza para la regeneración 3R y el ODCp se utiliza en el dispositivo que anula la correspondencia CBR.

El ODCa, utilizado para el establecimiento de la correspondencia asíncrona, funciona de manera libre y el desplazamiento de la velocidad binaria se acomoda mediante un relleno controlado apropiadamente.

El ODCb, utilizado para el establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, está enganchado a la velocidad binaria de la señal de cabida útil entrante y el desplazamiento de la velocidad binaria se acomoda mediante un patrón de relleno fijo. El funcionamiento síncrono continúa incluso si el contenido de la cabida útil recibida es AIS. Si la señal entrante falla, el ODC pasa a la condición de funcionamiento libre.

El ODCr, utilizado para la regeneración 3R, está enganchado a la velocidad binaria de la señal OCh_AP entrante (que incluye AIS). Si la señal entrante falla, el ODC pasa a la condición de funcionamiento libre.

El ODCp, utilizado para el dispositivo que anula la correspondencia CBR, está enganchado a la velocidad binaria del reloj de OPUk espaciado (es decir, la temporización de la señal que resulta de tomar la cabida útil de OPUk y aplicar el control de justificación). Si la señal entrante falla, el ODCp pasa a la condición de funcionamiento libre.

A.3 Exactitud de la frecuencia

En condiciones de funcionamiento libre, la exactitud de la frecuencia de salida del ODCa, ODCb, ODCr y ODCp no deberá ser peor que 20 ppm con respecto a la referencia rastreable de un reloj de la Rec. UIT-T G.811.

A.4 Gamas de tiro hacia adentro y hacia afuera

A.4.1 Gama de tiro hacia adentro

La gama de tiro hacia adentro mínima del ODCb, ODCr y ODCp será de ± 20 ppm, cualquiera que sea el desplazamiento de frecuencia del oscilador interno. No hay ningún requisito con respecto a la gama de tiro hacia adentro del ODCa porque está en funcionamiento libre.

A.4.2 Gama de tiro hacia afuera

La gama de tiro hacia afuera mínima del ODCb, ODCr y ODCp será de ± 20 ppm, cualquiera que sea el desplazamiento de frecuencia del oscilador interno. No hay ningún requisito con respecto a la gama de tiro hacia afuera del ODCa porque está en funcionamiento libre.

A.5 Generación de ruido

Esta cláusula limita la fluctuación de fase y la fluctuación lenta de fase a la salida de cada tipo de reloj aplicable, en ausencia de cualquier fluctuación de fase o fluctuación lenta de fase a la entrada. Téngase en cuenta que las señales de entrada y salida correspondientes dependen del tipo de reloj, porque los tipos de reloj diferentes están situados en funciones atómicas diferentes.

A.5.1 Generación de fluctuación de fase

A.5.1.1 Generación de fluctuación de fase del ODCa, ODCb y ODCr

En ausencia de fluctuación de fase a la entrada, la fluctuación de fase a la salida del ODCa y el ODCb, es decir, la señal ODUkP_AI_C, no deberá rebasar los valores especificados en el cuadro A.2 cuando se mida en un intervalo de 60 segundos con los filtros de medición especificados en ese cuadro. Puesto que el ODCa está en funcionamiento libre, no hay por definición fluctuación de fase a la entrada. Para el ODCb, la señal que está libre de fluctuación de fase es la señal del cliente de entrada.

Cuadro A.2/G.8251 – Requisitos de la generación de fluctuación de fase del ODCa, ODCb y ODCr

Interfaz	Anchura de banda de medición, frecuencias de -3 dB (Hz)	Amplitud cresta a cresta (UIpp) (nota 2)
ODU1, OTU1	5 k a 20 M	0,3
	1 M a 20 M	0,1
ODU2, OTU2	20 k a 80 M	0,3
	4 M a 80 M	0,1
ODU3, OTU3	20 k a 320 M	1,2 (nota 1)
	16 M a 320 M	0,1
NOTA 1 – Para más información, véase IV.4.		
NOTA 2 – OTU1	$1 \text{ UI} = \frac{238}{(255)(2,48832)} \text{ ns} = 375,1 \text{ ps}$	
OTU2	$1 \text{ UI} = \frac{237}{(255)(9,95328)} \text{ ns} = 93,38 \text{ ps}$	
OTU3	$1 \text{ UI} = \frac{236}{(255)(39,81312)} \text{ ns} = 23,25 \text{ ps}$	

En ausencia de fluctuación de fase a la entrada de un regenerador 3R (es decir, a la función atómica OCh/OTUk_A_Sk), la fluctuación de fase a la salida en la información de reloj de la señal OCh_AI_D procedente de la función atómica OCh/OTUk_A_So no deberá rebasar los valores especificados en el cuadro A.2 cuando se mida en un intervalo de 60 segundos con los filtros de medición especificados en ese cuadro. La señal que debe estar libre de fluctuación de fase a la entrada cuando se efectúa esta medición es la señal OCh_AI_D que entra en la función atómica OCh/OTUk_A_Sk correspondiente. De manera específica, la información que no debe tener fluctuación de fase a la entrada es la información de reloj de esta señal.

NOTA – Lo anterior es, de hecho, un requisito aplicable a la generación de fluctuación de fase de un regenerador 3R; restringe la generación de fluctuación de fase total en todas las funciones atómicas de OCh/OTUk_A_Sk a OCh/OTUk_A_So (inclusive). El ODCr está incluido aquí porque reside en las funciones atómicas OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk (es decir, los relojes de estas funciones atómicas están concentrados en un solo ODCr; véase la Rec. UIT-T G.798).

A.5.1.2 Generación de fluctuación de fase del ODCp

En ausencia de fluctuación de fase a la entrada, la fluctuación de fase a la salida del ODCp, es decir, la señal STM_CI_CK, no deberá rebasar los valores especificados en el cuadro A.3 cuando se mida en un intervalo de 60 segundos con los filtros de medición especificados en ese cuadro. Se señala que la salida se produce en la interfaz CBRx_CP. Los requisitos se cumplirán cuando la frecuencia de entrada del cliente STM-N sea constante dentro de los límites de –20 ppm a +20 ppm con respecto a la frecuencia nominal.

Uno de los objetivos de los requisitos de la generación de fluctuación de fase de banda ancha del ODCp es asegurar que los espaciamientos debidos a la tara fija en la trama de OTUk no provoquen una fluctuación de fase excesiva a la salida. La cláusula V.3 contiene más información adicional sobre este asunto.

Cuadro A.3/G.8251 – Requisitos de la generación de fluctuación de fase del ODCp

Interfaz	Anchura de banda de medición, frecuencias de –3 dB (Hz)	Amplitud cresta a cresta (UIpp) (nota 2)
STM-16	5 k a 20 M	1,0
	1 M a 20 M	0,1
STM-64	20 k a 80 M	1,0
	4 M a 80 M	0,1
STM-256	80 k a 320 M (nota 1)	1,0
	16 M a 320 M	0,1
NOTA 1 – Los valores para STM-256 son provisionales y no figuran en la Rec. UIT-T G.825 en la fecha de publicación de esta Recomendación.		
NOTA 2 – OTU1	$1 \text{ UI} = \frac{238}{(255)(2,48832)} \text{ ns} = 375,1 \text{ ps}$	
OTU2	$1 \text{ UI} = \frac{237}{(255)(9,95328)} \text{ ns} = 93,38 \text{ ps}$	
OTU3	$1 \text{ UI} = \frac{236}{(255)(39,81312)} \text{ ns} = 23,25 \text{ ps}$	

A.5.2 Generación de fluctuación lenta de fase

No hay requisitos relativos a la generación de fluctuación lenta de fase del ODCa, ODCb, ODCr y ODCp. En el caso del ODCb, se prevé que cualquier generación de fluctuación lenta de fase intrínseca será irrelevante en comparación con la fluctuación lenta de fase de la señal del cliente CBR (por ejemplo, SDH) a la entrada, porque la anchura de banda del ODCb es relativamente amplia. La generación de fluctuación lenta de fase intrínseca del ODCp carece de importancia en comparación con la fluctuación lenta de fase generada por el proceso de anulación de la correspondencia.

A.6 Tolerancia al ruido

En esta cláusula se especifica la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase del ODCb, ODCr y ODCp. No hay requisitos relativos a la tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase del ODCa porque el ODCa está en funcionamiento libre.

El ODCb debe satisfacer los mismos requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase que las interfaces del cliente STM-16, STM-64 y STM-256 (la entrada a la función atómica ODUkP/CBRx-b_A_So). Estos requisitos se indican en 6.2, en donde se hace referencia a la Rec. UIT-T G.825. Se señala que el ODCb está contenido en la función atómica ODUkP/CBRx-b_A_So.

El ODCr y el ODCp deben satisfacer los mismos requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase que los puertos de entrada OTUk (la entrada a la función atómica OCh/OTUk_A_Sk). Estos requisitos se indican en 6.1 y sus subcláusulas. Se señala que el ODCr está contenido en las funciones atómicas OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk, y que el ODCp está contenido en la función atómica ODUkP/CBRx_A_Sk.

A.7 Transferencia de fluctuación de fase

En esta cláusula se especifica la transferencia de fluctuación de fase del ODCb, ODCr y ODCp. No hay requisitos relativos a la transferencia de fluctuación de fase del ODCa porque el ODCa está en funcionamiento libre.

A.7.1 Transferencia de fluctuación de fase del ODCb

La función de transferencia de fluctuación de fase del ODCb se define como la relación entre la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal a la salida y la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada en función de la frecuencia. La entrada al ODCb es la señal CBRx_CI_CK en la función atómica ODUkP/CBRx-b_A_So. La salida del ODCb es la señal CBRx_AI_CK en la función atómica ODUkP/CBRx-b_A_So.

La función de transferencia de fluctuación de fase del ODCb estará bajo la curva dada en la figura A.1 cuando se aplique la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada hasta las máscaras correspondientes a las que se hace referencia en A.6. Los parámetros de la figura A.1 se dan en el cuadro A.4. Se señala que el parámetro f_C puede considerarse como la anchura de banda máxima del ODCb y el parámetro P , como la punta de ganancia máxima del ODCb. El límite de transferencia de fluctuación de fase se especifica entre las frecuencias f_L y f_H . El límite de transferencia de fluctuación de fase no se especifica para frecuencias superiores a f_H ni inferiores a f_L .

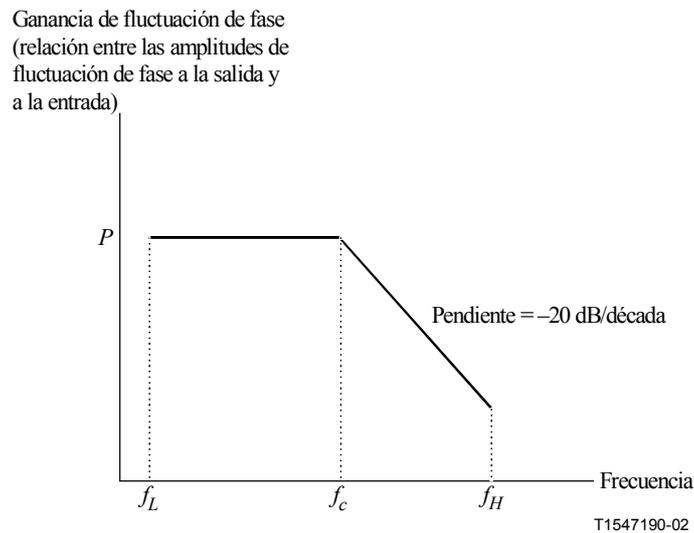


Figura A.1/G.8251 – Transferencia de fluctuación de fase del ODCb

Cuadro A.4/G.8251 – Requisitos de la transferencia de fluctuación de fase del ODCb

Nivel de ODUk	f_L (Hz)	f_C (kHz)	f_H (kHz)	P (dB)	Máscara de entrada
ODU1	10	1	100	0,1	Cláusula A.6
ODU2	40	4	400	0,1	Cláusula A.6
ODU3	160	16	1600	0,1	Cláusula A.6

A.7.2 Transferencia de fluctuación de fase del ODCr

Los requisitos relativos a la transferencia de fluctuación de fase del ODCr son, básicamente, los de la transferencia para un regenerador 3R. Mientras que el regenerador 3R abarca todas las funciones atómicas entre la función de adaptación OCh/OTUk_A_Sk y la función de adaptación OCh/OTUk_A_So e incluye el circuito de recuperación de reloj de banda ancha en la OCh/OTUk_A_Sk, la anchura de banda del ODCr (contenido en las funciones atómicas OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk) es, en la práctica, notablemente menor que cualquiera de las otras anchuras de banda presentes en el regenerador y determina, por tanto, las características de la transferencia. Puesto que la anchura de banda del ODCr es muy superior a 10 Hz (es decir, el límite superior de la zona de fluctuación lenta de fase), los regeneradores transfieren fluctuación lenta de fase sin atenuación; no hay ningún requisito explícito a propósito de la transferencia de fluctuación lenta de fase.

La función de transferencia de fluctuación de fase de un regenerador 3R se define como la relación entre la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal a la salida y la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada en función de la frecuencia. La entrada al regenerador 3R es la señal OCh_AI_D en la función atómica OCh/OTUk_A_Sk. La salida del regenerador 3R es la señal OCh_AI_D en la función atómica OCh/OTUk_A_So. Se señala que la transferencia de fluctuación de fase no está asociada con una sola función atómica; más bien está asociada con todas las funciones atómicas entre, e incluidas, las funciones sumidero y fuente de adaptación de OCh/OTUk. Normalmente, al menos una parte de la función de regeneración 3R debe estar contenida en la función OCh/OTUk_A_Sk porque ha de recuperarse un reloj. Sin embargo, los requisitos de transferencia de fluctuación de fase y tolerancia a la fluctuación de fase implican la presencia de un segundo bucle de enganche de fase de anchura de banda menor; este bucle de enganche de fase está en el ODCr contenido en las funciones atómicas OTUk/ODUk_A_So y OTUk/ODUk_A_Sk.

La función de transferencia de fluctuación de fase de un regenerador 3R estará bajo la curva dada en la figura A.1 cuando se aplique la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada hasta las máscaras de las figuras 1, 2 y 3 de OTU1, OTU2 y OTU3, respectivamente. Se señala que el parámetro f_C puede considerarse como la anchura de banda máxima del regenerador 3R y el parámetro P , como la punta de ganancia máxima del regenerador 3R. El límite de transferencia de fluctuación de fase se especifica entre las frecuencias f_L y f_H . El límite de transferencia de fluctuación de fase no se especifica para frecuencias superiores a f_H ni inferiores a f_L .

Cuadro A.5/G.8251 – Requisitos de la transferencia de fluctuación de fase del ODCr

Nivel de OTUk	f_L (kHz)	f_C (kHz)	f_H (MHz)	P (dB)	Máscara de entrada
OTU1	2,5	250	20	0,1	Figura 1, cuadro 2
OTU2	10	1000	80	0,1	Figura 2, cuadro 3
OTU3	40	4000	320	0,1	Figura 3, cuadro 4

A.7.3 Transferencia de fluctuación de fase del ODCp

Los requisitos relativos a la transferencia de fluctuación de fase del ODCp son, básicamente, los de la transferencia para un dispositivo que anula la correspondencia (o sea, un desincronizador) CBR (es decir, SDH). La función del dispositivo que anula la correspondencia, incluido el ODCp, está contenida en la función atómica ODUkP/CBRx_A_Sk. El ODCp lleva a cabo el filtrado necesario para controlar la acumulación de fluctuación de fase y de fluctuación lenta de fase en el establecimiento/la anulación de la correspondencia en múltiples islas OTN.

La anchura de banda de 3 dB no deberá ser superior a 300 Hz. La punta de ganancia máxima del desincronizador deberá ser de 0,1 dB. Estos requisitos se aplican a todas las velocidades de ODUk. En el apéndice V se da más información adicional sobre error de fase del dispositivo que anula la correspondencia.

A.8 Respuesta transitoria

Cuando se pierde una señal del cliente CBR y se inserta una AIS, o cuando se restablece el cliente CBR y se elimina la AIS, debe mantenerse la temporización de ODUk y OTUk. Este requisito se cumple automáticamente en el caso de establecimiento de la correspondencia asíncrona porque el ODCa funciona de manera libre y es, por tanto, independiente, del reloj de la señal del cliente. Sin embargo, en el caso de establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, el ODCb deriva su temporización del cliente. De manera específica, la temporización de la señal del cliente es recuperada por el circuito de recuperación de reloj que reside en la función atómica OS/CBR_A_Sk; la salida de este circuito de recuperación de reloj es la entrada al ODCb (véase en el apéndice VI un resumen de las funciones atómicas). La pérdida de la señal del cliente da lugar al paso del ODCb al funcionamiento libre o bien a la conmutación a un reloj de AIS de funcionamiento libre; el restablecimiento de la señal del cliente hace que el ODCb conmute de la condición de funcionamiento libre o de un reloj de AIS en funcionamiento libre a un reloj de señal del cliente independiente. Además, puede transcurrir un corto periodo de tiempo entre el instante en que se pierde la entrada del cliente al circuito de recuperación de reloj y la detección de esta pérdida; durante ese periodo, la salida del circuito de recuperación de reloj puede estar fuera de frecuencia y seguir siendo todavía la entrada al ODCb. En todos estos casos, la Rec. UIT-T G.798 requiere que el reloj de ODUk permanezca dentro de sus límites y que no se introduzca ninguna discontinuidad de fase de trama.

La diferencia de frecuencia máxima posible entre un cliente SDH y un ODCb en funcionamiento libre o reloj de AIS en funcionamiento libre es de 40 ppm (porque el mayor desplazamiento posible

de cada señal es de ± 20 ppm). Los requisitos anteriores significan que el ODCb debe filtrar adecuadamente un paso de frecuencia de 40 ppm de tal manera que los equipos en sentido descendente de la OTN, es decir, los regeneradores 3R puedan tolerar el transitorio de fase filtrado resultante. Esto significa, de manera específica, que el transitorio de fase no provocará un desbordamiento de la memoria intermedia de un ODCr que cumpla los requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase y a la fluctuación lenta de fase de A.6.2. Además, el ODCb debe filtrar adecuadamente la salida del circuito de recuperación de reloj durante el corto periodo de tiempo transcurrido entre la pérdida de la entrada del cliente al circuito de recuperación del reloj y la eliminación de la salida del circuito de recuperación de reloj a la entrada del ODCb.

Si:

- 1) el circuito de recuperación de reloj de la función atómica OS/CBR_A_So pierde su entrada y/o el ODCb pierde su entrada y pasa a funcionamiento libre o conmuta a un reloj de AIS; o
- 2) el ODCb se recupera de la AIS a la salida del circuito de recuperación de reloj, el ODCb deberá cumplir los siguientes requisitos:
 - a) Cualquier paso de frecuencia inicial no deberá ser superior a 9 ppm.
 - b) Cualquier tasa de deriva de frecuencia tras el paso de frecuencia inicial no deberá ser superior a 200 ppm/s.
 - c) El cambio total de frecuencia no deberá ser superior a 40 ppm.

Al ODCb se le permite que pierda la sincronización durante un periodo de hasta 600 ms.

Apéndice I

Relación entre los requisitos de la fluctuación de fase en la interfaz de red y la tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada

I.1 Requisitos de fluctuación de fase en la interfaz de red

Para todas las velocidades binarias de OTUk se especifican en el cuadro 1 dos límites de red: uno para un filtro de medición de banda ancha y otro para un filtro de medición de banda alta. La forma general de esta especificación se muestra en el cuadro I.1 y es aplicable a todas las velocidades de OTUk.

Cuadro I.1/G.8251 – Forma general de los requisitos de la fluctuación de fase en la interfaz de OTUk

Filtro de medición	Anchura de banda de medición	Amplitud cresta a cresta (UIpp)
Banda ancha	f_1 a f_4	A_2
Banda alta	f_3 a f_4	A_1

En cualquier interfaz de una OTUk se deben cumplir las siguientes especificaciones de la fluctuación de fase a la salida:

- 1) La fluctuación de fase de la temporización medida en un intervalo de 60 segundos con un filtro paso de banda con una frecuencia de corte inferior f_1 y una frecuencia mínima de corte superior f_4 no excederá de A_2 intervalos unitarios (UI, *unit intervals*) cresta a cresta.

- 2) La fluctuación de fase de la temporización medida en un intervalo de 60 segundos con un filtro paso de banda con una frecuencia de corte inferior f_3 y una frecuencia mínima de corte superior f_4 no excederá de A_1 intervalos unitarios (UI) cresta a cresta.

El régimen de caída a las frecuencias de corte inferior, f_1 y f_3 , será de 20 dB/década. El régimen de caída a la frecuencia de corte superior, f_4 , será de -60 dB/década.

El valor de f_1 refleja la frecuencia de corte más baja del circuito de temporización que se espera en un sistema de línea. El circuito de temporización puede temporizar una señal de salida del regenerador y podría implementarse como un bucle de enganche de fase (PLL, *phase-locked loop*). La fluctuación de fase a frecuencias mayores que la anchura de banda de este PLL será absorbida en parte por la memoria intermedia del PLL. La parte no absorbida, que desborda la memoria intermedia, podría causar errores de transmisión. La fluctuación de fase a frecuencias inferiores a esta anchura de banda simplemente pasará sin influir en la transmisión. El valor de f_1 representa, por tanto, la menor anchura de banda que podría utilizarse en este circuito de temporización de salida. El valor de f_3 está relacionado con la anchura de banda del circuito de adquisición de la temporización de entrada. La fluctuación de fase a frecuencias más altas que esta anchura de banda constituirá la fluctuación de fase de la alineación y provocará una penalización de potencia óptica debido a su efecto sobre el diagrama de ojo. Esta fluctuación de fase a una frecuencia elevada hay que limitarla, por tanto, en la misma medida en que las especificaciones de los equipos limitan la penalización de potencia óptica por medio de una tolerancia a la fluctuación de fase.

El valor de f_4 refleja limitaciones de medición razonables y se especifica para establecer los requisitos mínimos de la anchura de banda de medición. f_4 se elige de manera que incluya toda la fluctuación de fase de la alineación significativa, esperada. El valor elegido está situado entre una y dos décadas más allá de la anchura de banda (frecuencia de corte) esperada del regenerador 3R de 3 dB (véase A.7.2).

Los valores de A_1 y A_2 están directamente relacionados con la tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal a la entrada. Estos parámetros tienen un margen predefinido y son razonablemente moderados porque:

- 1) la fluctuación de fase sinusoidal representa la fluctuación de fase del caso más desfavorable con respecto a la tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada; y
- 2) la fluctuación de fase acumulada de la línea OTN (OTUk) no será sinusoidal (en cambio, sí será ruidosa).

I.2 Tolerancia a la fluctuación de fase a la entrada de los equipos de red

La forma general de los filtros de ponderación utilizados para medir la fluctuación de fase a la salida en una interfaz de red se indica en el cuadro I.1 y se representa en la figura I.1. Las repuestas del filtro vienen dadas por las ecuaciones (I-1) y (I-2).

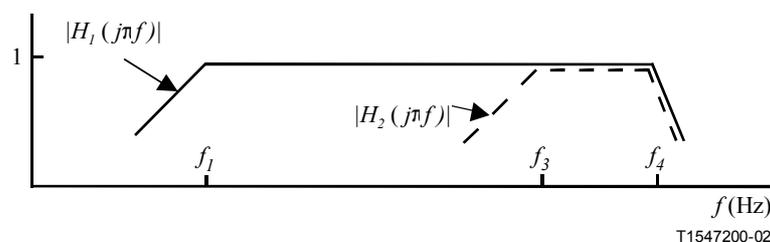


Figura I.1/G.8251 – Límites superiores de la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal

$$H_1(s) = \frac{s}{s + \omega_1} \cdot \frac{\omega_4^3}{s^3 + 2\omega_4 s^2 + 2\omega_4^2 s + \omega_4^3} \quad (I-1)$$

$$|H_1(2\pi jf)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_1^2} \cdot \frac{f_4^6}{f^6 + f_4^6}$$

$$H_2(s) = \frac{s}{s + \omega_2} \cdot \frac{\omega_4^3}{s^3 + 2\omega_4 s^2 + 2\omega_4^2 s + \omega_4^3} \quad (I-2)$$

$$|H_2(2\pi jf)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_2^2} \cdot \frac{f_4^6}{f^6 + f_4^6}$$

donde:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad \omega_3 = 2\pi f_3 \quad \omega_4 = 2\pi f_4$$

El primer término de la función $H_1(s)$ representa la función de transferencia de error de fase de algún PLL, y su amplitud de $A_2 = 1,5$ UIpp representa su tolerancia a los errores de fase.

Por consiguiente, la correspondiente tolerancia de fase a la entrada del PLL viene dada por:

$$A_{tol1} = \frac{A_2}{|H_1(j2\pi f)|} \quad (I-3)$$

De manera similar, la tolerancia de fase a la entrada que corresponde a $H_2(s)$ y su amplitud de $A_1 = 0,15$ UIpp viene dada por:

$$A_{tol2} = \frac{A_1}{|H_2(j2\pi f)|} \quad (I-4)$$

Estas máscaras de tolerancia a la fluctuación de fase sinusoidal se ilustran en la figura I.2. Si la fluctuación de fase sinusoidal no ponderada en una interfaz de red satisface estas *dos* máscaras, también satisface (es decir, está situada por debajo de) una máscara única que es la más baja de las dos máscaras para cada frecuencia. Esta máscara combinada se representa por una curva de trazo discontinuo en la figura I.3.

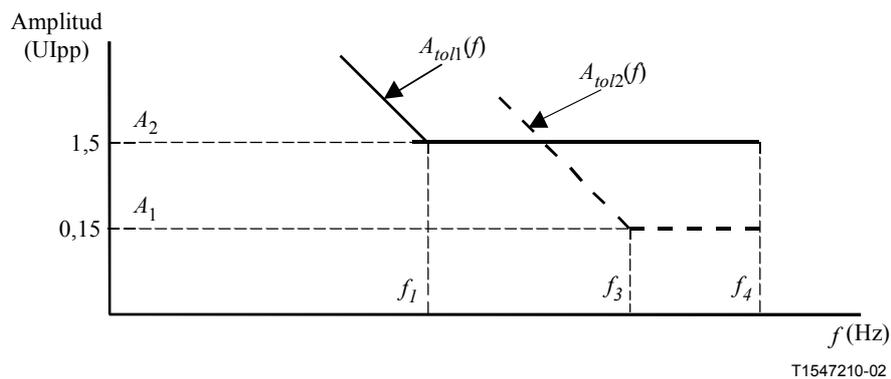


Figura I.2/G.8251 – Límites superiores de la amplitud de la fluctuación de fase sinusoidal

La figura I.3 compara esta máscara combinada con la máscara de la tolerancia sinusoidal a la fluctuación de fase a la entrada de OTU1. Ambas coinciden en la gama $500 \text{ Hz} < f < 20 \text{ MHz}$.

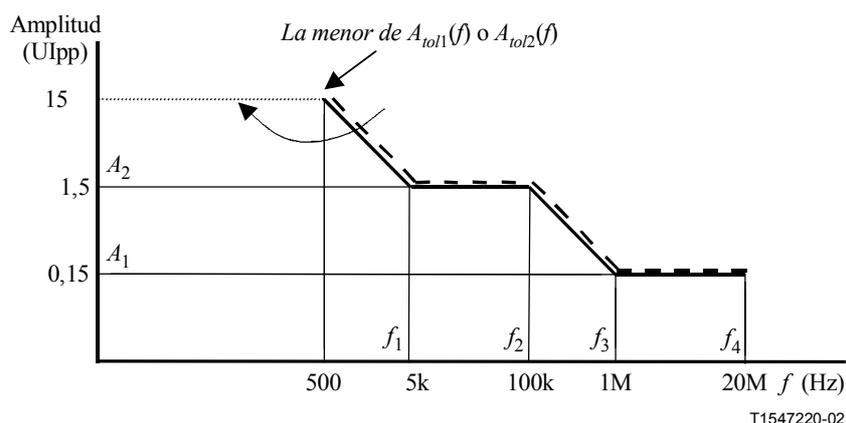


Figura I.3/G.8251 – Límite superior de la fluctuación de fase sinusoidal a la salida en una interfaz de OTU1 [la menor de $A_{tol1}(f)$ o $A_{tol2}(f)$] comparada con la máscara de tolerancia a la fluctuación de fase/fluctuación lenta de fase a la entrada

Apéndice II

Efecto de la OTN en la distribución de la sincronización vía clientes STM-N

II.1 Introducción

Como se indica en la cláusula 1 (Alcance) y en 5.2, la capa física de OTN no se utilizará para transportar sincronización. La norma actual sobre el transporte de sincronización por la SDH es una norma adecuada. Sin embargo, la introducción de la red óptica de transporte (OTN, *optical transport network*) cambia la posición de una señal STM-N en el sentido de que ahora puede ser una señal del cliente dentro de la red de capa OTN. Esto podría afectar a la arquitectura de red de sincronización, ya que la señal STM-N se utiliza actualmente como portadora de información de sincronización (próxima a su capacidad de transporte de cabida útil). En el presente apéndice se analizan los posibles efectos en la red de sincronización asociados a la introducción de la capa de OTN.

II.2 Cadena de referencia de sincronización provisional

Para analizar el efecto de la introducción de la OTN en la red de distribución de sincronización se ha adaptado provisionalmente la cadena de referencia de sincronización de la Rec. UIT-T G.803. La cadena de referencia original contiene 1 PRC, 10 SSU y 60 SEC, con la condición de que no están concatenados más de 20 SEC entre cualquier par de SSU. El modelo de referencia adaptado provisionalmente tiene todavía 1 PRC y 10 SSU, pero las conexiones entre dos SSU están, según se supone ahora, en la red OTN. Al final de la cadena hay 20 SEC (véase la figura II.1).

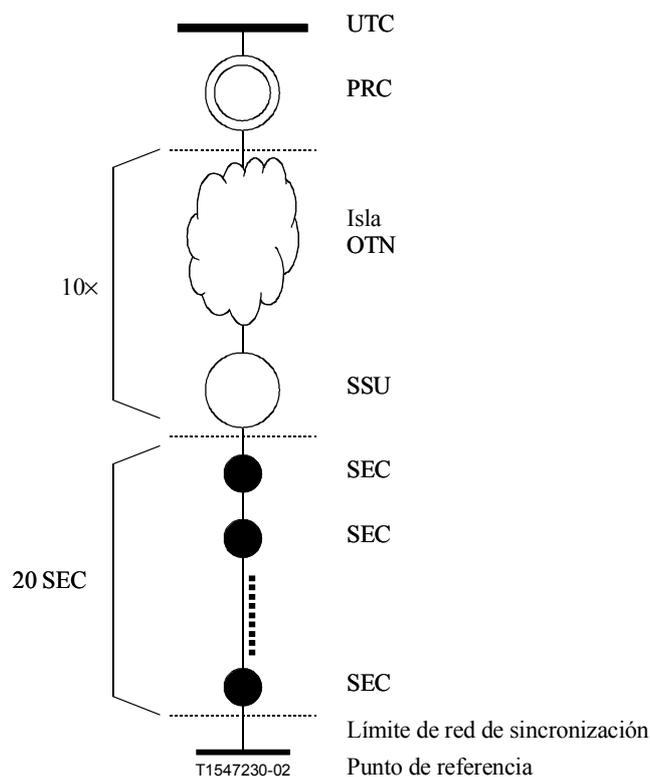


Figura II.1/G.8251 – Cadena de referencia de sincronización adaptada (provisional)

La isla OTN de este modelo ha de entenderse como un conglomerado de los equipos de la OTN que lleva a cabo el establecimiento de la correspondencia de un STM-N en su ODUk correspondiente, múltiples NE que efectúan la (de)multiplexación y la transconexión de las ODUk y transportan por canales ópticos (incluidas la multiplexación y la transconexión ópticas) y finalmente anulan la correspondencia del STM-N.

Se supone que la composición de cada isla OTN del modelo provisional consta de un elemento de red OTN que lleva a cabo la operación de establecimiento de la correspondencia y otros nueve elementos de red OTN que realizan las operaciones de multiplexación de las ODUk.

De hecho, la distribución de las islas OTN en el modelo de referencia de sincronización adaptado no tiene importancia a efectos de la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo. En el modelo hay una isla OTN entre cada par de SSU, pero se permite también otra distribución. Por ejemplo, cinco conexiones entre unidades SSU pueden tener dos islas OTN cada una mientras que las otras interconexiones utilizan la capa física de STM-N. Además el número de elementos de red de multiplexación/correspondencia puede ser redistribuido libremente entre las islas OTN, para crear algunas islas OTN "grandes" y algunas "pequeñas".

En la construcción de la cadena de referencia de sincronización adaptada se ha supuesto que, por lo que se refiere a la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo, cuatro SEC tienen el mismo efecto que una isla OTN.

II.3 Límite de red de sincronización

El límite de red válido al final de la cadena de referencia de sincronización, definido en la Rec. UIT-T G.803, permite 5 μ s de fluctuación lenta de fase durante 24 horas para la opción 1 (véase la Rec. UIT-T G.823) y 1,86 μ s durante 24 horas para la opción 2 (véase la Rec. UIT-T G.824). Se ha convenido que, en la cadena de referencia de sincronización adaptada, un 10%

del presupuesto de la opción 1, es decir, 500 ns (o ~150 bytes a 2,5 Gbit/s) bastaría para el efecto combinado de las islas OTN.

Puesto que hay 10 islas OTN en la cadena de referencia de sincronización, cada una de ellas con 10 NE que establecen la correspondencia/multiplexan (se supone que todos ellos funcionan a la velocidad de 2,5 Gbit/s, lo que representa el caso más desfavorable), hay en total 100 de esos NE en la cadena de referencia. Por tanto, a cada elemento de red OTN de ese tipo se le puede permitir una contribución de 5 ns (o 1,56 bytes a 2,5 Gbit/s) a la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo.

II.4 Memoria de canal variable

En términos generales cabe decir que la cantidad máxima de fluctuación lenta de fase que se puede acumular en un trayecto a través de una red depende de la variación máxima del retardo de propagación a través de la red. Las variaciones del retardo de propagación pueden ser causadas por las memorias intermedias elásticas utilizadas en las operaciones de establecimiento de la correspondencia y de multiplexación. Pero también las puede provocar la fibra, cuyo retardo de propagación exacto depende, por ejemplo, de la temperatura. En general, la parte variable de la cantidad de memoria que se halla en el canal determinará la fluctuación lenta de fase máxima posible. Si el retardo de propagación es $\tau_0 \pm \Delta\tau$, la fluctuación lenta de fase máxima de cresta a cresta es $2 \cdot \Delta\tau$. (Véase la figura II.2.)

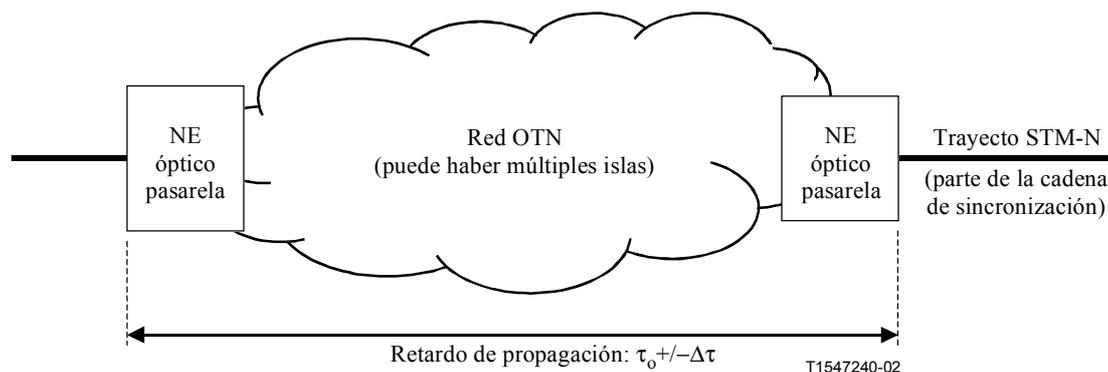


Figura II.2/G.8251 – Retardo de canal variable

El hecho de que se alcance o no realmente el límite superior de la fluctuación lenta de fase en las redes reales depende de diversos factores. La calidad de la sincronización de la red es uno de ellos (este es, por ejemplo, uno de los motivos principales por los que las redes SDH requieren funcionamiento síncrono), otro factor es el diseño real de las memorias intermedias elásticas. El cálculo de la probabilidad de que se superen determinadas cantidades de fluctuación lenta de fase durante un cierto periodo de tiempo requiere una gran cantidad de trabajo de simulación con el que se captan los detalles más importantes de los procesos relacionados con el almacenamiento elástico y el modelo de referencia exacto de la red. Este procedimiento tiene la desventaja de que, por lo general, no es fácil efectuar esas simulaciones en el caso de redes que se desvían en algunos aspectos con respecto al modelo de referencia. Por este motivo se ha elegido un procedimiento de caso más desfavorable basado en una variación máxima de la memoria del canal.

II.5 Histéresis de memoria intermedia máxima

Si se permite que cada elemento de red OTN contribuya con 5 ns a la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo, la histéresis de memoria intermedia máxima resultante es aproximadamente de 12,5 UI = 1,5625 bytes para ODU1, 50 UI = 6,25 bytes para ODU2 y 200 UI = 25 bytes para ODU3. Puesto que las implementaciones resultan a menudo más útiles si

pueden funcionar con números enteros de bytes, el valor de ODU1 se incrementa hasta el número de bytes entero más próximo, es decir 2 bytes. El valor de ODU2 se fija en 4 veces este último, o sea 8 bytes, y el valor de ODU3 se fija en 16 veces el valor de ODU1, o sea 32 bytes. En unidades de tiempo de fase, la histéresis de la memoria intermedia es aproximadamente de 6,4 ns. El presupuesto total de fluctuación lenta de fase a largo plazo para la cadena de referencia de sincronización de la figura II.1 (100 elementos de red OTN) es entonces de 640 ns.

La Rec. UIT-T G.798 especifica que la histéresis de memoria intermedia máxima permitida máxima en las funciones de alineación de las operaciones de establecimiento de la correspondencia y de multiplexación¹, se limite a 2 bytes para STM-16, 8 bytes para STM-64 y 32 bytes para STM-256 por NE de OTN^{2, 3}.

El requisito anterior de histéresis de almacenamiento elástico por elemento de red OTN debería aplicarse a cada ruta posible de un STM-N o su envolvente de ODUk a través de cualquier elemento de red OTN que lleve a cabo el establecimiento de la correspondencia o la multiplexación. Si existen múltiples trayectos independientes, el requisito deberá aplicarse a cada uno de esos trayectos individualmente.

Otra de las hipótesis establecidas en este apéndice es que los elementos de red OTN que no efectúan ni multiplexación ni establecimiento de la correspondencia no contienen memorias intermedias elásticas y, por ello, no contribuyen a la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo.

Apéndice III

Modelo ficticio de referencia (HRM) para la acumulación de fluctuación de fase de un regenerador 3R

En este apéndice se describe el modelo ficticio de referencia (HRM, *hypothetical reference model*) utilizado para obtener los requisitos de transferencia de fluctuación de fase de un regenerador 3R de A.7.2 y los requisitos de regeneración de fluctuación de fase del ODCa, ODCb y ODCr de A.5.1.1. Estos requisitos, junto con el HRM, son coherentes con los límites de red de fluctuación de fase (en una interfaz de OTUk) de 5.1 y los requisitos de tolerancia a la fluctuación de fase de 6.1.1 y sus subcláusulas. En el apéndice IV se indican los detalles de los análisis de la acumulación de fluctuación de fase de un regenerador 3R de los que se derivan los requisitos anteriores y el HRM.

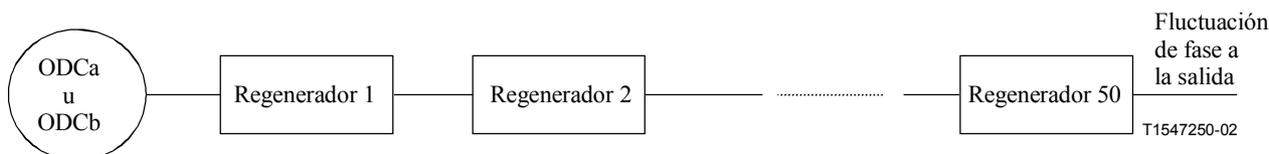
En la figura III.1 se da el HRM de la acumulación de fluctuación de fase de un regenerador 3R. El HRM consta de 50 regeneradores en cascada, cada uno de los cuales cumple, según las hipótesis establecidas, los requisitos de generación y transferencia de fluctuación de fase de A.5.1.1 y A.7.2, respectivamente. Los 50 regeneradores 3R están precedidos por un ODCa o un ODCb que, según se supone, cumplen los requisitos de generación de fluctuación de fase de A.5.1.1. Los

¹ Aunque los desincronizadores y los demultiplexadores contienen almacenamientos elásticos, estos almacenamientos no contribuyen a la acumulación de fluctuación lenta de fase a largo plazo ya que las variaciones de fase muy lentas no afectan al contenido de la memoria intermedia.

² Se supone que si se llevan a cabo funciones tanto de establecimiento de la correspondencia como de multiplexación en un solo STM-N a través de un NE de OTN, dichas funciones se pueden realizar con una sola operación de alineación.

³ Se señala que esto difiere del procedimiento de la Rec. UIT-T G.783, en donde se prescribe una cantidad mínima en vez de una cantidad máxima de histéresis de memoria intermedia para los procesadores de punteros SDH. Eso se basa en el objetivo de la SDH de minimizar el número de eventos de ajuste de puntero en la red.

50 regeneradores 3R y el ODCa y el ODCb, junto con el desincronizador del dispositivo que anula la correspondencia, constituyen una isla OTN. En el caso de establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, se supone que el ODCb cumple el requisito de transferencia de ruido de A.7.1. En estas condiciones, lo previsto es que la fluctuación de fase a la salida al final de la cadena de 50 regeneradores 3R se halle dentro de los límites de red del cuadro 1 (véase 5.1) y las máscaras de tolerancia a la fluctuación de fase de las figuras 1 a 3 (cuadros 2 a 4/G.8251; véanse 6.1.1.1, 6.1.1.2 y 6.1.1.3, respectivamente). Se indica que, en el caso de establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, no es necesario tener en cuenta la acumulación de fluctuación de fase en múltiples islas OTN porque la acumulación de fluctuación de fase a la salida de una isla es filtrada eficazmente por el desincronizador.



NOTA – En el caso de establecimiento de la correspondencia asíncrona, el OTSC no tiene entrada (y por tanto no tiene fluctuación de fase a la entrada). En el caso de establecimiento de la correspondencia síncrona de bits, cualquier acumulación de fluctuación de fase en la isla previa es filtrada por el desincronizador de esa isla.

Figura III.1/G.8251 – HRM para la acumulación de fluctuación de fase de un regenerador 3R

Se señala que, aparte de indicar que los regeneradores 3R cumplen los requisitos de generación de fluctuación de fase de A.5.1.1, no se da aquí indicación alguna sobre dónde se genera exactamente el ruido en cada regenerador. Para los fines que aquí se pretenden se señala simplemente que cada regenerador cumple los requisitos de generación de fluctuación de fase de A.5.1.1 en ausencia de fluctuación de fase a la entrada. En el apéndice IV se dan los detalles relativos a estos dos análisis de la acumulación de fluctuación de fase.

Apéndice IV

Análisis de la acumulación de fluctuación de fase en un regenerador 3R

IV.1 Introducción

En este apéndice se describen los detalles de los análisis de la acumulación de fluctuación de fase en un regenerador 3R de los que se derivan los requisitos de generación de fluctuación de fase de A.5.1, los requisitos de transferencia de fluctuación de fase de A.7 y el HRM del apéndice III. En los correspondientes análisis, que se realizaron de manera independiente, se utilizaron dos modelos diferentes; no obstante, los modelos eran similares y llevaron a los mismos resultados.

Ambos modelos fueron implementados en el dominio de frecuencia. Cada fuente de ruido se modeló mediante una densidad espectral de potencia (PSD, *power spectral density*), que se hizo pasar a través de unos filtros apropiados que representaban a los regeneradores. En el primer modelo se modelaron los detalles de los PLL del regenerador, introduciéndose el ruido en los diversos componentes. En el segundo modelo, el ruido se modeló mediante una PSD con la configuración apropiada a la salida del regenerador, y las características generales de transferencia del regenerador (de la entrada a la salida) se modelaron por separado. Los niveles de ruido se

ajustaron en los dos modelos de manera que se cumplieran los requisitos de generación de fluctuación de fase. La generación de fluctuación de fase y la fluctuación de fase a la salida se evaluaron utilizando los filtros de medición apropiados, que fueron también modelados con funciones de transferencia del dominio de frecuencia. Los modelos del dominio de frecuencia representan convenientemente el valor medio de los cuadrados de la fluctuación de fase como el área que aparece bajo la curva de la densidad espectral de potencia (PSD), y la fluctuación de fase valor rms como la raíz cuadrada de esa cantidad. Se partió del supuesto de que la fluctuación de fase de cresta a cresta durante un periodo de 60 segundos es igual a la fluctuación de fase valor rms multiplicada por un factor⁴ de 10.

IV.2 Modelo 1

El regenerador se modela como un bucle de enganche de fase (PLL) de segundo orden con filtro de bucle proporcional más integral (PI, *proportional-plus-integral*) de primer orden. Se supone que están presentes tres fuentes de ruido independientes que representan el ruido del detector de fase, el ruido del oscilador controlado por tensión (VCO, *voltage-controlled oscillator*) y el ruido térmico en el receptor óptico situado justo antes de la entrada del PLL. El modelo se ha desarrollado para ambos casos de acumulación de fluctuación de fase, sistemática y aleatoria; sin embargo, los resultados se dan solamente para el caso de acumulación de fluctuación de fase aleatoria. La acumulación de fluctuación de fase en los regeneradores 3R es aproximadamente aleatoria porque los contenidos de la memoria intermedia en los bucles de enganche de fase de banda estrecha de los sucesivos regeneradores (es decir, en los sucesivos ODCr) no están correlacionados entre sí. Esto se debe a que la fluctuación de fase dependiente del patrón es la que se puede acumular sistemáticamente y a que la fluctuación de fase dependiente del patrón la produce el proceso de recuperación de reloj en los bucles de enganche de fase de banda ancha. Cuando los contenidos de la memoria intermedia del ODCr no están correlacionados, la temporización por los impulsos de reloj de lectura con una fluctuación de fase dependiente del patrón producirá bits de salida diferentes en los sucesivos regeneradores 3R. Esto tiene como consecuencia el que las fluctuaciones de fase dependientes del patrón de los sucesivos regeneradores tampoco estén correlacionadas.

En las subcláusulas que siguen se presentan los detalles del modelo y se dan los resultados de casos seleccionados. Para reducir al mínimo el número de casos de simulación que es preciso efectuar, el modelo se ha desarrollado en forma adimensional. Se dan dos conjuntos de resultados:

- 1) anchura de banda de 3 dB equivalente de 8 MHz para el caso OTU2, lo que equivale al requisito de la Rec. UIT-T G.783 para regeneradores STM-64, y
- 2) anchura de banda de 3dB equivalente de 1 MHz para el caso OTU2, que es el requisito adoptado para la presente Recomendación en 6.1.3.

Los resultados muestran que la anchura de banda menor era aquí necesaria para cumplir los límites de red de fluctuación de fase del cuadro 1.

⁴ Al definir la fluctuación de fase de cresta a cresta o, de manera más general, el valor de cresta a cresta de cualquier proceso aleatorio, deberá especificarse un intervalo de medición y el correspondiente cuantil (o percentil). Esto se debe a que, si la medición de cresta a cresta se repite un número suficiente de veces (siempre en el mismo intervalo de medición), se obtendrá una distribución de valores. El intervalo de medición es aquí de 60 s. El cuantil no se especifica, pero se supone que es un valor adecuado, coherente con una relación de 10 entre el valor de cresta a cresta y el valor rms. Se prevé que este cuantil sea superior a 0,99. Si los regeneradores pueden ser modelados como sistemas lineales y la distribución de ruido es gaussiana, no importa cuál sea la relación exacta entre el valor de cresta a cresta y el valor rms de la fluctuación en tanto en cuanto las especificaciones relativas a la fluctuación de fase a la salida y a su generación se expresen ambas en términos de fluctuación de fase de cresta a cresta o ambas en términos de fluctuación de fase valor rms.

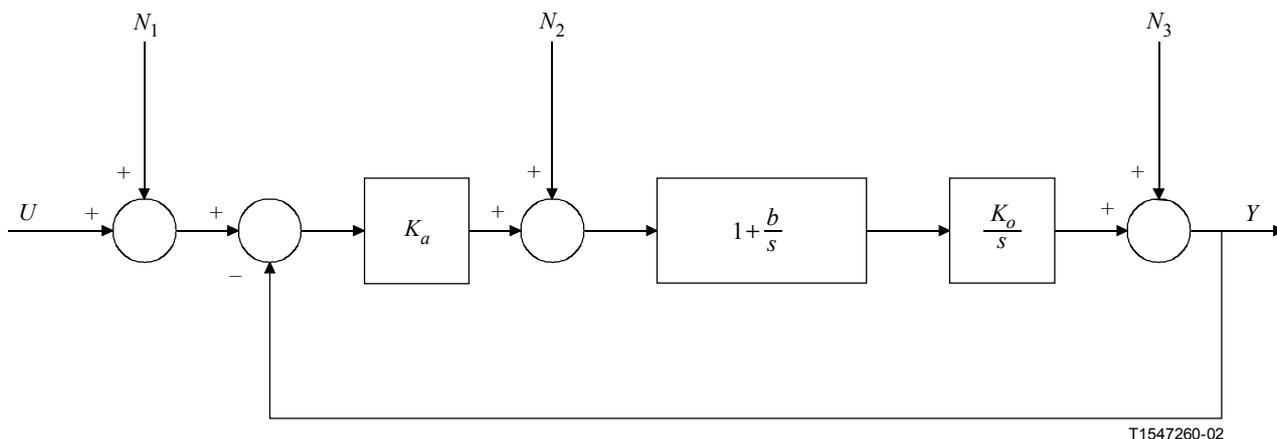


Figura IV.2-1/G.8251 – Modelo de regenerador

IV.2.1 Pormenores del modelo

El análisis del dominio de frecuencia sigue los métodos utilizados en [1] y [2]. En la figura IV.2-1 se muestra el modelo de regenerador 3R. Se trata de un modelo lineal para un bucle de enganche de fase (PLL). La ganancia del detector de fase es K_a , la ganancia del VCO es K_o , y se supone la presencia de un filtro de bucle activo con función de transferencia $1+b/s$. $Y(s)$, $U(s)$, $N_1(s)$, $N_2(s)$ y $N_3(s)$ son las transformadas de Laplace (más exactamente, la raíz cuadrada de la PSD correspondiente) del ruido a la entrada, del ruido a la salida, del ruido del receptor óptico, del ruido del detector de fase y del ruido del VCO, respectivamente. Las funciones de transferencia pueden expresarse entonces como sigue:

$$\frac{Y(s)}{N_1(s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} \equiv H(s) = \frac{\frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)} = \frac{K_a K_o s + K_a K_o b}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{IV.2-1})$$

$$= \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\frac{Y(s)}{N_2(s)} = \frac{1}{K_a} H(s) \quad (\text{IV.2-2})$$

$$\frac{Y(s)}{N_3(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right)} = \frac{s^2}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{IV.2-3})$$

$$= \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = 1 - H(s)$$

donde la frecuencia natural no amortiguada y la tasa de amortiguación son:

$$\omega_n = \sqrt{K_a K_o b}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_a K_o}{b}} \quad (\text{IV.2-4})$$

Puesto que se va a suponer que tanto N_1 como N_2 son ruido blanco, o modulación de fase de ruido blanco (WPM, *white phase modulation*), sería conveniente combinar ambos ruidos en una fuente de ruido equivalente única. Esto puede hacerse como se indica a continuación:

$$\begin{aligned}
Y(s) &= H(s)U(s) + H(s)N_1(s) + H(s)N_2(s)/K_a + [1 - H(s)]N_3(s) \\
&= H(s)U(s) + H(s)N_{12}(s) + H_e(s)N_3(s)
\end{aligned}
\tag{IV.2-5}$$

donde la fuente de ruido equivalente N_{12} viene dada por:

$$N_{12}(s) = N_1(s) + N_2(s)/K_a \tag{IV.2-6}$$

y se utiliza la notación habitual para la función de transferencia de error de fase:

$$H_e(s) \equiv 1 - H(s) \tag{IV.2-7}$$

Se modela una cadena de N regeneradores 3R suponiendo que la salida del j -ésimo regenerador es la entrada al $(j+1)$ -ésimo regenerador y que la entrada al primer regenerador de la cadena es cero (es decir, que el primer regenerador es, en esencia, un reloj y tiene generación de ruido pero no fluctuación de fase a la entrada). En el análisis que sigue, los casos de acumulación de fluctuación de fase sistemática y aleatoria se consideran por separado, utilizando la metodología de [1] y [2]. Primero se examina el caso de acumulación de fluctuación de fase aleatoria. Se supone aquí que las fuentes de ruido correspondientes de todos los regeneradores son de la misma magnitud, es decir, tienen la misma PSD, pero no están correlacionadas. La relación entre la PSD de la entrada y la de la salida de un solo regenerador viene dada por [utilizando la ecuación (IV.2-5)] y fijando $s = j\omega$ en la función de transferencia para obtener la respuesta en frecuencia:

$$S_Y(\omega) = |H(j\omega)|^2 S_U(\omega) + |H(j\omega)|^2 S_{12}(\omega) + |H_e(j\omega)|^2 S_3(\omega) \tag{IV.2-8}$$

donde $S(\omega)$ con el correspondiente subíndice representa la PSD de la entrada o de la salida o bien de la fuente de ruido correspondiente. Para una cadena de N regeneradores 3R la PSD de la fase de salida, suponiendo acumulación de fluctuación de fase aleatoria, viene dada entonces por:

$$\begin{aligned}
S_{N_r}(\omega) &= \sum_{j=1}^N |H(j\omega)|^{2j} S_{12}(\omega) + \sum_{j=1}^N |H_e(j\omega)|^2 |H(j\omega)|^{2j-2} S_3(\omega) \\
&= \frac{|H(j\omega)|^2 [1 - |H(j\omega)|^{2N}]}{1 - |H(j\omega)|^2} S_{12}(\omega) + \frac{|H_e(j\omega)|^2 [1 - |H(j\omega)|^{2N}]}{1 - |H(j\omega)|^2} S_3(\omega)
\end{aligned}
\tag{IV.2-9}$$

En el caso de acumulación de fluctuación de fase sistemática se supone que las fuentes de ruido correspondientes de los sucesivos regeneradores están perfectamente correlacionadas, es decir, las fuentes de ruido N_{12} de los sucesivos regeneradores están perfectamente correlacionadas entre sí y las fuentes de ruido N_3 de los sucesivos regeneradores están perfectamente correlacionadas entre sí. Sin embargo, se supone que una fuente de ruido N_{12} y una fuente de ruido N_3 no están correlacionadas. Para una cadena de regeneradores 3R, la Y_N de la fase de salida al final de la cadena viene dada entonces por:

$$\begin{aligned}
Y_N(s) &= \sum_{j=1}^N H^j(s)N_{12}(s) + \sum_{j=1}^N H^{j-1}(s)H_e(s)N_3(s) \\
&= \frac{H(s)[1 - H^N(s)]}{1 - H(s)} N_{12}(s) + \frac{H_e(s)[1 - H^N(s)]}{1 - H(s)} S_3(s)
\end{aligned}
\tag{IV.2-10}$$

La PSD de la entrada está relacionada con las PSD de las fuentes de ruido como se indica a continuación:

$$S_{N_s}(\omega) = |H(j\omega)|^2 \left| \frac{1 - H^N(j\omega)}{1 - H(j\omega)} \right|^2 S_{12}(\omega) + |H_e(j\omega)|^2 \left| \frac{1 - H^N(j\omega)}{1 - H(j\omega)} \right|^2 S_3(\omega) \tag{IV.2-11}$$

La media cuadrática de fase a la salida de la cadena de los regeneradores 3R viene dada por la integral de la PSD de la ecuación (IV.2-9) o (IV.2-11) a lo largo de todas las frecuencias (de menos infinito a más infinito). Puesto que la PSD es simétrica con respecto a cero, conviene utilizar la PSD de un solo lado e integrar de cero a infinito. Además, conviene utilizar la frecuencia f en Hz en vez de ω en radianes/segundo. El convenio usual consiste en definir la PSD de un solo lado como sigue:

$$W(f) \equiv 4\pi S(2\pi f) \quad (\text{IV.2-12})$$

Con esta definición, la media cuadrática es igual a la integral de $W(f)$ de cero a infinito. La ecuación (IV.2-9) de la acumulación de fluctuación de fase aleatoria se convierte entonces en la siguiente:

$$W_{Nr}(f) = \frac{|H(j2\pi f)|^2 (1 - |H(j2\pi f)|^{2N})}{1 - |H(j2\pi f)|^2} W_{12}(f) + \frac{|H_e(j2\pi f)|^2 (1 - |H(j2\pi f)|^{2N})}{1 - |H(j2\pi f)|^2} W_3(f) \quad (\text{IV.2-13})$$

La ecuación (IV.2-11) de la acumulación de fluctuación fase sistemática queda entonces como sigue:

$$W_{Ns}(f) = |H(j2\pi f)|^2 \left| \frac{1 - H^N(j2\pi f)}{1 - H(j2\pi f)} \right|^2 W_{12}(f) + |H_e(j2\pi f)|^2 \left| \frac{1 - H^N(j2\pi f)}{1 - H(j2\pi f)} \right|^2 W_3(f) \quad (\text{IV.2-14})$$

Se señala que las ecuaciones (IV.2-13) y (IV.2-14) representan las PSD de un solo lado del ruido de fase a la salida. Para obtener las PSD de la fluctuación de fase a la salida, se deben multiplicar estas ecuaciones por las respuestas en frecuencia de los filtros de medición de la fluctuación de fase apropiados. El filtro de medición de la fluctuación de fase consta de un filtro paso alto de primer orden seguido por un filtro paso bajo lo más uniforme posible de tercer orden. La respuesta en frecuencia viene dada por:

$$|H_{meas}(j2\pi f)|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_{HP}^2} \times \frac{f_{LP}^6}{f^6 + f_{LP}^6} \quad (\text{IV.2-15})$$

Las frecuencias de corte f_{HP} y f_{LP} dependen de la velocidad correspondiente y de si la fluctuación de fase es de banda alta o de banda ancha. En el cuadro 1 se dan los valores específicos.

Seguidamente se escriben de nuevo las ecuaciones (IV.2-13) y (IV.2-14) utilizando una forma adimensional de $H(j2\pi f)$. De acuerdo con [1], se define:

$$x = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n} \quad (\text{IV.2-16})$$

Las respuestas en frecuencia $H(j\omega)$ y $H_e(j\omega)$ se pueden expresar a continuación [dividiendo el numerador y el denominador de las ecuaciones (IV.2-1) y (IV.2-3) por ω_n^2] de la siguiente manera:

$$H(x) = \frac{2\zeta jx + 1}{-x^2 + 2\zeta jx + 1} \quad (\text{IV.2-17})$$

$$H_e(x) = \frac{-x^2}{-x^2 + 2\zeta jx + 1} \quad (\text{IV.2-18})$$

Por otra parte, la ecuación (IV.2-15) correspondiente al filtro de medición de la fluctuación de fase se convierte en:

$$H_{meas}(x) = \frac{x^2}{x^2 + (f_{HP}/f_n)^2} \times \frac{(f_{LP}/f_n)^6}{f^6 + (f_{LP}/f_n)^6} \quad (\text{IV.2-19})$$

Las ecuaciones (IV.2-13) y (IV.2-14) pasan a ser entonces:

$$W_{Nr}(x) = \frac{|H(x)|^2 \left(1 - |H(x)|^{2N}\right)}{1 - |H(x)|^2} W_{12}(x) + \frac{|H_e(x)|^2 \left(1 - |H(x)|^{2N}\right)}{1 - |H(x)|^2} W_3(x) \quad (\text{IV.2-20})$$

$$W_{Ns}(x) = |H(x)|^2 \left| \frac{1 - H^N(x)}{1 - H(x)} \right|^2 W_{12}(x) + |H_e(x)|^2 \left| \frac{1 - H^N(x)}{1 - H(x)} \right|^2 W_3(x) \quad (\text{IV.2-21})$$

(Las ecuaciones (IV.2-17) a (IV.2-21) son algo imprecisas en cuanto a su notación porque se utilizan los mismos símbolos H y W cuando se expresan en términos de x en vez de f ; para una mayor precisión deberían haberse definido símbolos nuevos, pero esto habría resultado un tanto engorroso.)

La ventaja de las fórmulas adimensionales ecuaciones (IV.2-17) a (IV.2-21) es que desaparece la dependencia con respecto a la frecuencia natural no amortiguada o, en esencia, la anchura de banda del regenerador. Las respuestas en frecuencia del regenerador de las ecuaciones (IV.2-17) y (IV.2-18) dependen solamente de la tasa de amortiguación o, lo que es equivalente, de la punta de ganancia. La respuesta en frecuencia del filtro de medición de la fluctuación de fase de la ecuación (IV.2-19) sólo depende de la relación entre las frecuencias de corte del filtro paso alto y paso bajo y la frecuencia natural no amortiguada o, de manera equivalente, la anchura de banda del regenerador. Estas relaciones son las mismas para las diferentes velocidades de OTUK siempre que la escala de los valores varíe con la velocidad; puesto que el requisito de punta de ganancia es también el mismo para todas las velocidades (0,1 dB), esto significa que las PSD se pueden evaluar una vez para un conjunto de relaciones, en lugar de una vez para cada velocidad.

Por último, la media cuadrática de fase y fluctuación de fase son iguales a la PSD correspondiente integrada a lo largo de f de cero a infinito:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty W(f) df = f_n \int_0^\infty W(x) dx \quad (\text{IV.2-22})$$

En otras palabras, para obtener la media cuadrática de la fase o la fluctuación de fase se integra la PSD adimensional y se multiplica por la frecuencia natural no amortiguada de la velocidad correspondiente. Además, algo es muy importante, esto significa que la relación entre la media cuadrática o valor rms de fase o fluctuación de fase para N regeneradores y la correspondiente a 1 regenerador es independiente de la frecuencia natural no amortiguada y, en los casos presentes, es la misma para todas las OTUK (porque las anchuras de banda de los filtros de medición de la fluctuación de fase y las anchuras de banda de los regeneradores están en las mismas relaciones para todas las OTUK). Esto significa que las simulaciones sólo han de hacerse una vez por cada conjunto de relaciones de frecuencias en lugar de una vez por cada valor de k y cada conjunto de relaciones de frecuencias, lo que reduce el volumen de simulación por un factor de 3.

En los ejemplos que aquí se consideran, la fuente de ruido N_{12} se modela como ruido blanco:

$$W_{12}(f) = W_{0,12} \quad (\text{IV.2-23})$$

Además, la fuente de ruido N_3 representa ruido de VCO. En [3] y [5] se da un modelo de este último. La PSD del VCO es principalmente ruido blanco por encima de una frecuencia f_b , y WFM por debajo de f_b :

$$W_3(f) = W_{0,3} \left(1 + \left(\frac{f_b}{f} \right)^2 \right) \quad (\text{IV.2-24})$$

La ecuación (IV.2-24) se muestra esquemáticamente en la figura IV.2-2, que se ha pretendido que fuese un trazado log-log; la curva real estaría 3dB por encima del punto de discontinuidad a la frecuencia f_b . La frecuencia f_b viene dada por:

$$f_b = \frac{f_0}{2Q} \quad (\text{IV.2-25})$$

donde f_0 es la velocidad de línea (frecuencia del oscilador) y Q es el factor de calidad. Entrando con la ecuación (IV.2-25) en la ecuación (IV.2-24) y dividiendo el numerador y el denominador por f_n , de modo que el resultado se pueda expresar en términos del parámetro adimensional x se obtiene:

$$W_3(x) = W_{0,3} \left(1 + \left[\frac{(f_0 / f_n)}{2Qx} \right]^2 \right) \quad (\text{IV.2-26})$$

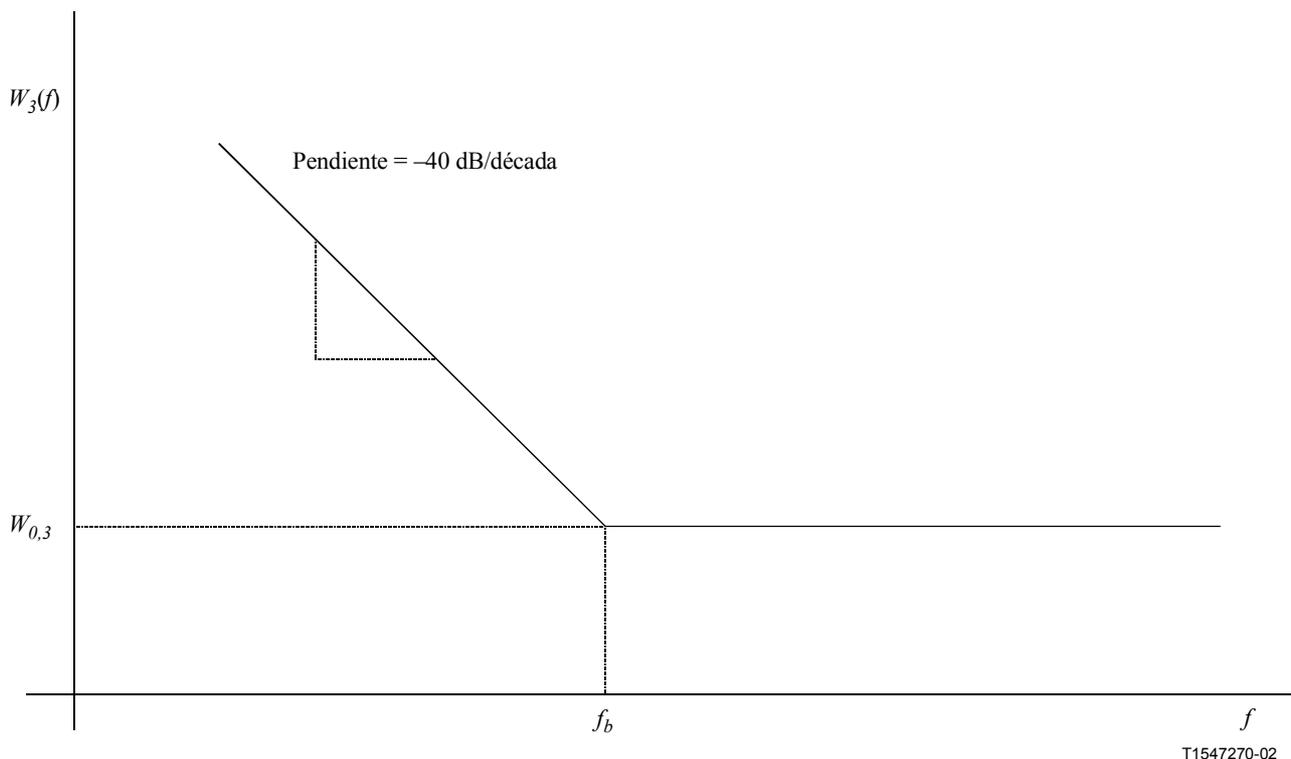


Figura IV.2-2/G.8251 – Representación esquemática de la densidad espectral de potencia de un VCO

En los ejemplos de la próxima cláusula se evalúan por separado las relaciones entre acumulación de fluctuación de fase de banda alta y banda ancha de los N regeneradores y la fluctuación de fase correspondiente de un regenerador, para la fuente de ruido N_{12} y la fuente de ruido N_3 . Esto significa que los coeficientes de magnitud de la PSD $W_{0,12}$ y $W_{0,3}$ se cancelan al establecer la relación. Los resultados dependen solamente de la tasa de amortiguación o, lo que es equivalente, de la punta de ganancia, la relación entre frecuencias de corte del filtro de medición de la fluctuación de fase y frecuencia natural no amortiguada o, lo que es equivalente, la anchura de banda del regenerador y, para la fuente de ruido N_3 , la relación entre velocidad de línea y frecuencia natural no amortiguada y factor Q del VCO. Esto puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma_{12,N}}{\sigma_{12,1}} = F_{12}(a_{LP}, a_{HP}, \zeta) \quad (\text{IV.2-27})$$

$$\frac{\sigma_{3,N}}{\sigma_{3,1}} = F_3(a_{LP}, a_{HP}, \zeta, a_0, Q) \quad (\text{IV.2-28})$$

donde:

$$\begin{aligned} a_{HP} &= \frac{f_{HP}}{f_n} \\ a_{LP} &= \frac{f_{LP}}{f_n} \\ a_0 &= \frac{f_0}{f_n} \end{aligned} \quad (\text{IV.2-29})$$

Las funciones F_{12} y F_3 son diferentes en los casos aleatorio y sistemático; además, a_{HP} es diferente en la fluctuación de fase de banda alta y de banda ancha. Pero las funciones y las cantidades son las mismas para las tres velocidades (para un conjunto dado de relaciones de frecuencias) porque las diversas anchuras de banda están en las mismas relaciones para las tres velocidades.

La relación entre frecuencia natural no amortiguada y anchura de banda de 3 dB y la relación entre punta de ganancia y tasa de amortiguación son [véase [4] para la ecuación (IV.2-30) y [3] para la ecuación. (IV.2-31)]:

$$f_{3dB} = f_n \left[2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1} \right]^{1/2} \quad (\text{IV.2-30})$$

$$H_p = 1 + \frac{1}{4\zeta^2} \quad (\text{IV.2-31})$$

La punta de ganancia de la ecuación (IV.2-31), H_p , es una fracción pura [es decir, esa punta de ganancia medida en dB es igual al logaritmo decimal de $H_p - 1$ de la ecuación multiplicado por un factor de 20 en la ecuación (IV.2-31)].

Para evaluar la media cuadrática y el valor rms de la fluctuación de fase de banda alta y de la fluctuación de fase de banda ancha se utilizó un programa C, aplicando la integración numérica de la PSD filtrada. Las PSD se evaluaron utilizando un paso de frecuencia, que siempre se supuso inferior a 0,1 veces la anchura de banda o frecuencia de corte mínimas (es decir, inferior a 0,1 veces la frecuencia de corte del filtro paso alto de fluctuación de fase de banda ancha). También se supuso siempre que la magnitud de la PSD era superior a la anchura de banda o frecuencia de corte máxima multiplicada por un factor de 10 (o sea, más de 10 veces la frecuencia de corte del filtro paso bajo de fluctuación de fase). Se señala que el filtro de medición de la fluctuación de fase impone al sistema una anchura de banda máxima; es decir, la PSD se puede integrar hasta la frecuencia infinita y el resultado convergerá debido al filtro paso bajo de medición de la fluctuación de fase (la integración se interrumpe a una frecuencia lo suficientemente alta como para que la contribución por encima de esa frecuencia sea irrelevante, pero no tan alta como para que el tiempo de simulación resulte prohibitivo).

IV.2.2 Resultados del modelo

Se efectuaron simulaciones para dos conjuntos de anchuras de banda de regenerador, correspondientes a los requisitos de SDH de la Rec. UIT-T G.783 y a los requisitos de OTN de la presente Recomendación. Las anchuras de banda de 3 dB del primero de 2 MHz, 8 MHz y (por extrapolación) 32 MHz para STM-16, STM-64 y STM-256, respectivamente. Estos valores se utilizaron para OTU1, 2 y 3, respectivamente. Las anchuras de banda de 3 dB del segundo fueron de

250 kHz, 1 MHz y 4 MHz para OTU1, 2 y 3, respectivamente. En todos los casos de simulación se supuso acumulación de fluctuación de fase.

Los parámetros generales de cada conjunto de casos se presentan de forma resumida en el cuadro IV.2-1 (casos de anchura de banda de SDH) y cuadros IV.2-2a y IV.2-2b (casos de anchura de banda de OTN). Debido a los requisitos de la presente Recomendación fue necesario efectuar simulaciones aparte de la acumulación de fluctuación de fase de banda ancha de OTU3. Esto se debe a que la anchura del filtro de medición paso alto de la fluctuación de fase de banda ancha de OTU3 es la misma que la de OTU2 (es decir, no cambia de escala con un factor de 4 con respecto a OTU2, al contrario de lo que ocurre con los demás parámetros). Los parámetros para los casos de simulación de OTU1 y OTU2 se dan en el cuadro IV.2-2a; los parámetros para los casos de simulación de OTU3 se dan en el cuadro IV.2-2b. Las anchuras de banda del filtro de medición de la fluctuación de fase se han tomado del cuadro 1. Se señala que la tasa de amortiguación y la frecuencia natural no amortiguada están relacionadas con la punta de ganancia y la anchura de banda de 3 dB por las ecuaciones (IV.2-30) y (IV.2-31).

Cuadro IV.2-1/G.8251 – Parámetros generales para los casos de simulación basados en anchuras de banda de regenerador G.783 (2 MHz, 8 MHz y 32 MHz, para OTU1, 2 y 3, respectivamente)

Parámetro	Valor
Punta de ganancia H_p	1,0115 (0,1 dB)
Tasa de amortiguación ζ	4,6465
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	$2,5 \times 10^{-3}$
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	0,5
f_{HP} / f_{3dB}	10
f_0 / f_{3dB}	1339
f_{3dB} / f_n	9,4006

Cuadro IV.2-2a/G.8251 – Parámetros generales para los casos de simulación basados en anchuras de banda de regenerador de OTU1 y OTU2 G.8251 (250 kHz y 1 MHz para OTU1 y 2, respectivamente)

Parámetro	Valor
Punta de ganancia H_p	1,0115 (0,1 dB)
Tasa de amortiguación ζ	4,6465
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	$2,0 \times 10^{-2}$
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	4,0
f_{LP} / f_{3dB}	80
f_0 / f_{3dB}	10710
f_{3dB} / f_n	9,4006

Cuadro IV.2-2b/G.8251 – Parámetros generales para los casos de simulación basados en anchuras de banda de regenerador de OTU3 G.8251 (4 MHz)

Parámetro	Valor
Punta de ganancia H_p	1,0115 (0,1 dB)
Tasa de amortiguación ζ	4,6465
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	$5,0 \times 10^{-3}$
$f_{HP, banda\ ancha} / f_{3dB}$	4,0
f_{LP} / f_{3dB}	80
f_0 / f_{3dB}	10755
f_{3dB} / f_n	9,4006

Para cada conjunto de anchuras de banda se presentan los resultados de los casos siguientes:

- ruido filtrado paso bajo (por ejemplo, en un receptor óptico, un detector de fase, etc.)
- ruido filtrado paso alto (por ejemplo, en un VCO):
 - sólo WPM (Q infinito);
 - WPM y WFM ($Q = 535$);
 - WPM y WFM ($Q = 100$);
 - WPM y WFM ($Q = 30$).

Los tres casos con factor Q finito corresponden, para OTU2, a una frecuencia de corte f_b entre WFM y WPM igual a 10 MHz, 53,5 MHz y 178 MHz. Los casos tienen por objeto representar una gama de valores del factor Q [el primer valor se eligió de modo que correspondiera a un número "redondo" de frecuencia de corte (para el caso de OTU2)].

IV.2.2.1 Resultados de los casos basados en anchuras de banda de regenerador SDH (Rec. UIT-T G.783)

Las figuras IV.2-3a y IV.2-3b muestran los resultados de la acumulación de fluctuación de fase de banda alta y banda ancha en el caso de ruido blanco filtrado paso bajo y en el caso de ruido blanco filtrado paso alto (es decir, WPM solamente), suponiendo acumulación de fluctuación de fase aleatoria. La figura IV.2-3a muestra la acumulación a lo largo de hasta 1000 regeneradores 3R, en una escala log-log. La figura IV.2-3b presenta los resultados en una escala lineal cuyo trazado se detiene en 200 regeneradores 3R con lo que, a la escala del trazado, son visibles los resultados para números más bajos de regeneradores.

Los resultados muestran que:

- La fluctuación de fase de banda ancha se acumula más rápidamente que la fluctuación de fase de banda alta.
- El ruido introducido vía filtro paso bajo se acumula más rápidamente que el ruido introducido vía filtro paso alto.

A propósito del segundo inciso hay que señalar que es muy difícil que el ruido introducido vía filtro paso alto se acumule sino hasta que el número de regeneradores 3R sea de algunos centenares. Esta falta de acumulación se debe a que la mayoría del ruido se halla por encima de la anchura de banda del regenerador; el ruido introducido en un regenerador es sometido a un fuerte filtrado en los regeneradores subsiguientes. Se indica, no obstante, que no hay WFM en el VCO aquí presente. El rápido incremento una vez que el número de regeneradores es de varios cientos se debe a la punta de ganancia de los regeneradores.

Según los resultados, la fluctuación de fase banda ancha y banda alta después de 100 regeneradores se acumula con unos factores multiplicativos de 5,5 y 2,0, respectivamente, para el ruido blanco del modelo paso bajo, y con factores de menos de 1,1 para el ruido blanco del modelo paso alto. Después de 1000 regeneradores, la fluctuación de fase de banda ancha y banda alta se acumula con unos factores de 21 000 y 2500, respectivamente, para el ruido blanco del modelo paso bajo, y con unos factores de aproximadamente 400 y 45, respectivamente, para el ruido blanco del modelo paso alto.

Las figuras IV.2-4a y IV.2-4b muestran los resultados de la acumulación de fluctuación de fase de banda alta y banda ancha en el caso de ruido filtrado paso alto con diversas cantidades de WFM. La cantidad relativa de WFM se indica mediante el factor Q ; como se ha indicado anteriormente, los tres casos corresponden a frecuencias de corte de 10 MHz ($Q = 535$), 53,5 MHz ($Q = 100$) y 178 MHz ($Q = 30$) para la velocidad de OTU2 [véase la ecuación (IV.2-25)]. Un Q más pequeño indica una cantidad relativa mayor de WFM; de las ecuaciones (IV.2-24) y (IV.2-25) se desprende que reduciendo Q por un determinado factor aumenta el componente WFM por ese mismo factor. Según lo previsto, la acumulación de fluctuación de fase es mayor en los casos con componente WFM mayor (factor Q menor). Los casos con $Q = 535$ muestran una acumulación de fluctuación de fase que se aproxima a la mitad de la acumulación del caso de ruido filtrado paso bajo de las figuras IV.2-3a y IV.2-3b. Por el contrario, los casos de $Q = 100$ y $Q = 30$ muestran una acumulación mayor que está muy cerca de la del caso de ruido filtrado paso bajo de las figuras IV.2-3a y IV.2-3b, para fluctuación de fase tanto de banda alta como de banda ancha. Esta concordancia entre los resultados del modelo de paso bajo y de paso alto se debe a que, para esta gama de valores del factor Q (es decir, por debajo de 100) y para las relaciones entre anchuras de banda de regenerador y filtro de medición que aquí se utilizan, el resultado de pasar la WFM a través de un filtro paso alto produce un ruido similar al de pasar la WFM a través de un filtro paso bajo.

Se señala además que la acumulación de fluctuación de fase del caso con $Q = 100$ y la del caso con $Q = 30$ son muy similares, lo cual se debe a que, en ambos casos, la frecuencia f_b está suficientemente por encima de la anchura de banda del regenerador que domina la contribución de la WFM. Para comprender esto hay que tener en cuenta que f_0/f_{3dB} es 1339 (cuadro IV.2-1), un valor bastante elevado en comparación con el factor Q de estos casos (30 y 100). Con esto no se pretende afirmar que la acumulación de fluctuación de fase absoluta sea la misma en los dos casos; los resultados de las figuras IV.2-4a y IV.2-4b corresponden a acumulación de fluctuación de fase relativa (fluctuación de fase fuera del j -ésimo regenerador dividida por fluctuación de fase fuera del primer regenerador) y es esta cantidad la que sí es la misma en ambos casos.

Los resultados obtenidos hasta ahora muestran lo rápidamente que se acumulan la fluctuación de fase de banda alta y la fluctuación de fase de banda ancha en los diversos modelos de ruido. No obstante, también interesa saber si, para un modelo dado, el límite correspondiente de generación de fluctuación de fase de banda alta o banda ancha es más estricto. Para determinar esto se necesita conocer la relación entre generación de fluctuación de fase de banda ancha y generación de fluctuación de fase de banda alta de un solo regenerador, en cada modelo (suponiendo la misma fuente de ruido para la generación de ambas fluctuaciones de fase). En el cuadro IV.2-3 se dan las relaciones.

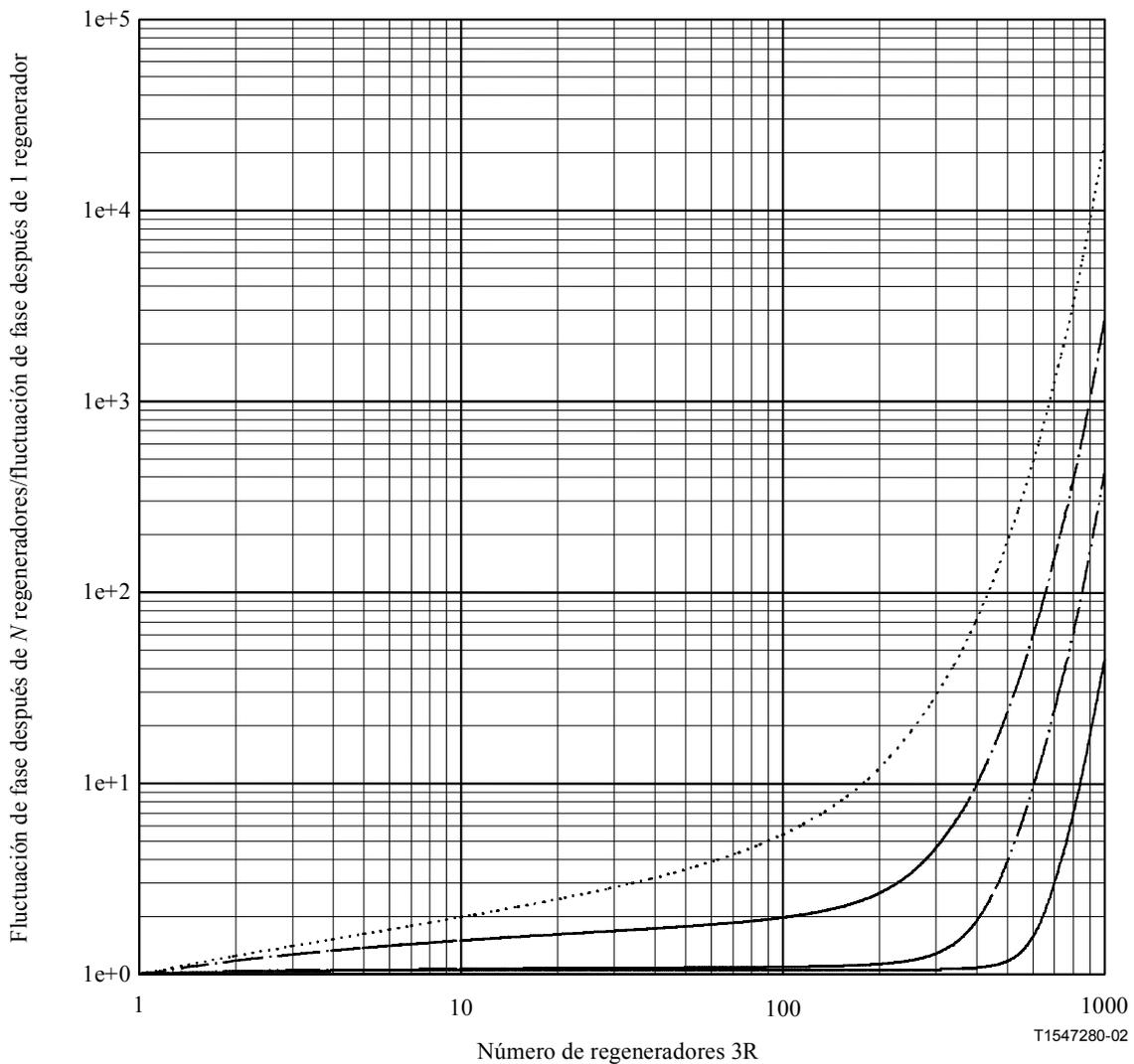
Cuadro IV.2-3/G.8251 – Relación entre la generación de fluctuación de fase rms de banda ancha y la de banda alta para un regenerador 3R (anchuras de banda de 3 dB de SDH)

Caso	Relación
Ruido filtrado paso bajo	1,2500
Ruido filtrado paso alto, sin WFM	1,0136
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 535$)	1,0502
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 100$)	1,2078
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 30$)	1,2400

Las relaciones indican que, para los modelos de ruido de paso alto, la generación de fluctuación de fase de banda ancha no es apreciablemente mayor que la generación de fluctuación de fase de banda alta. Incluso para el modelo de ruido de paso bajo la primera es sólo un 25% mayor que la segunda. Estas relaciones son bastante menores que el factor de 3 en que difieren los requisitos de generación de fluctuación de fase de banda ancha y de banda alta (0,3 UIpp frente a 0,1 UIpp para banda ancha y banda alta, respectivamente; véase el cuadro 5).

Los resultados (figuras IV.2-3 y IV.2-4, y cuadro IV.2-3) se pueden utilizar ahora para estimar si es posible cumplir los límites de red de fluctuación de fase del cuadro 1 para una cadena de referencia de 50 regeneradores 3R, suponiendo que los regeneradores cumplen los requisitos SDH de la Rec. UIT-T G.783 (y la respuesta es que los límites de red *no se pueden* cumplir en este caso). La figura IV.2-3b muestra que, en el caso de ruido de WPM de paso bajo, la acumulación de fluctuación de fase de banda alta alcanza un factor de 1,5 después de aproximadamente 10 regeneradores, y que se encuentra entre 1,5 y 2,0 después de 50 regeneradores. La figura IV.2-4b muestra que, en el caso de ruido de paso alto con $Q = 30$ ó 100, la acumulación de fluctuación de fase de banda alta alcanza un factor de 1,5 después de aproximadamente 10 y 15 regeneradores, respectivamente, y que se encuentra entre 1,5 y 2,0 después de 50 regeneradores. Puesto que el requisito de relación entre límite de red de fluctuación de fase de banda alta y generación de fluctuación de fase de banda alta es de 1,5 (es decir, 0,15/0,1), se deduce que una cadena de regeneradores de referencia, en la que cada uno de ellos satisface los requisitos de generación de fluctuación de fase y tiene un factor Q bajo o moderado, no cumplirá el límite de red de fluctuación de fase. De hecho, el límite de red será rebasado después de aproximadamente 10 u 11 regeneradores. Sólo en los casos de factor Q elevado ($Q = 535$, o el caso de WPM de paso alto, que corresponde a $Q \rightarrow \infty$) se puede cumplir el límite de red después de 50 regeneradores; en estos casos apenas hay acumulación de fluctuación de fase de banda alta. Se señala que para el caso de $Q = 535$, la acumulación de fluctuación de fase de banda ancha después de 50 regeneradores es aproximadamente un factor de 1,9. Así se cumple el límite de red de fluctuación de fase de banda ancha ya que el requisito de relación entre límite de red y generación es de 5 (es decir, 1,5/0,3).

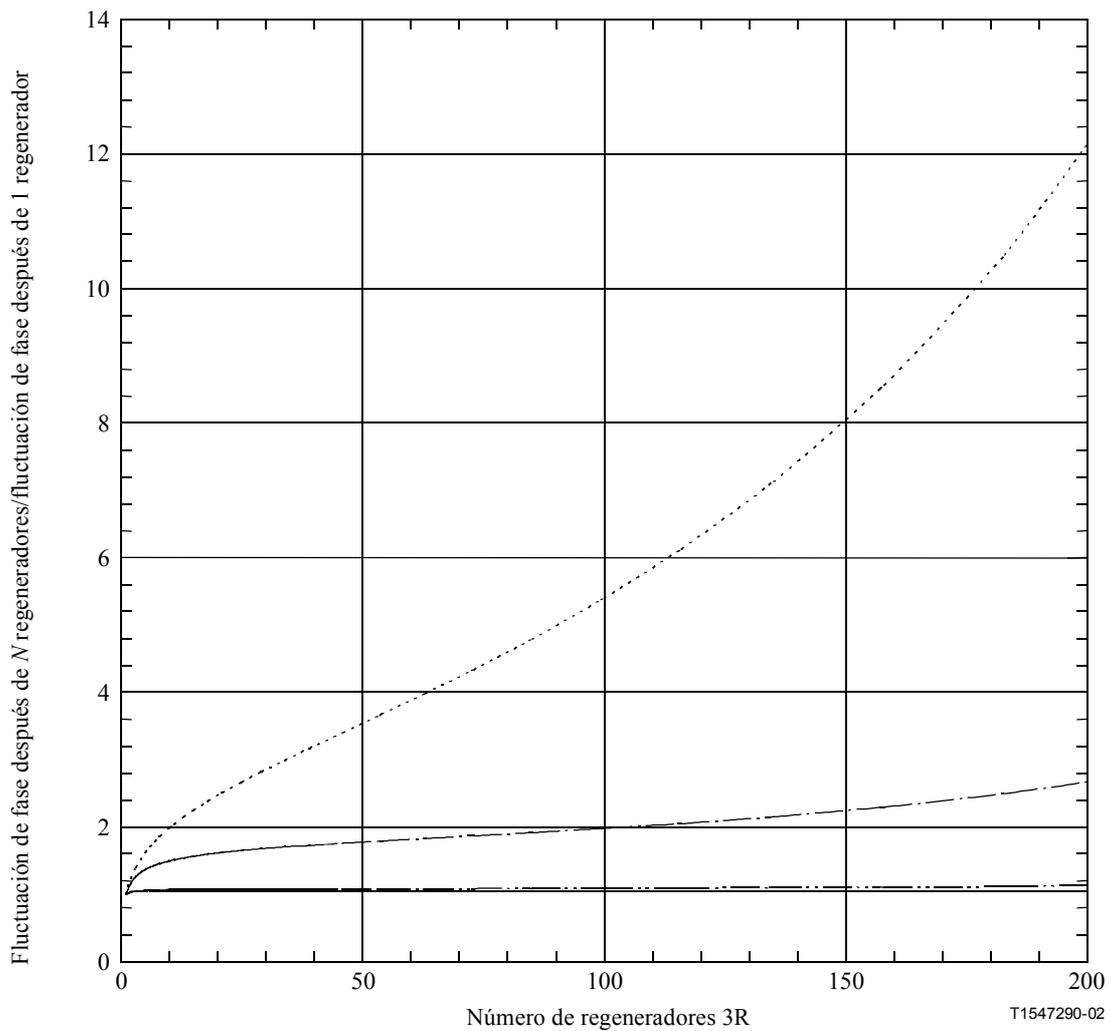
Cuando están presentes tanto el ruido de paso bajo como el ruido de paso alto (VCO), es necesario conocer, en principio, la cantidad relativa de cada uno de ellos. Esos valores junto con los resultados de la simulación que dieron origen a las figuras IV.2-3 y IV.2-4, podrían utilizarse para construir las curvas similares del caso combinado. Sin embargo, los resultados anteriores muestran que si el factor Q es suficientemente pequeño (es decir, inferior a aproximadamente 100, y ciertamente para valores en torno a 30), los modelos de ruido de paso bajo y paso alto dan resultados similares para la acumulación de fluctuación de fase *relativa*. En estos casos, no es necesario efectuar simulaciones separadas de ruido filtrado paso alto y paso bajo ni hace falta saber cuál es la cantidad relativa de cada tipo de ruido; basta con saber cuál es la generación de ruido total (y la anchura de banda del regenerador y la punta de ganancia) para determinar la acumulación de fluctuación de fase.



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- · - · - Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso bajo
- · · - Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso alto

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.783 (SDH), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, sin WFM en los casos de ruido de VCO (paso alto). Trazado log-log.

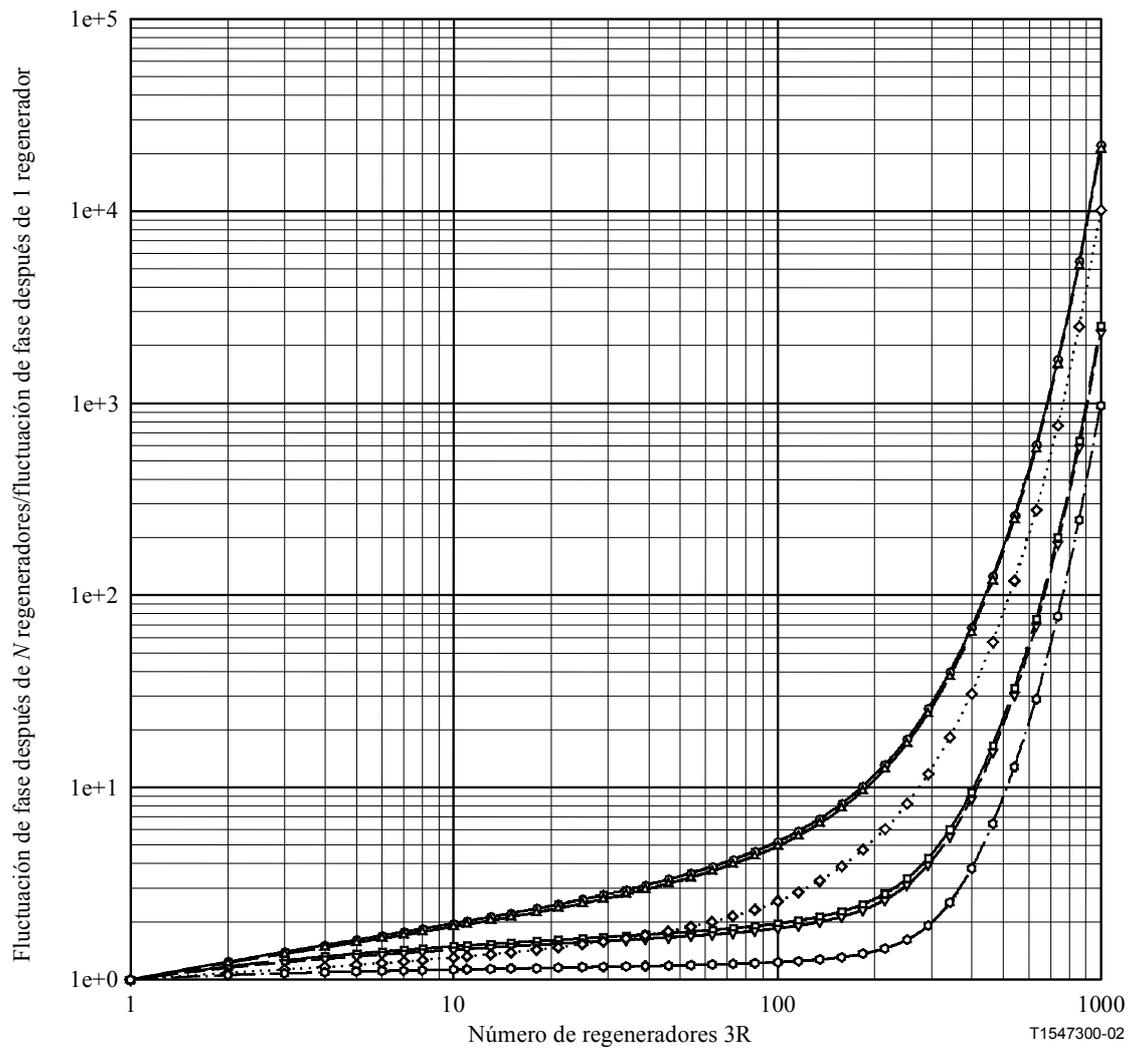
Figura IV.2-3a/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- · - · - Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso bajo
- · · - · Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso alto

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.783 (SDH), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, sin WFM en los casos de ruido de VCO (paso alto). Trazado lineal.

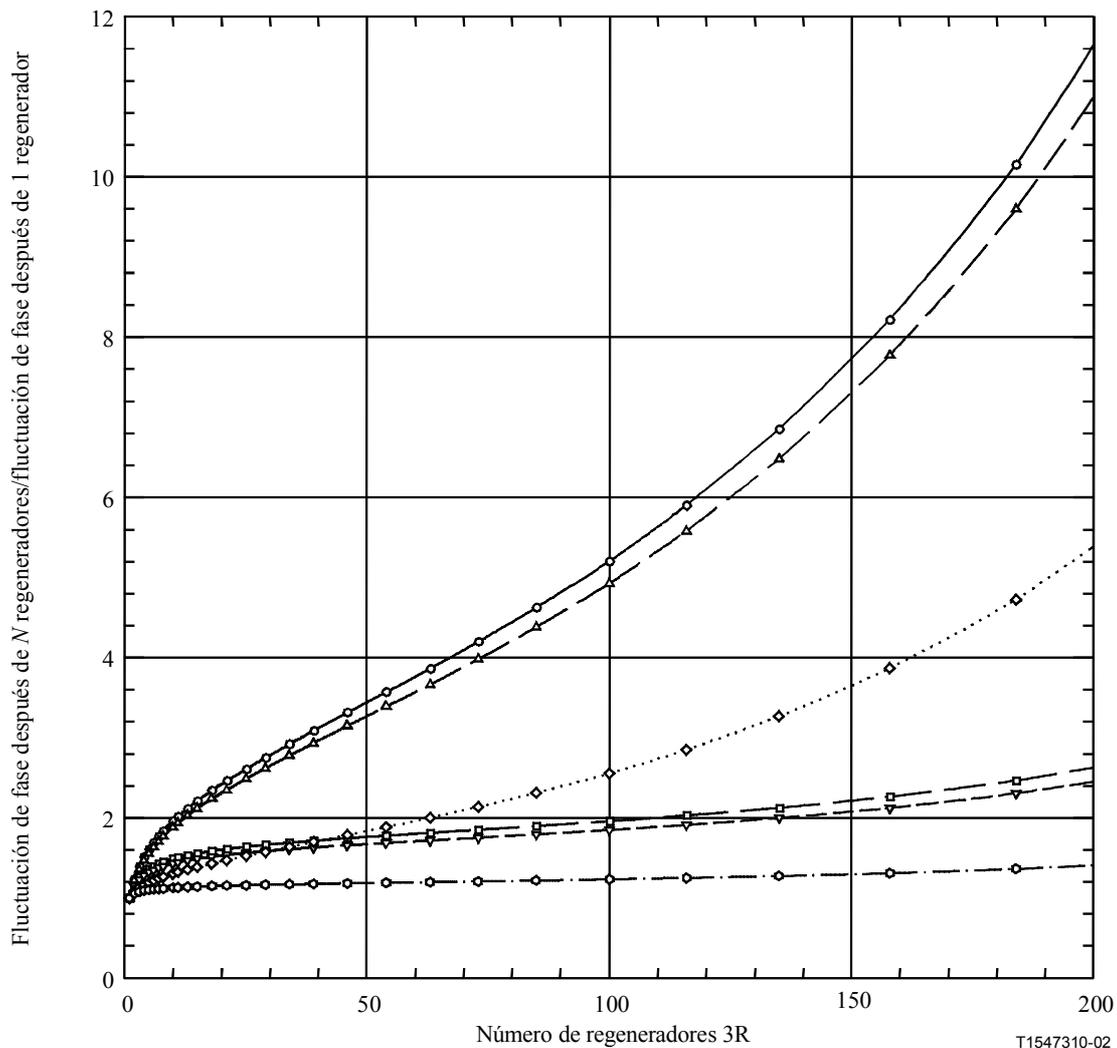
Figura IV.2-3b/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



- — Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 30$
- — Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 30$
- △ — Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 100$
- ▽ — Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 100$
- ◇ — Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 535$
- ⊙ — Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 535$

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.783 (SDH), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, ruido de VCO (paso alto) con WFM WPM y factor Q indicado. Trazado log-log.

Figura IV.2-4a/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



- Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 30$
- Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 30$
- △— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 100$
- ▽— Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 100$
- ◇···· Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 535$
- ◇— Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO con $Q = 535$

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.783 (SDH), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, ruido de VCO (paso alto) con WFM y WPM y factor Q indicado. Trazado lineal.

Figura IV.2-4b/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R

IV.2.2.2 Resultados para casos basados en anchuras de banda de regenerador 3R de OTN (en esta Recomendación): Fluctuación de fase de banda alta para OTU1, OTU2 y OTU3; fluctuación de fase de banda ancha para OTU1 y OTU2

Las figuras IV.2-5 y IV.2-6 (partes a y b de cada figura) muestran los resultados de la fluctuación de fase de banda ancha para regeneradores 3R de OTU1 y OTU2 y los resultados de la fluctuación de fase de banda alta para regeneradores 3R de OTU1, OTU2 OTU3. Las anchuras de banda de 3 dB son menores que las anchuras de banda de regenerador SDH correspondientes por un factor de 8. Las figuras IV.2-5a y IV.2-5b muestran los resultados de la acumulación de fluctuación de fase de banda alta y banda ancha en el caso de ruido blanco filtrado paso bajo y en el caso de ruido blanco filtrado paso alto (es decir, WPM solamente), suponiendo acumulación de fluctuación de fase sistemática. Las figuras IV.2-6a y IV.2-6b muestran los resultados de la acumulación de fluctuación de fase de banda alta y banda ancha para el caso de ruido filtrado paso alto con diversas cantidades de WFM. Al igual que en los casos anteriores, basados en anchuras de banda de regenerador SDH, la cantidad relativa de WFM se indica mediante el factor Q ; los valores del factor Q aquí utilizados son los mismos que en los casos SDH ($Q = 30, 100$ y 535). Un valor de Q más pequeño indica una cantidad relativa de WFM mayor.

El cuadro IV.2-4 muestra la relación entre la generación de fluctuación de fase de banda ancha y la generación de fluctuación de fase de banda alta con un solo regenerador, correspondiente a cada modelo (suponiendo la misma fuente de ruido para la generación de fluctuación de fase de banda alta y la generación de fluctuación de fase de banda alta). Comparando esos resultados con los del cuadro IV.2-3 para anchuras de banda SDH, se ve que en este caso, la relación entre acumulación de fluctuación de fase de banda ancha y acumulación de fluctuación de fase de banda alta es mayor. Además, el grado en que aumenta aquí esa relación es mayor en los casos en que una porción más grande del ruido se halla en la parte del espectro de baja frecuencia. En el caso de ruido filtrado paso bajo esto se debe a que se filtra más ruido en la medición de la fluctuación de fase de banda alta que en la medición de la fluctuación de fase de banda ancha, y la cantidad relativa de ruido restante después del filtrado en la medición de banda ancha, con respecto a la medición de banda alta, es mayor a medida que se reduce la anchura de banda del regenerador. En el caso de los modelos de ruido filtrado paso alto, el efecto es el mismo que en el modelo de ruido filtrado paso bajo a medida que el factor Q disminuye, porque con factores Q menores la generación de ruido a baja frecuencia se parece más al modelo de ruido filtrado paso bajo.

Cuadro IV.2-4/G.8251 – Relación entre la generación de fluctuación de fase rms de banda ancha y la de banda alta para un regenerador 3R de OTU1 u OTU2 (anchuras de banda de 3 dB de OTN del cuadro A.4)

Caso	Relación
Ruido filtrado paso bajo	2,2725
Ruido filtrado paso alto, sin WFM	1,0308
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 535$)	1,4862
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 100$)	2,1927
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 30$)	2,2605

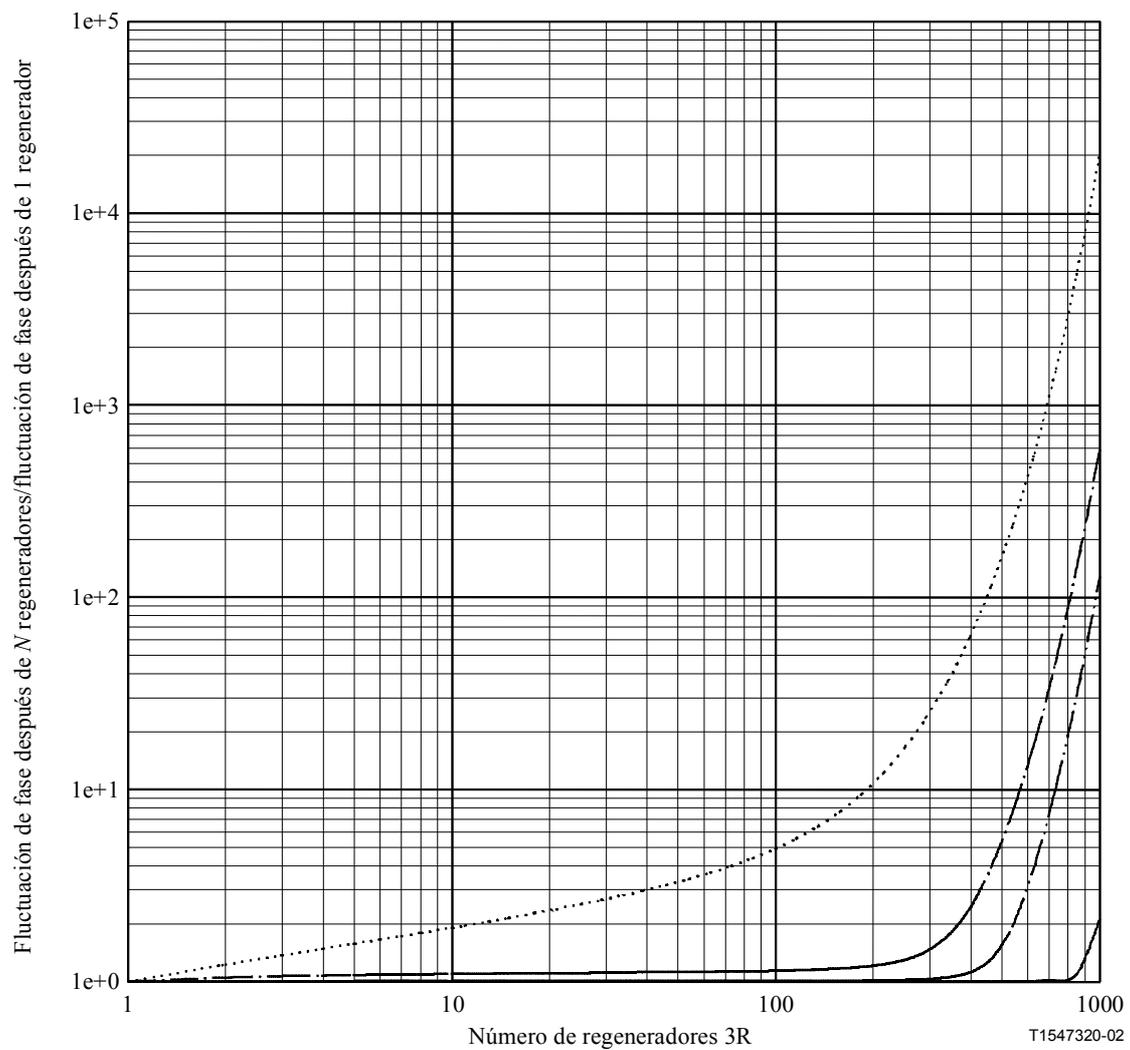
Los resultados de la acumulación de fluctuación de fase son cualitativamente similares a los de los casos SDH correspondientes, con la salvedad de que en general hay menos acumulación de fluctuación de fase. Por ejemplo, después de 100 regeneradores, la fluctuación de fase de banda ancha se acumula con un factor multiplicativo de aproximadamente 5 en el caso de ruido filtrado paso bajo (figura IV.2-5b) y por factores de aproximadamente 4,8, 4,8 y 4 en el caso de ruido filtrado paso alto con $Q = 30, 100$ y 535 , respectivamente. Los factores de acumulación de fluctuación de fase correspondientes en los casos de anchuras de banda de regenerador SDH

son 5,5, 5,2, 5 y 2,6, respectivamente. Se señala que, de estos casos, el único en el que hay menos acumulación de fluctuación de fase SDH es el de ruido filtrado paso alto con $Q = 535$. Al igual que en los casos de anchuras de banda de regenerador SDH, la acumulación de fluctuación de fase del caso $Q = 100$ y la del caso $Q = 30$ son muy similares.

Los resultados (figuras IV.2-5, IV.2-6 y cuadro IV.2-4) se pueden utilizar ahora para estimar si es posible cumplir los límites de red de fluctuación de fase de OTU1 y OTU2 del cuadro 1 para una cadena de referencia de 50 regeneradores 3R, suponiendo que los regeneradores cumplen los requisitos OTN del cuadro A.4 (y la respuesta es que los límites de red *se pueden* cumplir en este caso). La figura IV.2-5b muestra que, en el caso de ruido de WPM tanto de paso bajo como de paso alto, la acumulación de fluctuación de fase de banda alta permanece muy próxima a un factor de 1 hasta con 200 regeneradores. La figura IV.2-6b muestra que, en el caso de ruido de paso alto con $Q = 30, 100$ ó 535 , la acumulación de fluctuación de fase de banda alta permanece también muy próxima a un factor de 1 hasta con 200 regeneradores. Puesto que el requisito de relación entre límite de red de fluctuación de fase de banda alta y generación de fluctuación de fase de banda alta es de 1,5 (es decir, 0,15/0,1), se ve que una cadena de regeneradores de referencia, en la que cada uno de ellos satisface los requisitos de generación de fluctuación de fase, cumplirá el límite de red de fluctuación de fase. Los resultados de la simulación muestran todo esto para 200 regeneradores; el límite de red de fluctuación de fase de banda alta se cumple ciertamente con cadenas de 50 regeneradores de referencia.

El cuadro IV.2-4 indica que la relación mayor entre la generación de fluctuación de fase de banda ancha y la de banda alta es aproximadamente 2,27, que se produce para el modelo de ruido filtrado paso bajo. Puesto que el requisito de relación entre la generación de fluctuación de fase de banda ancha y la de banda alta es de 3 (0,3/0,1), se ve que un regenerador que cumple el requisito de generación de fluctuación de fase de banda alta, cumplirá también el requisito de generación de fluctuación de fase de banda ancha.

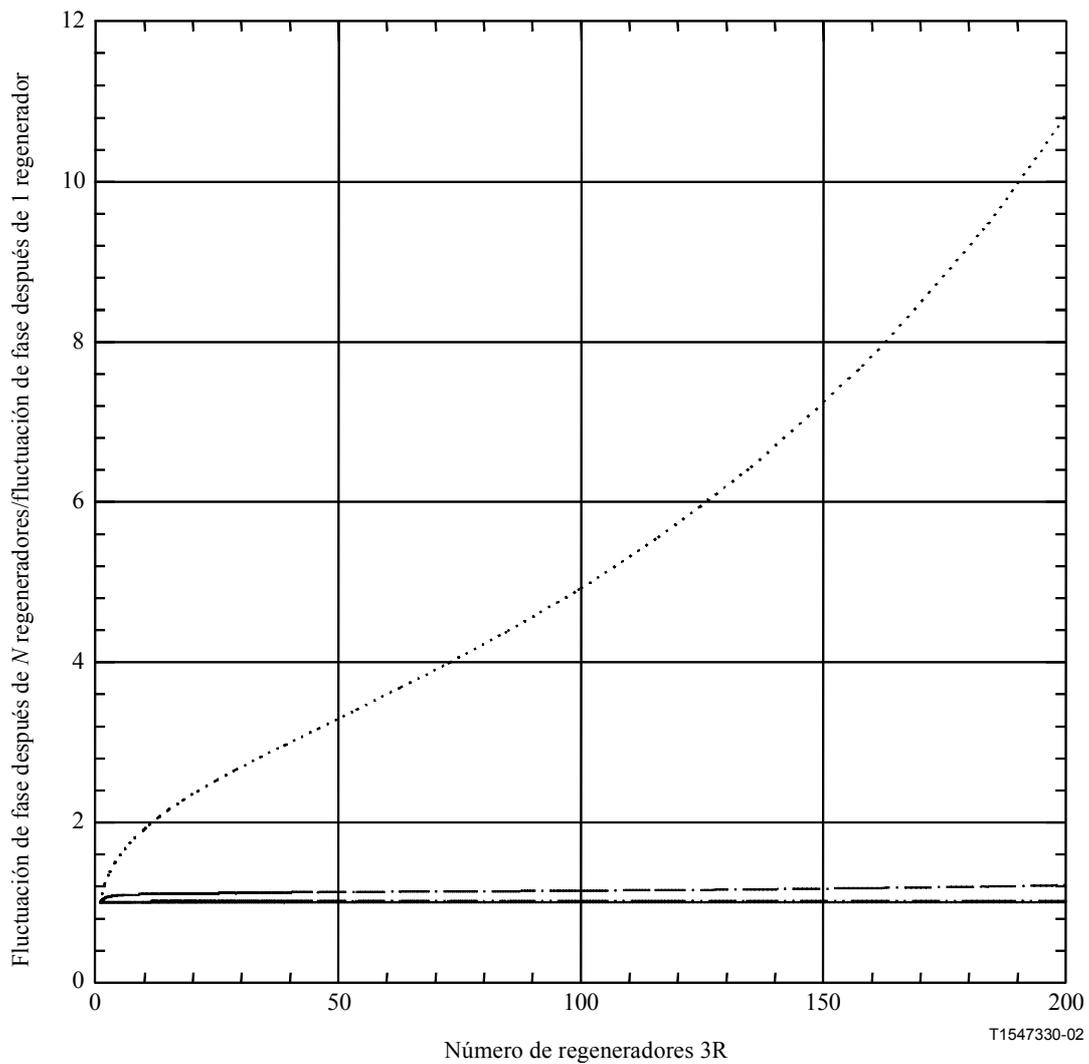
Por último, las figuras IV.2-5/ y IV.2-6 muestran que los límites de red de fluctuación de fase de banda ancha se cumplen para una cadena de 50 regeneradores 3R. La relación entre límite de red de fluctuación de fase de banda ancha y límite de generación de fluctuación de fase de banda ancha es de 5 (1,5/0,3). La figura IV.2-5b muestra que la fluctuación de fase de banda ancha aumenta por factores de 5 y 1, después de 100 regeneradores, para modelos de ruido de WPM filtrada paso bajo y WPM filtrada paso alto, respectivamente. La figura IV.2-6b muestra que la fluctuación de fase de banda ancha aumenta por factores de 4,8, 4,8 y 4, después de 100 regeneradores para modelos de ruido filtrado con $Q = 30, 100$ y 535 , respectivamente.



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- · - · - Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso bajo
- - - - - Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso alto

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, sin WFM en los casos de ruido de VCO (paso alto). Trazado log-log.

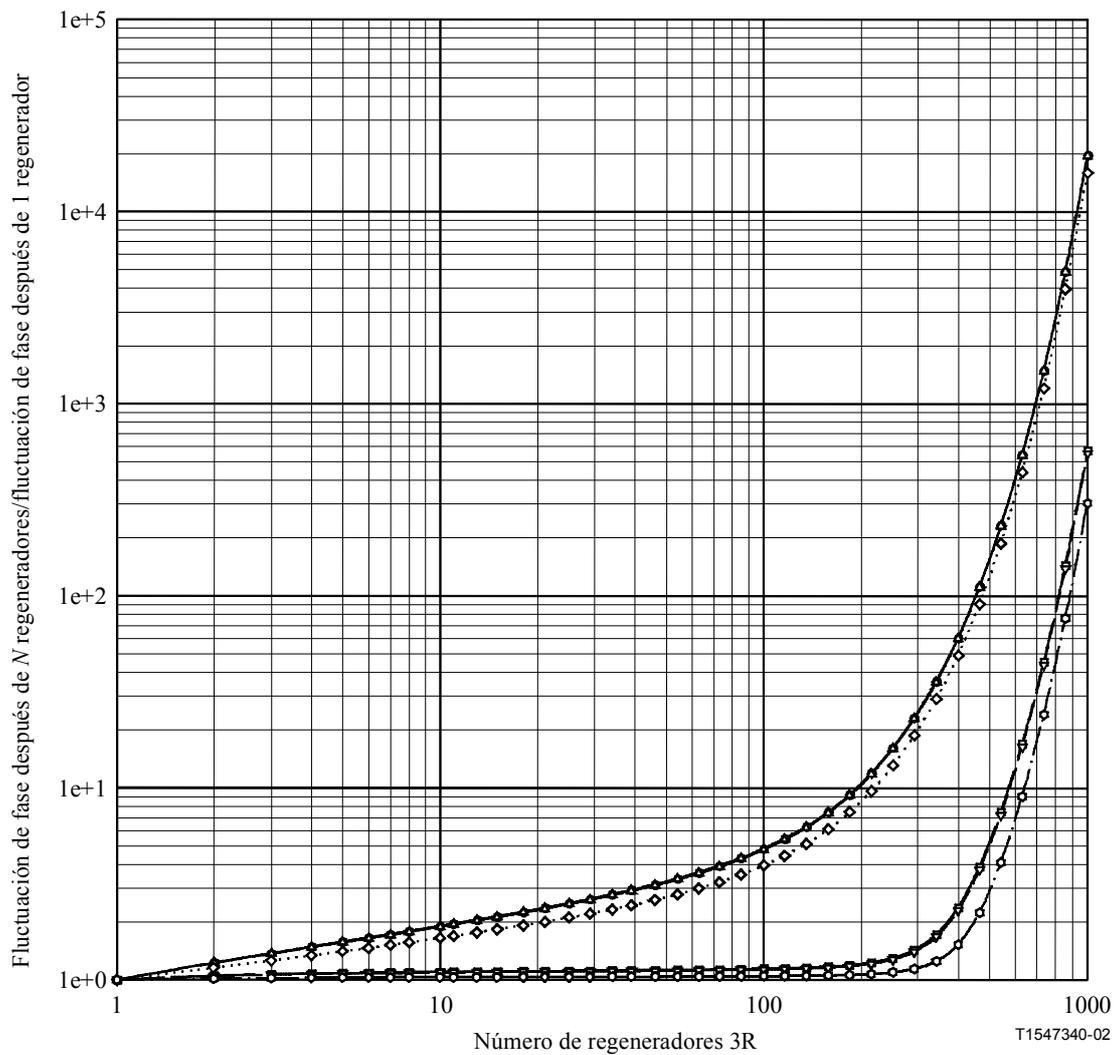
Figura IV.2-5a/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- · - · - Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso bajo
- · - · - Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- Fluctuación de fase de banda alta, WPM paso alto

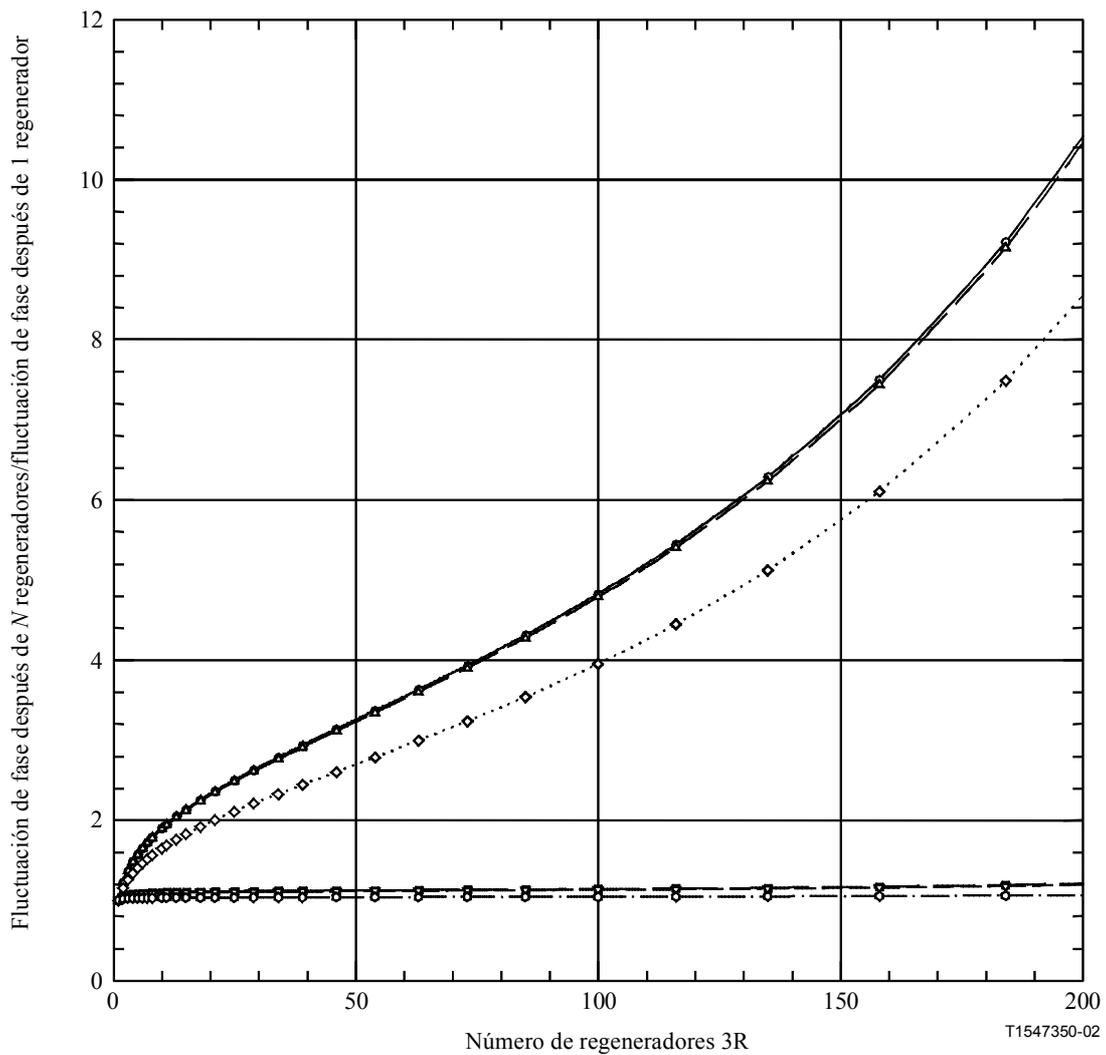
NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, sin WFM en los casos de ruido de VCO (paso alto). Trazado lineal.

Figura IV.2-5b/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, ruido de VCO (paso alto) con WFM y WPM y factor Q indicado. Trazado log-log.

Figura IV.2-6a/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R



- Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 30$
- Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO $Q = 30$
- △— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO $Q = 100$
- ▽— Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO $Q = 100$
- ◇···· Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO $Q = 535$
- ◇— Fluctuación de fase de banda alta, ruido de VCO $Q = 535$

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, ruido de VCO (paso alto) con WFM y WPM y factor Q indicado. Trazado lineal.

Figura IV.2-6b/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase en N regeneradores 3R

IV.2.2.3 Resultados para casos basados en anchuras de banda de regenerador 3R de OTN (en esta Recomendación): Fluctuación de fase de banda ancha para OTU3

Las figuras IV.2-7a y IV.2-7b muestran los resultados de la acumulación de fluctuación de fase de banda ancha para OTU3. La comparación con los resultados anteriores para OTU1 y OTU2 muestra que apenas hay cambios (compárese la figura IV.2-7a con las curvas de fluctuación de fase de banda ancha de las figuras IV.2-5a y IV.2-6a; compárese la figura IV.2-7b con las curvas de fluctuación de fase de banda ancha de las figuras IV.2-5b y IV.2-6b). El cuadro IV.2-4 da la relación entre la generación de fluctuación de fase rms de banda ancha y la de banda alta para un solo regenerador 3R de OTU1 y OTU2. Los resultados correspondientes para OTU3, obtenidos con las nuevas simulaciones, se dan en el cuadro IV.2-5 (en el que se muestran los resultados para OTU1 y OTU2 a efectos de comparación). Además, los resultados para OTU3 son casi los mismos que los resultados correspondientes para OTU1 y OTU2.

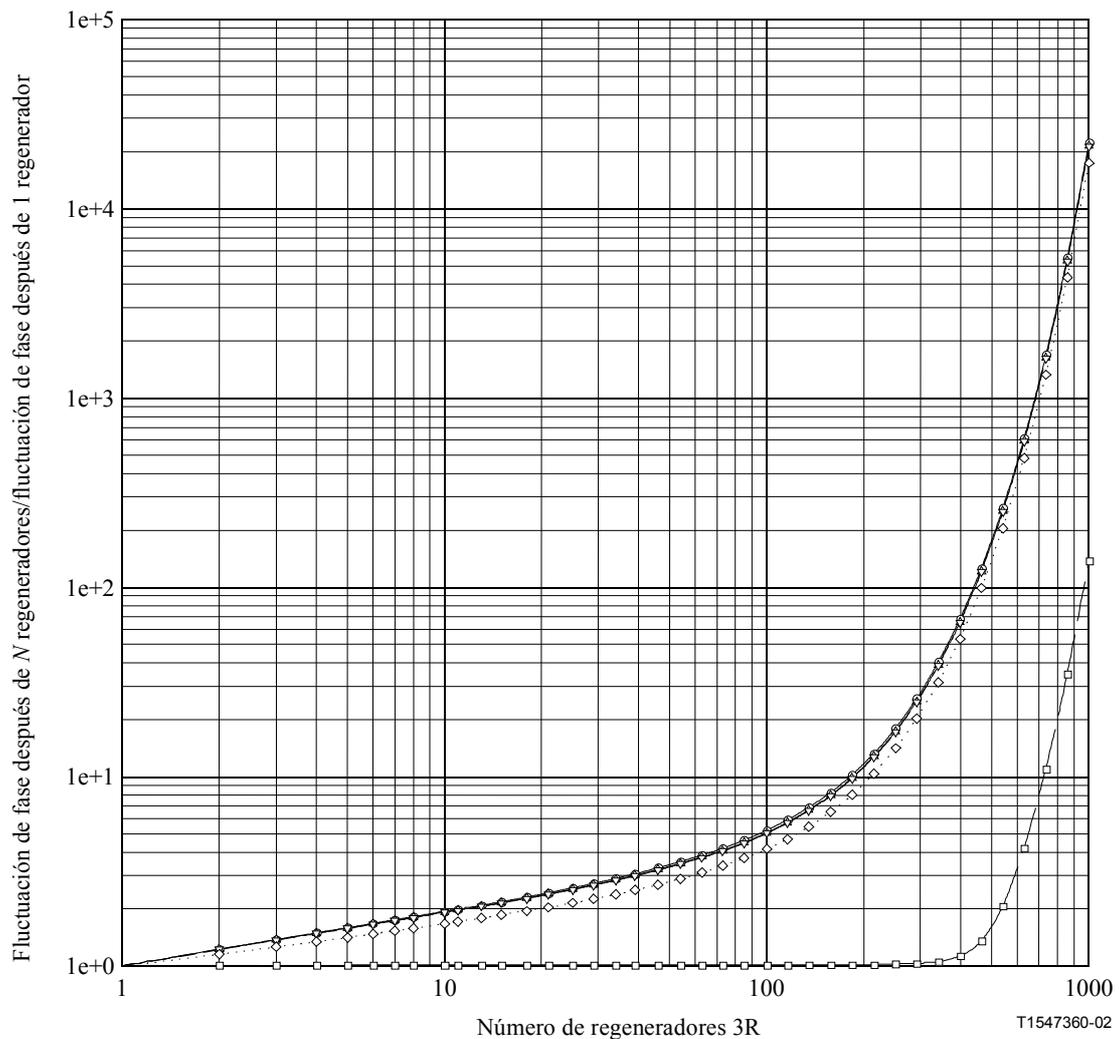
Cuadro IV.2-5/G.8251 – Relación entre la generación de fluctuación de fase rms de banda ancha y la de banda alta, para un regenerador 3R de OTU3 (los resultados para OTU1 y OTU3, del cuadro IV.2-4, se muestran a efectos de comparación)

Caso	Relación
Ruido filtrado paso bajo	2,2898 (frente a 2,2725)
Ruido filtrado paso alto, sin WFM	1,0308 (la misma)
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 535$)	1,4946 (frente a 1,4862)
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 100$)	2,2055 (frente a 2,1927)
Ruido filtrado paso alto, con WFM ($Q = 30$)	2,2734 (frente a 2,2605)

Los resultados se pueden utilizar ahora para comprobar si la acumulación de fluctuación de fase de banda ancha de OTU3 es aceptable. El cuadro IV.2-5 muestra que la relación más desfavorable entre la generación de fluctuación de fase de banda ancha y la de banda alta (en todos los modelos de ruido) es aproximadamente de 2,29 (frente a 2,27 para OTU1 y OTU2). Puesto que el requisito de relación entre la generación de fluctuación de fase de banda ancha y la de banda alta es de 12, se ve que un regenerador 3R y OTU3 que cumple el requisito de generación de fluctuación de fase de banda alta, cumplirá el requisito de generación de fluctuación de fase de banda ancha.

Por último, la figura IV.2-7b muestra que el incremento mayor del factor en fluctuación de fase rms de banda ancha después de 100 regeneradores, entre todos los modelos de ruido, es aproximadamente de 5,2, y se produce para WPM filtrada paso bajo. Aunque es mayor que la relación entre límite de red de fluctuación de fase de banda ancha y generación de fluctuación de fase de banda ancha, que es de 5 (6,0/1,2), todavía se cumple el límite de red suponiendo que se satisface el requisito de fluctuación de fase de banda alta. Esto es así porque, de acuerdo con los resultados del cuadro IV.2-5, el cumplimiento de la generación de fluctuación de fase de banda alta de 0,1 UIpp significa que la generación de fluctuación de fase de banda ancha sólo será de 0,229 UIpp y no de 1,2 UIpp. Por consiguiente, la acumulación de fluctuación de fase de banda ancha será $(5,2)(0,229) = 1,19$ UIpp. Se señala que, en cualquier caso, esto es para 100 regeneradores; para 50 (como en el HRM del apéndice III), la fluctuación de fase de banda ancha se incrementa con un factor multiplicativo de 3,4, que queda sobradamente dentro de la relación de 5.

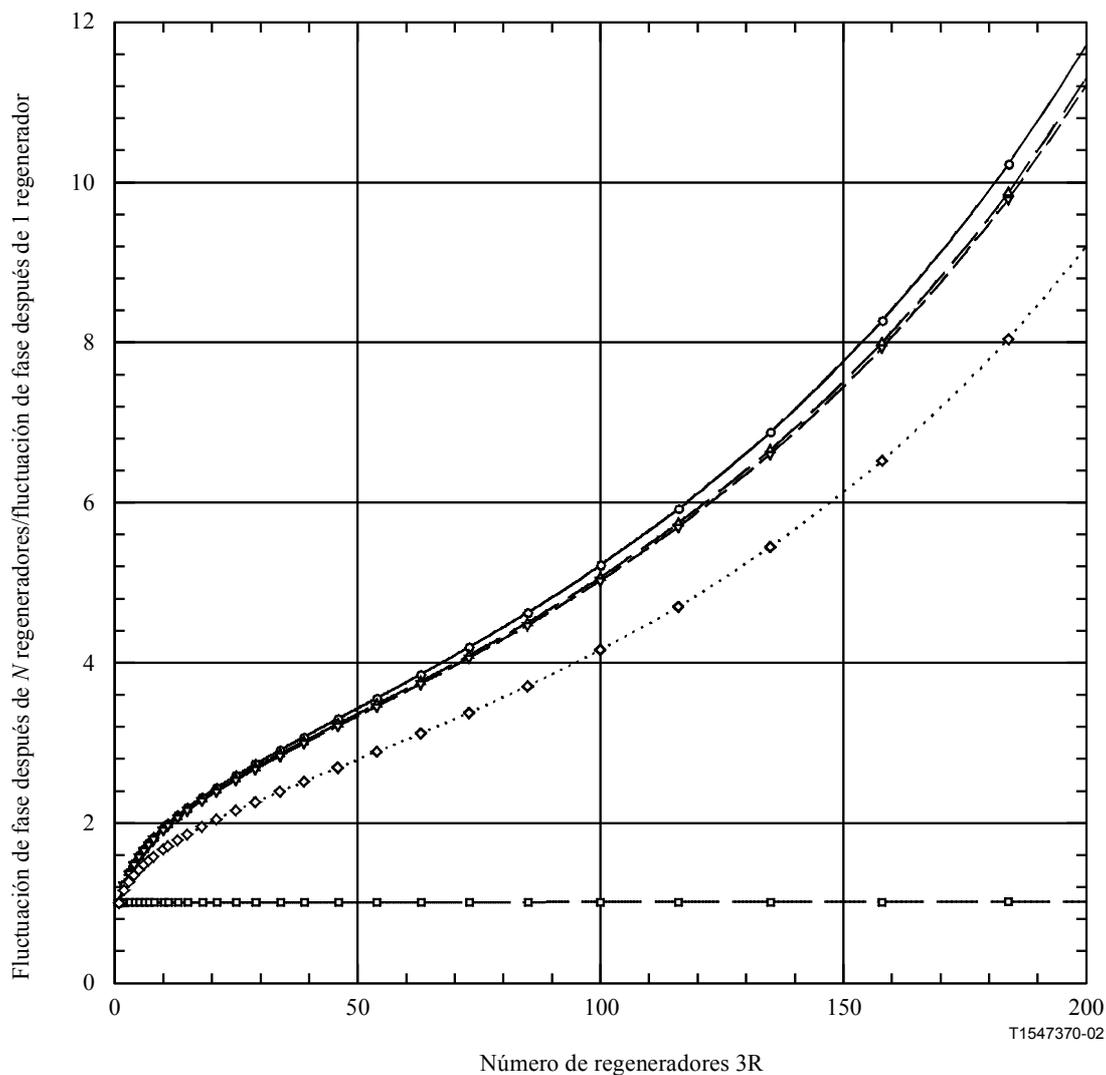
Los requisitos de generación de fluctuación de fase de banda ancha de OTU3 son coherentes, por tanto, con la anchura de banda de transferencia de fluctuación de fase de OTU3 y con el HRM del apéndice III.



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- △— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 30$
- ▽— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 100$
- ◇···· Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 535$

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerado 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, los modelos de ruido son: 1) el modelo de ruido filtrado paso bajo, 2) el modelo de ruido de VCO (filtrado paso alto) sin WFM y 3) los modelos de ruido de VCO (filtrado paso alto) con WFM y WPM y factor Q indicado. Trazado log-log.

Figura IV.2-7a/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase de banda ancha de OTU3 en N regeneradores 3R



- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso bajo
- Fluctuación de fase de banda ancha, WPM paso alto
- ▲— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 30$
- ▼— Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 100$
- ◇···· Fluctuación de fase de banda ancha, ruido de VCO con $Q = 535$

NOTA – Las hipótesis establecidas son: las anchuras de banda del regenerador 3R cumplen los requisitos G.8251 (OTN), acumulación de fluctuación de fase aleatoria, los modelos de ruido son: 1) el modelo de ruido filtrado paso bajo, 2) el modelo de ruido de VCO (filtrado paso alto) sin WFM y 3) los modelos de ruido de VCO (filtrado paso alto) con WFM y WPM y factor Q indicado. Trazado lineal.

Figura IV.2-7b/G.8251 – Incremento relativo de la fluctuación de fase de banda ancha de OTU3 en N regeneradores 3R

IV.2.3 Referencias (para el apéndice IV)

- [1] VARMA (E. L.), WU (J.): Analysis of Jitter Accumulation in a Chain of Digital Regenerators, *Proceedings of IEEE Globecom*, Vol. 2, pp. 653-657, 1982.
- [2] TRISCHITTA (P. R.) and VARMA (E. L.): Jitter in Digital Transmission Systems, *Artech House*, Norwood, MA, 1989.
- [3] WOLAVER (D. H.): Phase-Locked Loop Circuit Design, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1991.

- [4] GARDNER (F. M.): Phaselock Techniques, 2nd Edition, *Wiley*, New York, 1979.
- [5] LEESON (D. B.): A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum, *Proc. IEEE*, pp. 329-330, febrero de 1966.

IV.3 Modelo 2

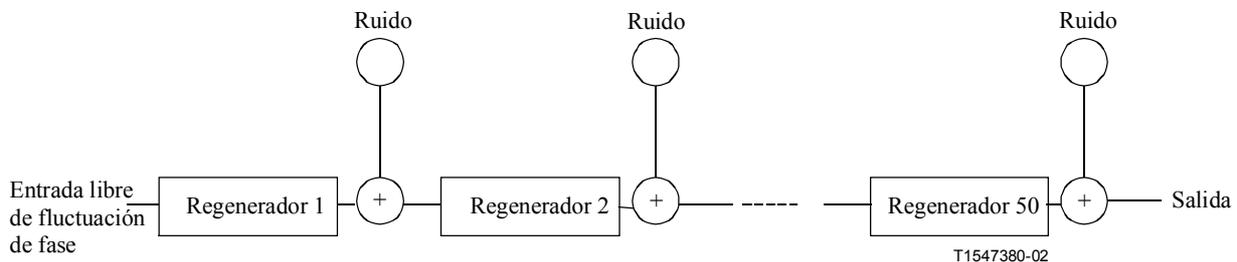


Figura IV.3-1/G.8251 – Representación esquemática del modelo 2

IV.3.1 Introducción

Se supone un número máximo de 50 regeneradores entre el establecimiento de la correspondencia y subsiguiente anulación de la misma en una isla OTN. Una aproximación conservadora en sistemas WDM que utilizan amplificadores ópticos y medidas compensadoras de la dispersión lleva a una distancia de más de 300 km entre dos operaciones de regeneración (longitud total de 15 000 km). El modelo de regenerador utilizado en trabajos anteriores, basados en regeneradores SDH, es un PLL de segundo orden que filtra ruido de banda ancha. El ruido de banda ancha, según las hipótesis establecidas, es una fluctuación de fase dependiente del patrón con densidad espectral de potencia constante. La anchura de banda de 3 dB de 8 MHz del regenerador es el filtro de conformación del ruido. El valor de la fluctuación de fase a la salida, medida con un filtro paso banda (4 MHz a 80 MHz) es de 0,01 URms. Los detalles del filtro se describen en la Rec. UIT-T G.825.

Aquí se utiliza el mismo filtrado que en la Rec. UIT-T G.825 debido a la semejanza entre el regenerador STM-64 y el regenerador OTU2. La velocidad binaria de OTU2 es aproximadamente un 7,6% superior a la del STM-64. La generación de fluctuación de fase máxima permitida de un regenerador STM-64 se da, en la Rec. UIT-T G.783, para dos combinaciones de filtrado paso alto y paso bajo. El valor de fluctuación de fase medido en la gama comprendida entre 4 MHz y 80 MHz no deberá exceder de 0,1 UIpp. El valor entre 20 kHz y 80 MHz no deberá exceder de 0,3 UIpp. Esto indica claramente que en torno al 90% de la potencia de ruido total podría concentrarse en la gama situada por debajo de 4 MHz.

Si se supone una anchura de banda de 8 MHz y una punta de ganancia de 0,1 dB, el regenerador correspondiente no podría funcionar en cascada en una cadena sin rebasar el requisito de tolerancia a la fluctuación de fase de 0,15 UIpp de la Rec. UIT-T G.825. El requisito de 0,15 UIpp es el más importante. El filtro paso alto de 4 MHz simula de hecho la fluctuación de fase de alineación de una recuperación de reloj con una anchura de banda supuesta de 4 MHz. Esa fluctuación de fase de alineación describe también la desviación del momento del muestreo con respecto al momento de muestreo estático (libre de fluctuación de fase) dentro del ojo de recepción.

Si se utiliza un regenerador como el de la Rec. UIT-T G.783 se debe definir su anchura de banda. La distribución no uniforme del ruido es la razón por la que la anchura de banda de los regeneradores ha de reducirse por debajo del valor de 8 MHz.

IV.3.2 Estructura de los bloques de construcción equivalentes para la simulación de ruido

Cada regenerador contiene en su salida un punto de suma en el que se añade la fluctuación de fase intrínseca. El espectro del ruido es ruido blanco gaussiano filtrado paso bajo. La función de transferencia de fluctuación de fase del regenerador se modela como un PLL de segundo orden con

una punta de ganancia de 0,1 dB. La entrada del regenerador debe tener un PLL de recuperación de reloj con frecuencia esquina (es decir, anchura de banda de 3 dB) superior a 4 MHz (aceptación de la fluctuación de fase) que añade un cierto grado de filtrado adicional a la función de transferencia de fluctuación de fase. Esto no se tuvo en cuenta en la simulación debido a la anchura de banda mucho mayor en comparación con la anchura de banda del PLL dominante.

Lo anterior significa que, para la simulación, la anchura de banda del regenerador sólo se modela con la función de transferencia (dominante) del PLL en la parte transmisión del regenerador.

La conformación espectral de la fuente de ruido se eligió de tal manera que las potencias de ruido medidas después de las combinaciones de filtros paso alto-paso bajo de 20 kHz/80 MHz y 4 MHz/80 MHz difirieran por un factor de 9, lo que corresponde a un factor de 3 en valores rms y equivale a unos valores de fluctuación de fase de 0,3 UIpp y 0,1 UIpp, respectivamente. La fuente de ruido no describe un valor absoluto. Se utiliza como referencia normalizada para el cálculo de la acumulación.

La simulación muestra que se necesita una anchura de banda por debajo de 1,5 MHz para no rebasar el límite de 0,15 UIpp después de 50 operaciones de regenerador. Asumiendo un cierto margen de seguridad, se propone un valor de 1 MHz.

Los valores acumulados para una cadena de 50 regeneradores con una anchura de banda de 1 MHz, una punta de ganancia de 0,1 dB y la producción de ruido máxima permitida de acuerdo con los valores de la Rec. UIT-T G.783 son:

- 0,122 UIpp en la gama de frecuencias superiores;
- 0,815 UIpp en la gama de frecuencias de 20 kHz a 80 MHz.

La propuesta equivalente para la anchura de banda de un regenerador OTN que lleva las señales de cliente STM-16 es de 250 kHz.

IV.4 Generación de fluctuación de fase de los regeneradores que utilizan la conversión serie-paralelo

Los regeneradores que utilizan solamente un PLL, es decir, la recuperación de reloj, pueden tener requisitos que resulten contradictorios. Han de llevar a cabo un cierto grado de filtrado y su anchura de banda ha de ser lo bastante grande como para cumplir el requisito de tolerancia a la fluctuación de fase.

La tolerancia a la fluctuación de fase requiere una anchura de banda que ha de estar por encima de la frecuencia en la que comienza la primera pendiente 1/f. Esto podría llevar a una generación de fluctuación de fase relativamente alta que excediera del valor máximo permitido. En términos generales cabe decir que la finalidad de la recuperación del reloj no es la de reducir al mínimo la fluctuación de fase.

Los principales requisitos de la recuperación de reloj, a fin de optimizar la característica de errores de bit, son:

- mantener el momento de muestreo del "Flipflop" de retemporización de datos independiente de la frecuencia de reloj en la posición de apertura de ojo óptima (por ejemplo, utilizando un bucle de control integrador);
- seguir la modulación de fase de la señal entrante sin desviarse demasiado con respecto al momento de muestreo ideal (es decir, tolerancia a la fluctuación de fase);
- generar una fluctuación de fase intrínseca baja en términos de valores de cresta a cresta que no deberá exceder de una pequeña porción de la apertura de ojo utilizable.

Este último inciso no contiene, como se ve, ningún requisito relativo a la distribución espectral de la fluctuación de fase intrínseca.

A diferencia de la medición de la fluctuación de fase en donde se utilizan filtros limitadores de la banda, la fluctuación de fase generada en la recuperación de reloj se ha de considerar sin filtrado alguno porque describe la desviación del momento de muestreo ideal.

En el caso de velocidades binarias muy altas podría resultar problemática una recuperación de reloj optimizada a efectos de característica de errores de bit si no se vigila al mismo tiempo la fluctuación de fase a la salida.

La propuesta con la que se pretende superar esta dificultad consiste en utilizar una conversión serie-paralelo en la que la señal entrante se convierte normalmente en bytes. En este proceso, llamado deserialización, se utiliza a menudo una estructura de 16 bits paralelos.

A este nivel, la frecuencia a la que se puede efectuar el procesamiento de datos se reduce por un factor de 16. Así es posible utilizar un bucle de enganche de fase que realiza la función supresora de la fluctuación de fase con una anchura de banda reducida. A la salida del regenerador, las únicas fluctuaciones de fase son la de este PLL y la fluctuación de fase razonablemente baja del PLL que lleva a cabo la función demultiplexadora y la multiplicación de la frecuencia de reloj por un factor de 16.

Los conceptos anteriores permiten valores superiores de fluctuación de fase intrínseca de baja frecuencia debido a la menor anchura de banda de la función supresora de la fluctuación de fase. Dicha función filtra los componentes del ruido de fase de los regeneradores hasta un punto tal que la acumulación en las cadenas, definida en el HRM del apéndice III, no excede del límite de red.

Un ejemplo de lo anterior es la fluctuación de fase intrínseca máxima para OTU3 del cuadro A.2. Puede ser de 1,2 UIpp en la gama de bajas frecuencias.

Este valor abre claramente las puertas a la posible utilización de un concepto tal como el de PLL triple, ya que 1,2 UIpp es un valor a todas luces no permitido en un regenerador de una etapa (sólo recuperación de reloj) que, como se ha indicado anteriormente, produciría errores de bit.

Apéndice V

Información adicional sobre los requisitos relativos al error de fase del dispositivo que anula la correspondencia (ODCp) y la generación de fluctuación de fase de banda ancha del dispositivo que anula la correspondencia

V.1 Introducción

La cláusula A.7.3 contiene los requisitos de transferencia de fluctuación de fase del reloj que anula la correspondencia, es decir, el ODCp. La cláusula V.2 da información adicional sobre el error de fase del dispositivo que anula la correspondencia.

La cláusula A.5.1.2 contiene los requisitos de generación de fluctuación de fase del ODCp. En dicha cláusula se indica que uno de los objetivos de los requisitos de generación de fluctuación de fase de banda ancha del ODCp es asegurar que los espaciamientos debidos a la tara fija en la trama de OTUk no provocan una fluctuación de fase excesiva a la salida. La generación de fluctuación de fase de banda ancha del ODCp está limitada a 1,0 UIpp para anuladores de la correspondencia de STM-16, STM-64 y STM-256. La cláusula V.3 contiene información adicional sobre estos requisitos y el fundamento de los mismos.

V.2 Error de fase del dispositivo que anula la correspondencia

El dispositivo que anula la correspondencia (es decir, el desincronizador) está modelado como un bucle de enganche de fase (PLL) de segundo orden con un régimen de caída de 20 dB/década. El modelo es el mismo modelo 1 de regenerador 3R de IV.2 y se ilustra en la figura IV.2-1; sólo los valores numéricos de los parámetros son diferentes. Tomando como referencia la figura IV.2-1 y la ecuación (IV.2-1), la función de transferencia del desincronizador viene dada por:

$$H(s) = \frac{K_a K_o s + K_a K_o b}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{V.2-1})$$

donde K_a es la ganancia del detector de fase, K_o es la ganancia del VCO y b es la constante de tiempo integral suponiendo un filtro de bucle PI con función de transferencia $1+b/s$. La función de transferencia de error de fase, es decir, la función de transferencia entre la entrada del PLL y la diferencia entre la salida y la entrada del PLL viene dada por la ecuación (IV.2-7):

$$H_e(s) \equiv 1 - H(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_a K_o s + K_a K_o b} \quad (\text{V.2-2})$$

Combinando la ganancia del detector de fase con la ganancia del VCO para obtener la constante de tiempo proporcional global τ_p :

$$\tau_p = \frac{1}{K_a K_o} \quad (\text{V.2-3})$$

y definiendo la constante de tiempo integral $\tau_i = 1/b$, la función de transferencia de error de fase se puede expresar de nuevo de la siguiente manera:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_p \tau_i}} = \frac{\tau_p \tau_i s^2}{\tau_p \tau_i s^2 + \tau_i s + 1} \quad (\text{V.2-4})$$

La función de transferencia de error de fase también se puede expresar en forma canónica en términos de frecuencia natural no amortiguada y de tasa de amortiguación:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{V.2-5})$$

donde:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{\sqrt{\tau_p \tau_i}} \\ \zeta &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_i}{\tau_p}} \end{aligned} \quad (\text{V.2-6})$$

Por último, utilizando las ecuaciones (IV.2-30) y (IV.2-31), la función de transferencia de error de fase puede formularse nuevamente en términos de punta de ganancia y de anchura de banda de 3 dB. Con una relación amortiguadora suficientemente grande (satisfecha ciertamente por relaciones de amortiguación del orden de 4 ó 5, como es aquí el caso), la ecuación (IV.2-30) puede ser aproximada por:

$$\omega_{3dB} \cong 2\zeta\omega_n \quad (\text{V.2-7})$$

donde ω_{3dB} es la anchura de banda de 3 dB expresada en radianes/segundo. Por tanto:

$$H_e(s) = \frac{s^2}{s^2 + \omega_{3dB}s + \varepsilon\omega_{3dB}^2} \quad (\text{V.2-8})$$

siendo la cantidad ε es la parte fraccionaria de la punta de ganancia, es decir [véase la ecuación V.2-31]):

$$\varepsilon \equiv H_p - 1 = \frac{1}{4\zeta^2} \quad (\text{V.2-9})$$

La cantidad ε está relacionada aproximadamente con la punta de ganancia en dB por:

$$H_p(\text{dB}) = 20 \log_{10}\left(1 + \frac{1}{4\zeta^2}\right) \cong 8,6859 \ln\left(1 + \frac{1}{4\zeta^2}\right) \cong 8,6859\varepsilon \quad (\text{V.2-10})$$

Sea la entrada del PLL del ODCp una deriva de frecuencia D (las unidades de D son desplazamiento relativo de frecuencia por segundo, es decir, s^{-1}). La entrada, entonces, expresada como un historial de fase $u(t)$ en intervalos unitarios (UI), es [la notación $u(t)$, y $U(s)$ de su transformada de Laplace, se utilizan para la entrada en IV.2 y en la figura IV.2-1]:

$$u(t) = \frac{1}{2} D f_0 t^2 \quad (\text{V.2-11})$$

donde f_0 es la frecuencia del cliente a la entrada, es decir, la frecuencia de la señal del cliente en el dispositivo que establece la correspondencia. La transformada de Laplace de la entrada es:

$$U(s) = \frac{Df_0}{s^3} \quad (\text{V.2-12})$$

La transformada de Laplace del error de fase se obtiene multiplicando la función de transferencia de error de fase por la transformada de Laplace de la entrada de fase; el resultado es:

$$E(s) \equiv H_e(s)U(s) = \frac{\tau_p \tau_i}{\tau_p \tau_i s^2 + \tau_i s + 1} \times \frac{Df_0}{s} \quad (\text{V.2-13})$$

La ecuación (V.2-13) tiene la misma forma que la función de transferencia para la respuesta escalón de un oscilador amortiguado; si la tasa de amortiguación es superior a 1 (como ocurre aquí), el oscilador está amortiguado en exceso y no hay ningún sobreimpulso. En este caso, la respuesta máxima, es decir, el error de fase máximo, es igual al error de fase en estado estacionario. Viene dado por:

$$E_{ss} \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sE(s) = Df_0 \tau_p \tau_i \quad (\text{UI}) \quad (\text{V.2-14})$$

Las unidades de error de fase en estado estacionario de la ecuación (V.2-14) son UI. Para obtener el resultado en unidades de tiempo, hay que dividir lo anterior por la frecuencia del cliente f_0 :

$$E_{ss} = D \tau_p \tau_i \quad (\text{s}) \quad (\text{V.2-15})$$

Esta ecuación se puede expresar también en términos de anchura de banda de 3 dB y tasa de amortiguación utilizando las ecuaciones (V.2-6) y (V.2-7):

$$E_{ss} = D \frac{4\zeta^2}{\omega_{3dB}^2} = \frac{D\zeta^2}{\pi^2 f_{3dB}^2} \quad (\text{s}) \quad (\text{V.2-16})$$

Introduciendo $D = 10^{-8}/s$, $\zeta = 4,6465$ [que corresponde a una punta de ganancia de 0,1 dB; véase la ecuación (IV.2-31)] y $f_{3dB} = 300$ Hz, el error de fase en estado estacionario es:

$$E_{ss} = \frac{(10^{-8} s^{-1})(4,6465)^2}{\pi^2 (300 \text{ Hz})^2} = 2,43 \times 10^{-13} s = 0,243 \text{ ps} \quad (\text{V.2-17})$$

En la ecuación (V.2-17), la anchura de banda de 3 dB y la punta de ganancia cumplen exactamente los requisitos de A.7.3 (300 Hz y 0,1 dB, respectivamente). En la práctica, la anchura de banda y la punta de ganancia serán algo menores. De la ecuación (V.2-16) se desprende que disminuyendo la anchura de banda de 3 dB y la punta de ganancia (o sea, incrementando la tasa de amortiguación) se provoca un incremento del error de fase en estado estacionario. Por ejemplo, si la anchura de banda de 3 dB es 150 Hz y la punta de ganancia es 0,5% [es decir, aproximadamente 0,043 dB utilizando la ecuación (V.2-10)], lo que corresponde a una tasa de amortiguación de 7,07, el error de fase en estado estacionario viene dado por:

$$E_{ss} = \frac{(10^{-8} s^{-1})(7,07)^2}{\pi^2 (150 \text{ Hz})^2} = 2,25 \times 10^{-12} s \cong 2,3 \text{ ps} \quad (\text{V.2-18})$$

V.3 Generación de fluctuación de fase de banda ancha del dispositivo que anula la correspondencia debida a los espaciamentos causados por la tara fija en la trama de OTUK

Los requisitos de transferencia de fluctuación de fase y fluctuación lenta de fase del ODCp dados en A.7.3 y el cuadro A.1 garantizan que la fluctuación de fase debida al establecimiento de la correspondencia de las señales del cliente con la OPUk y la anulación de la misma, posiblemente numerosas veces, será una fluctuación de fase aceptable (es decir, se respetarán los límites de red correspondientes, que para el caso de clientes SDH se dan en la Rec. UIT-T G.825). Los requisitos de generación de fluctuación de fase del ODCp dados en A.5.1.2 y el cuadro A.3 garantizan que cualquier fluctuación de fase adicional producida por el ODCp estará dentro de los límites. Un ODCp que no genera ninguna fluctuación de fase adicional y cumple los requisitos de transferencia de A.7.3, a saber, anchura de banda de 3 dB que no excede de 300 Hz y punta de ganancia que no excede de 0,1 dB, cumplirá los requisitos del cuadro A.3. Por ejemplo, la fluctuación de fase de banda ancha de cero a cresta debida a una sola justificación cuando se anula la correspondencia de un STM-16 desde una OPU1 es aproximadamente de 0,4 UIpp suponiendo una anchura de banda de 300 Hz, una punta de ganancia de 0,1 dB y un filtro de medición de la fluctuación de fase de paso alto de 5 kHz para fluctuación de fase de banda ancha. La fluctuación de fase de cresta a cresta es por tanto dos veces ésta, o aproximadamente de 0,8 UIpp. Este valor se atiene al requisito de 1,0 UIpp del cuadro A.3.

El margen adicional de los requisitos del cuadro A.3 permite cierto grado de generación de fluctuación de fase del ODCp, manteniendo al mismo tiempo un valor aceptable de la acumulación de fluctuación de fase total. Una posible fuente de generación de fluctuación de fase del ODCp es la fluctuación de fase debida a los espaciamentos causados por la tara fija en la trama de OTUK. En la presente cláusula se considera esta fluctuación de fase y se muestra como la incorporación de un filtro adecuado después del filtro proporcional más integral en el bucle de enganche de fase (PLL) del ODCp puede reducir esa fluctuación de fase a un nivel irrelevante.

Al igual que en V.2, el dispositivo que anula la correspondencia se modela como un PLL utilizando el modelo de la figura IV.2-1; sin embargo, ahora se inserta el filtro adicional $G(s)$ entre el filtro del bucle $(1+b/s)$ y el VCO (K_o/s) . La forma de $G(s)$ se especificará más adelante. La función de transferencia, $H(s)$ para el PLL es:

$$H(s) = \frac{\frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right) G(s)}{1 + \frac{K_a K_o}{s} \left(1 + \frac{b}{s}\right) G(s)} = \frac{(K_a K_o s + K_a K_o b) G(s)}{s^2 + (K_a K_o s + K_a K_o b) G(s)} \quad (\text{V.3-1})$$

donde K_a es la ganancia del detector de fase, K_o es la ganancia del VCO y b es la constante de tiempo integral suponiendo un filtro de bucle PI con función de transferencia $1+b/s$. Definiendo la constante de tiempo proporcional como en la ecuación (V.2-3) la constante de tiempo integral $\tau_i = 1/b$, la frecuencia natural no amortiguada y la tasa de amortiguación como en la ecuación (V.2-6), la anchura de banda de 3 dB como en la ecuación (V.2-7) (en unidades de radianes/segundo) y la parte fraccionaria de la punta de ganancia como en la ecuación (V.2-9), la función de transferencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{(\omega_{3dB} s + \varepsilon \omega_{3dB}^2) G(s)}{s^2 + (\omega_{3dB} s + \varepsilon \omega_{3dB}^2) G(s)} \quad (\text{V.3-2})$$

Fijando $s = j\omega$ en la ecuación (V.3-2) para obtener la respuesta en frecuencia, dividiendo numerador y denominador por ω_{3dB}^2 y definiendo la cantidad adimensional $x = \omega/\omega_{3dB} = f/f_{3dB}$ (donde $\omega = 2\pi f$ y $\omega_{3dB} = 2\pi f_{3dB}$), se obtiene:

$$H(j\omega) = \frac{(jx + \varepsilon) G(j\omega)}{-x^2 + (jx + \varepsilon) G(j\omega)} \quad (\text{V.3-3})$$

Cada fila de una trama de OTUk, ODUk y OPUk tiene 3808 bytes de cabida útil de OPUk y 272 bytes de tara de OPUk, ODUk y OTUk (véase la Rec. UIT-T G.709). Los 272 bytes de tara provocan un espaciado cuyo tamaño es de $(8)(272) \text{ UI} = 2176 \text{ UI}$. Ese espaciado se repite con un periodo igual a un cuarto del periodo de trama de OTUk (porque la trama de OTUk tiene 4 filas). El resultado es una forma de onda de fase en diente de sierra con una amplitud de 2176 UI y un periodo igual al periodo de trama de OTUk dividido por 4. El caso más desfavorable es el de OTU1 (o sea, correspondencia de STM-16 en OTU1), porque el periodo de trama es aquí el más largo. En lo que queda de la presente cláusula, la atención se centra en este caso. El periodo del diente de sierra resultante es de $48,971 \mu\text{s} / 4 = 12,243 \mu\text{s}$. La frecuencia del diente de sierra es de 81,68 kHz.

Se puede obtener un valor aproximado de la magnitud de la respuesta en frecuencia teniendo en cuenta que el desarrollo en series de Fourier del diente de sierra consta de una frecuencia fundamental de 81,68 kHz y de sus armónicos. Puesto que $f_{3dB} = 300 \text{ Hz}$, la cantidad x es del orden de $81680/300 = 272$ o mayor. La cantidad ε , que es la parte fraccionaria de la punta de ganancia, es del orden de $0,1 \text{ dB}/8,6859 = 0,012$ [véase la ecuación (V.2-10)]. Es evidente, por tanto, que $x \gg \varepsilon$. Además, el filtro $G(s)$ es un filtro paso bajo; su magnitud nunca es mucho mayor que 1 (suponiendo una punta de ganancia pequeña) ni muy inferior a 1 para frecuencias por encima de su anchura de banda. Se señala, por último que $x^2 = (272)^2 = 73980 \gg x$. Con todo lo anterior, la magnitud de la respuesta en frecuencia dada por la ecuación (V.3-3) se puede aproximar como sigue:

$$|H(j\omega)| \cong \frac{|G(j\omega)|}{x} \quad (\text{V.3-4})$$

Considérese primero el caso en que no está presente el filtro $G(s)$, es decir, $G(s) = 1$. El PLL reduce entonces la amplitud de cada componente de frecuencia del diente de sierra por un factor x . Se puede obtener una estimación del orden de magnitud de la fluctuación de fase suponiendo que toda la energía del diente de sierra se concentra en el armónico más bajo y que la amplitud es de 2176 UIpp. La fluctuación de fase resultante es de $2176 \text{ UIpp} / 272 = 8 \text{ UIpp}$. Se obtuvo un valor más exacto de 6,3 UI mediante una simulación del dominio de tiempo utilizando una entrada en

diente de sierra. En cualquier caso, la fluctuación de fase está muy por encima del límite de 1,0 UIpp del cuadro A.3.

Para reducir la fluctuación de fase a un nivel aceptable, puede suponerse que el filtro $G(s)$ es un filtro paso bajo de tercer orden con una anchura de banda de aproximadamente 0,1 veces la frecuencia del diente de sierra, es decir:

$$G(s) = \left(\frac{a}{s+a} \right)^3 \quad (\text{V.3-5})$$

con $a = 2\pi f_a = 2\pi$ (8200 Hz). Aceptando de nuevo la aproximación de que toda la energía de la forma de onda de fase se halla en el armónico más bajo con una frecuencia de 81,68 kHz, la magnitud de la respuesta en frecuencia es aproximadamente:

$$|G(j\omega)| = \left(\frac{f_a}{\sqrt{f^2 + f_a^2}} \right)^3 \approx (0,1)^3 = 0,001 \quad (\text{V.3-6})$$

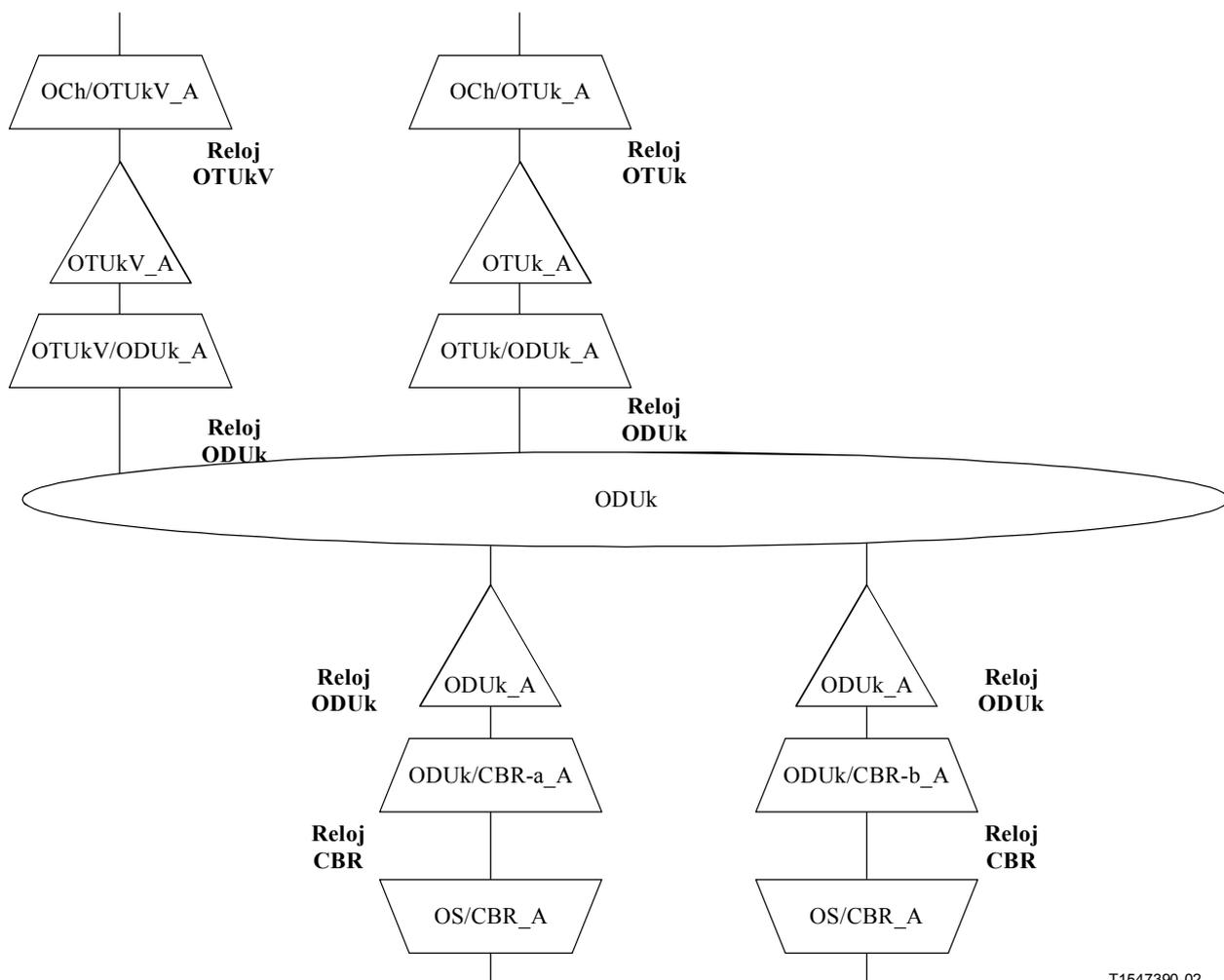
La estimación del orden de magnitud de la fluctuación de fase se reduce a 8×10^{-3} UIpp = 8 mUIpp. Se obtuvo un valor más exacto de $6,3 \times 10^{-3} = 6,3$ mUIpp mediante una simulación del dominio de tiempo utilizando una entrada en diente de sierra. En cualquier caso, la fluctuación de fase queda ahora holgadamente dentro del límite de 1,0 UIpp del cuadro A.3.

Apéndice VI

Funciones atómicas de la OTN

VI.1 Introducción

La figura VI.1 presenta de forma resumida las funciones atómicas utilizadas para la temporización de la OTN. El cuadro A.1 indica las relaciones entre el ODCa, ODCb, ODCr y ODCp y estas funciones atómicas.



T1547390-02

Figura VI.1/G.8251 – Funciones atómicas utilizadas para la temporización de la OTN

OCh/OTUk_A_Sk: Recuperación de reloj del reloj de OTUk.

OTUk/ODUk_A_Sk: Generan un reloj de ODUk a partir del reloj de OTUk (relación 255:239). Si se producen anomalías en la OTUk, incluido el fallo de la señal, se genera una AIS con un reloj de AIS. El reloj de ODUk ha de estar dentro de los límites en caso de pérdida de la señal.

OTUk/ODUk_A_So: Generan un reloj de OTUk a partir del reloj de ODUk (relación 239:255). Puesto que la señal ODUk está siempre disponible, no se requiere un reloj de AIS. Una conmutación entre varias señales ODUk con fases de reloj diferentes y frecuencias diferentes no afectará de manera negativa al reloj de OTUk.

OCh/OTUkV_A_Sk: Recuperación de reloj del reloj de OTUkV.

OTUkV/ODUk_A_Sk: Generan un reloj de ODUk, con una relación fija (establecimiento de la correspondencia síncrona) o basada en reloj de OTUkV y el relleno (establecimiento de la correspondencia asíncrona).

OTUkV/ODUk_A_So: Generan un reloj de ODUkV a partir del reloj de ODUk, con una relación fija (establecimiento de la correspondencia síncrona) o en funcionamiento libre con inserción de la ODUk en la OTUk.

ODUk/CBR-a_A_So: Generan un reloj de ODUk en funcionamiento libre. Inserción de CBR en la ODUk.

ODUk/CBR-b_A_So: Generan un reloj de ODUk a partir del reloj de CBR (relación fija). Generan un reloj de AIS durante el fallo de la señal entrante (incluida la pérdida de señal).

ODUk/CBR_A_Sk: Generan un reloj de CBR basado en un reloj de ODUk y decisión de relleno. Reloj de AIS al fallar la señal entrante.

OS/CBR_A_Sk: Recuperación de reloj para señal CBR.

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
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, 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, facsímil 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