



UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

G.911

(03/93)

SECCIONES DIGITALES Y SISTEMAS DE LÍNEA DIGITALES

PARÁMETROS Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA FIABILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA

Recomendación UIT-T G.911

(Anteriormente «Recomendación del CCITT»)

PREFACIO

El Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T) es un órgano permanente de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. El UIT-T tiene a su cargo el estudio de las cuestiones técnicas, de explotación y de tarificación y la formulación de Recomendaciones al respecto con objeto de normalizar las telecomunicaciones sobre una base mundial.

La Conferencia Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (CMNT), que se reúne cada cuatro años, establece los temas que habrán de abordar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que preparan luego Recomendaciones sobre esos temas.

La Recomendación UIT-T G.911, preparada por la Comisión de Estudio XV (1988-1993) del UIT-T, fue aprobada por la CMNT (Helsinki, 1-12 de marzo de 1993).

NOTAS

1 Como consecuencia del proceso de reforma de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), el CCITT dejó de existir el 28 de febrero de 1993. En su lugar se creó el 1 de marzo de 1993 el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T). Igualmente en este proceso de reforma, la IFRB y el CCIR han sido sustituidos por el Sector de Radiocomunicaciones.

Para no retrasar la publicación de la presente Recomendación, no se han modificado en el texto las referencias que contienen los acrónimos «CCITT», «CCIR» o «IFRB» o el nombre de sus órganos correspondientes, como la Asamblea Plenaria, la Secretaría, etc. Las ediciones futuras en la presente Recomendación contendrán la terminología adecuada en relación con la nueva estructura de la UIT.

2 Por razones de concisión, el término «Administración» se utiliza en la presente Recomendación para designar a una administración de telecomunicaciones y a una empresa de explotación reconocida.

© UIT 1994

Reservados todos los derechos. No podrá reproducirse o utilizarse la presente Recomendación ni parte de la misma de cualquier forma ni por cualquier procedimiento, electrónico o mecánico, comprendidas la fotocopia y la grabación en micropelícula, sin autorización escrita de la UIT.

ÍNDICE

Página

1	Introducción	1
2	Parámetros de fiabilidad y disponibilidad de los sistemas de fibra óptica	1
2.1	Parámetros de disponibilidad y fiabilidad de mantenimiento de los sistemas de fibra óptica	1
2.2	Parámetros de fiabilidad de los dispositivos activos de fibra óptica.....	2
2.3	Parámetros de fiabilidad de los dispositivos pasivos de fibra óptica	2
2.4	Parámetros de fiabilidad de las fibras y cables ópticos.....	2
3	Definiciones	3
4	Método de predicción de la fiabilidad en régimen permanente de dispositivos, unidades y sistemas de fibra óptica de configuración en serie	4
4.1	Objeto y alcance	4
4.2	Aplicaciones del método de predicción de tasa de averías	5
4.3	Directrices.....	5
4.4	Métodos de predicción de la tasa de averías en régimen permanente.....	6
5	Metodologías para el cálculo de los parámetros de mantenimiento y fiabilidad de respuesta en dispositivos, unidades y sistemas de fibra óptica de configuración en serie	7
5.1	MTBF de los haces de circuitos enchufables.....	7
5.2	MTBF del sistema (terminal y repetidor)	8
5.3	Frecuencia de las acciones de mantenimiento programado	9
5.4	Tasa aleatoria de averías	9
5.5	Factor de mortalidad infantil.....	9
6	Metodología de cálculo de los parámetros de disponibilidad y mantenimiento de sistemas de fibra óptica con protección de línea.....	9
6.1	Consideraciones generales – Protección de línea y protección de red.....	9
6.2	Metodología del espacio de estados para determinar los parámetros de disponibilidad y mantenimiento en sistemas de fibra óptica con protección de línea	10
6.3	Opciones de los sistemas de fibra con protección de línea	14
7	Circuitos de referencia para la disponibilidad de canal de extremo a extremo en sistemas de línea de fibras ópticas	15
8	Metodología de asignación de objetivos de indisponibilidad de extremo a extremo	17
8.1	Causas de la indisponibilidad – Consideraciones relativas a los sistemas de SDH y PDH de fibras ópticas.....	17
8.2	Metodología de asignación	17
Anexo A	– Determinación de la tasa de averías de una unidad en régimen permanente – Ejemplo	19
A.1	Descripción de la unidad (ejemplo).....	19
A.2	Parámetros de fiabilidad de los dispositivos (ejemplo)	19
A.3	Tasa de averías de la unidad en régimen permanente (FIT)	19
Anexo B	– Caso de estudio – Disponibilidad de canal para un enlace con repetidores a 4 × 140 Mbit/s por fibra óptica con protección de línea «3 + 1»	20
B.1	Descripción	20
B.2	Resultados – Indisponibilidad (minutos/año) por canal de 140 Mbit/s	22
Anexo C	– Caso de estudio – Disponibilidad de canal para una conexión por fibra punto a punto en la red local con protección de línea «1 + 1», con y sin redundancia de trayectos por cable	22
C.1	Descripción	23
C.2	Resultados.....	25

PARÁMETROS Y METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA FIABILIDAD Y LA DISPONIBILIDAD DE LOS SISTEMAS DE FIBRA ÓPTICA

(Helsinki, 1993)

1 Introducción

Esta Recomendación presenta las características de los parámetros necesarios para describir, y los procedimientos para predecir y calcular, la fiabilidad de los sistemas de fibra óptica, incluidas la fiabilidad de los dispositivos y la disponibilidad de los canales transmitidos a través de los sistemas. Se hace hincapié en los sistemas de fibra monomodo (véase la Figura 1).

2 Parámetros de fiabilidad y disponibilidad de los sistemas de fibra óptica

2.1 Parámetros de disponibilidad y fiabilidad de mantenimiento de los sistemas de fibra óptica

En esta subcláusula se presentan los parámetros de servicio y de mantenimiento de los sistemas. Los valores quedan en estudio. Se prevé, sin embargo, que puedan requerirse diferentes parámetros o valores en las diversas aplicaciones de los sistemas, como son: larga/media distancia, punto a punto, redes locales, etc. (véanse los Cuadros 1 y 2).

CUADRO 1/G.911

Parámetros de servicio del sistema	Unidades
Disponibilidad media del sistema ^{a)}	Indisponibilidad min/año
Disponibilidad media de un canal	Indisponibilidad min/año por canal
Disponibilidad de la interfaz del sistema	Indisponibilidad min/año
^{a)} Para estimar la cantidad de repuestos necesarios.	

CUADRO 2/G.911

Parámetros de mantenimiento del sistema	Unidades
MTBF del sistema (por ejemplo, de terminales, repetidores y medios)	Años
MTBF de los haces de circuitos enchufables ^{a)}	Años
Frecuencia de las acciones de mantenimiento programadas	Casos por años
Tasa de averías aleatorias	Casos por años
Factor de mortalidad infantil	Sin dimensiones
MTBF tiempo medio entre fallas (<i>mean time between failures</i>)	
^{a)} Para estimar la cantidad de repuestos necesarios.	

2.2 Parámetros de fiabilidad de los dispositivos activos de fibra óptica

En esta subcláusula se presentan los parámetros de fiabilidad para caracterizar dispositivos activos de fibra óptica tales como láseres, diodos fotoemisores (LED, *light emission diode*) y detectores. Los valores pueden ser proporcionados por diversos casos de estudio y quedan en estudio (véase el Cuadro 3).

CUADRO 3/G.911

Parámetros de fiabilidad de dispositivos activos de fibra óptica	Unidades
Vida media (ML)	Años
Desviación típica (σ)	
Tasa de averías por desgaste a los 10 años (λ_{10}) Tasa de averías por desgaste a los 20 años (λ_{20})	FIT FIT
Energía de activación tras el desgaste (E_n)	eV
Tasa de averías aleatorias (régimen permanente) (λ_r)	FIT
Energía de activación tras un avería aleatoria (E_n)	eV

2.3 Parámetros de fiabilidad de los dispositivos pasivos de fibra óptica

En esta subcláusula se presentan los parámetros de fiabilidad necesarios para caracterizar dispositivos pasivos de fibra óptica tales como conectores, empalmes y bifurcadores. La identificación de los parámetros y sus valores quedan en estudio (véase el Cuadro 4).

CUADRO 4/G.911

Parámetros de fiabilidad de dispositivos pasivos de fibra óptica	Unidades

2.4 Parámetros de fiabilidad de las fibras y cables ópticos

En esta subcláusula se presentan los parámetros de fiabilidad necesarios para caracterizar las fibras y cables ópticos. Pueden necesitarse diferentes parámetros para diferentes aplicaciones de sistemas, aspecto que queda en estudio (véase el Cuadro 5).

CUADRO 5/G.911

Parámetros de fiabilidad de las fibras y cables ópticos	Unidades

3 Definiciones

En esta subcláusula se presentan definiciones de los parámetros de fiabilidad para caracterizar la fiabilidad de los sistemas y dispositivos de fibra óptica. La fuente y el número de código del CCITT se indican entre paréntesis (*Libro Azul* del CCITT, Suplemento N.º 6 al fascículo II.3).

- 1) **elemento o entidad** (por ejemplo, un sistema o un canal) – Parte, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede considerarse individualmente [DV 3001].
- 2) **periodo de tasa de averías constante** – Posible periodo de la vida de un elemento no reparado en el que la tasa de averías es aproximadamente constante.

NOTA – En cada caso particular hay que precisar lo que se entiende por «aproximadamente constante» [DV 7308].

- 3) **disponibilidad** – Aptitud de un elemento para hallarse en estado de realizar una función requerida en un instante de tiempo determinado o en cualquier instante de tiempo de un intervalo de tiempo dado, suponiendo que se facilitan, si es necesario, los recursos externos.

NOTAS

- 1 La disponibilidad depende de aspectos combinados de la fiabilidad, la mantenibilidad y la logística de mantenimiento de un elemento.
- 2 En la definición del elemento deberán precisarse los recursos externos necesarios.
- 3 El término disponibilidad designa también la medida de esta aptitud [DV 4002].
- 4) **disponibilidad instantánea** – Probabilidad de que un elemento esté disponible en un instante de tiempo dado, t [DV 8101].
- 5) **disponibilidad media** – Valor normalizado de la integral de la disponibilidad instantánea en un intervalo de tiempo dado (t_1, t_2) [DV 8103].
- 6) **tiempo medio entre averías** (MTBF, *mean time between failures*) – Esperanza matemática del tiempo entre averías [DV 8208].
- 7) **periodo de fallos inicial (mortalidad infantil)** – Posible periodo inicial de la vida de un elemento, que comienza en un determinado instante de tiempo y durante el cual la intensidad instantánea de averías de un elemento reparado o la tasa instantánea de averías de un elemento no reparado disminuye rápidamente.

NOTA – En cada caso considerado hay que precisar lo que se entiende por «disminuye rápidamente» [DV 7306].

- 8) **factor de mortalidad infantil** (IMF, *infant mortality factor*) – Relación entre el número de averías esperado en un periodo inicial específico (por ejemplo el primer año) de servicio y el número de averías esperado en un periodo de tiempo de igual duración en régimen de funcionamiento permanente (antes de que se desgaste).
- 9) **vida media** (ML, *median life*) – En relación con los dispositivos optoelectrónicos, la vida media designa el punto, en una representación de probabilidades log-normal de los tiempos hasta la avería de los dispositivos, en el cual el 50% de los dispositivos fallan antes y el 50% de los dispositivos fallan después. (véase la Nota 1 del apartado 21).
- 10) **desviación típica** (σ) – En relación con los dispositivos optoelectrónicos, la desviación típica designa la expresión matemática normal de este parámetro estadístico, calculado a partir de los logaritmos naturales de los tiempos hasta la avería de los dispositivos (véase la Nota 2 del apartado 21).
- 11) **periodo de averías por desgaste** – Eventual periodo de la vida de un elemento reparado durante el cual la intensidad instantánea de averías de un elemento reparado o la tasa instantánea de averías de un elemento no reparado aumenta rápidamente.

NOTA – En cada caso considerado hay que precisar lo que se entiende por «aumenta rápidamente» [DV 7309].

- 12) **tasa de averías por desgaste** – Medida del número de elementos que fallan por unidad de tiempo debido a mecanismos de desgaste. No se calcula directamente para los dispositivos optoelectrónicos, pero se obtiene a partir de la esperanza matemática estadística de una distribución log-normal para la que se ha estimado la vida media y la desviación típica.
- 13) **avería por desgaste** – Avería cuya probabilidad de aparición aumenta con el paso del tiempo, como consecuencia de procesos propios del elemento [DV 5209].
- 14) **energía de activación** (E_n) – Mínima energía cinética del centro de masa necesaria antes de poder producirse una reacción química. Normalmente se expresa en unidades de electrón-voltios (eV). Se utiliza como una parte del factor de aceleración de Arrhenius del periodo de vida inicial.

- 15) **factor de aceleración de Arrhenius** – Expresión que detalla la relación entre los tiempos hasta la avería a dos temperaturas diferentes.

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_0}{\kappa} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

donde:

$t_{1,2}$ es el tiempo hasta la avería,

E_0 es la energía de activación en electrón-voltios (eV),

κ es la constante de Boltzman, $8,6 \times 10^{-5}$ eV/K,

$T_{1,2}$ es la temperatura absoluta, K.

- 16) **tasa aleatoria de averías** – Medida del número de unidades que fallan por unidad de tiempo debido a una diversidad de defectos de fabricación o (más a menudo) de montaje no relacionados con el mecanismo (o mecanismos) de desgaste ordinario. Una hipótesis común en los dispositivos optoelectrónicos es que el conjunto de mecanismos aleatorios de avería puede modelarse aproximadamente por una distribución exponencial. En ese caso, la tasa de averías no se obtiene directamente de los datos, sino de la esperanza matemática estadística (unilateral) de una distribución exponencial para un nivel de confianza dado (por ejemplo, un límite de confianza del 60%).
- 17) **tiempo de mantenimiento** – Intervalo de tiempo durante el cual se efectúa una acción de mantenimiento sobre un elemento, ya sea manual o automáticamente, incluyendo los retardos técnicos y los retardos logísticos [DV 7101].
- 18) **tiempo medio hasta la reparación (MTTR, mean time to repair)** – Tiempo total de mantenimiento correctivo dividido por el número total de acciones de mantenimiento correctivo durante un periodo de tiempo dado [DV 8310].
- 19) **frecuencia de las acciones de mantenimiento** – Inverso del intervalo de tiempo medio entre los instantes de comienzo de las sucesivas acciones de mantenimiento durante un periodo de tiempo dado, (en eventos por periodo de tiempo dado).
- 20) **averías en un tiempo dado (FIT, failures in time)** – Número de averías en un tiempo dado. Se expresa normalmente como averías por miles de millones de horas de los dispositivos.
- 21) **disponibilidad en régimen permanente** – Límite de $A(t)$ cuando t tiende a infinito. $A(t)$ es la probabilidad de que el elemento funcione en un instante t especificado; viene dada por:

$$A(t) = \text{Probabilidad } (X(t) = 1)$$

donde

$X(t)$ designa el estado en el instante t de un sistema que se somete a mantenimiento. Si el sistema funciona en el instante t , entonces $X(t) = 1$, y si no $X(t) = 0$.

NOTAS

1 Para la definición de «valor medio útil» véase DV 7305.

2 Véase también DV 2010.

4 Método de predicción de la fiabilidad en régimen permanente de dispositivos, unidades y sistemas de fibra óptica de configuración en serie

4.1 Objeto y alcance

En el presente documento el concepto de fiabilidad se refiere a una medida de la frecuencia de las averías del equipo en función del tiempo. La fiabilidad influye en los costes de mantenimiento y en la continuidad del servicio. Las predicciones de fiabilidad pueden utilizarse para decidir el producto que debe adquirirse entre las distintas ofertas del mercado. En consecuencia, es esencial que dichas predicciones de fiabilidad de los diversos productos considerados se basen en procedimientos comunes (véase la Nota 1).

El objeto de este procedimiento de predicción de la fiabilidad es recomendar un procedimiento común para predecir la fiabilidad. Se pretende que el método sea aplicable a las unidades y sistemas electrónicos en general, y a las unidades y sistemas que se utilizan con los cables de fibra óptica en particular.

Este método de predicción de la fiabilidad se basa en un método de «cómputo de partes» de la tasa de averías (véase la Nota 2).

NOTAS

1 Es importante tener en cuenta que las tasas de averías de los componentes pueden estar basadas en normas que difieren de un fabricante a otro (tales discrepancias aparecen debido a diferencias en las tasas de averías genéricas y a otros factores relativos al entorno, esfuerzo, calidad, etc.).

2 Existen otros métodos de predicción de la fiabilidad, como por ejemplo:

- estimación estadística basada en la combinación de los datos procedentes de pruebas de laboratorio con predicciones realizadas a partir del método de «cómputo de partes»;
- estimación estadística de la fiabilidad en servicio basada en estudios de casos prácticos.

El alcance se limita a las averías relativas al soporte físico en condiciones de régimen permanente. El método de predicción del factor de mortalidad infantil queda en estudio. Los sistemas complejos con objetivos de fiabilidad para funciones individuales o para diversos estados de capacidad de servicio reducida no entran en el ámbito de esta Recomendación.

4.2 Aplicaciones del método de predicción de tasa de averías

Este método puede utilizarse en las siguientes situaciones.

4.2.1 Fabricantes y suministradores de equipos

El método contiene las instrucciones que deben seguir los suministradores de productos para proporcionar previsiones de la fiabilidad de sus productos.

El suministrador puede utilizar otro método (como se ha indicado anteriormente) para la predicción de la fiabilidad de dispositivos, unidades y sistemas de configuración en serie, sin embargo el cómputo de partes también se necesita como método de referencia.

4.2.2 Propietarios de equipos y explotadores de redes

Los propietarios de equipos y los explotadores de redes pueden utilizar el método para llevar a cabo las siguientes tareas:

- a) Solicitar y evaluar la fiabilidad de los productos que van a adquirirse. Las predicciones de fiabilidad suministran datos para el análisis de coste del ciclo de vida.
- b) Medir los parámetros que afectan al servicio relacionados con la fiabilidad del producto.

Combinando las predicciones sobre fiabilidad con los parámetros de mantenimiento (tales como tiempo medio de reparación) pueden calcularse los siguientes parámetros que afectan al servicio:

- frecuencia de interrupciones en régimen permanente;
 - frecuencia de las acciones de mantenimiento;
 - valor previsto del tiempo de inactividad por año.
- c) Proporcionar una medida de la fiabilidad del sistema de línea, en lo que se refiere a las actividades de mantenimiento. Por ejemplo, pueden obtenerse previsiones de la frecuencia con que deben llevarse a cabo acciones de mantenimiento o reparación.

4.3 Directrices

4.3.1 Definición de avería

Debe especificarse la definición de avería, puesto que se trata de un elemento crítico para predecir la fiabilidad del sistema. En el caso de equipos sencillos, dicha definición normalmente no ofrece problemas.

En las averías de los equipos complejos (como puede ser el caso de los sistemas de línea en cables de fibra óptica) puede distinguirse entre aquellas que afectan al mantenimiento o a la reparación y aquellas que afectan al servicio (por ejemplo, «averías importantes» $BER > 10^{-4}$).

4.3.2 Condiciones de funcionamiento

Debe describirse el entorno físico en el que van a utilizarse las unidades y los sistemas, a saber:

- temperatura y humedad, así como las variaciones de dichos parámetros;
- equipo de línea sencillo o redundante;
- interrupciones de la energía eléctrica comercial;
- interferencia electromagnética, rayos.

4.3.3 Descripción del entorno

Las tasas de averías varían en función del entorno de funcionamiento en que se encuentra el equipo. Debe especificarse el factor o factores de multiplicación de la tasa de averías por entorno. Si todo el sistema va a estar expuesto a más de un tipo de entorno, debe especificarse cada uno de los factores correspondientes.

4.3.4 Ajuste de las estimaciones obtenidas mediante este método

Aunque se pretende que el método especificado constituya una referencia, ello no impide que para determinar la tasa de averías del dispositivo, de la unidad o del sistema se empleen otras fuentes de datos y técnicas de ingeniería fiables desde el punto de vista técnico. Pueden utilizarse (como se ha indicado anteriormente) los datos sobre el dispositivo proporcionados por el fabricante, los datos sobre la unidad proporcionados por el suministrador, consideraciones físicas sobre fiabilidad y análisis de ingeniería. Este ajuste de la estimación que proporciona el método de referencia puede ser particularmente útil en el caso de dispositivos de nueva tecnología para los que no existen aún suficientes datos de funcionamiento en servicio real.

4.4 Métodos de predicción de la tasa de averías en régimen permanente

4.4.1 Aplicabilidad del método

Este método se utiliza cuando el suministrador desea aprovechar las pruebas de fatiga a las que se somete el dispositivo de la unidad.

La intensidad de averías correspondiente a las averías que afectan al mantenimiento representa el número de reparaciones que deben efectuarse por unidad de tiempo y es igual a la suma de las tasas de averías de todos los dispositivos que constituyen el elemento considerado.

Para elementos sin redundancia, la intensidad de averías correspondiente a las averías que afectan al servicio representa la magnitud de degradaciones del servicio por unidad de tiempo y es igual a la suma de las tasas de averías de los dispositivos cuya avería afecta al servicio.

Para elementos con redundancia, los métodos para obtener la intensidad de averías que afectan al servicio dependen del tipo de redundancia y de la forma de realizar esta redundancia.

4.4.2 Tasa de averías del dispositivo en régimen permanente (λ_{si})

Para esta situación general, la tasa de averías en régimen permanente viene dada por la fórmula:

$$\lambda_{si} = N_i \mu_{gi} \pi_{qi} \pi_{si} \pi_{ti}$$

donde:

N_i es la cantidad del i -ésimo dispositivo;

μ_{gi} es la tasa genérica de averías del i -ésimo dispositivo;

π_{qi} es el factor de calidad del i -ésimo dispositivo (véase la Nota);

π_{si} es el factor de esfuerzo del i -ésimo dispositivo (véase la Nota);

π_{ti} es el factor de temperatura del i -ésimo dispositivo debido a la temperatura normal de funcionamiento en régimen permanente. Debe hacerse una distinción entre la temperatura del entorno y la temperatura intrínseca del dispositivo o unidad.

NOTA – Estos factores pueden ser distintos para cada norma del explotador de la red o para cada norma del fabricante.

4.4.3 Tasa de averías de la unidad en régimen permanente (λ_s)

La tasa de averías de la unidad en régimen permanente es la suma de las tasas de averías del dispositivo en régimen permanente:

$$\lambda_s = \pi_e \sum_{i=1}^{i=N} \lambda_{si}$$

donde

N es el número de dispositivos N_i distintos en la unidad;

π_e es el factor de multiplicación de la tasa de averías por el entorno.

NOTA – En el Anexo A figura un ejemplo.

4.4.4 Tasa de averías del sistema de línea en régimen permanente (λ_{sys})

Si los criterios de averías de los parámetros de fiabilidad especificados, la configuración del equipo y las condiciones de funcionamiento dan a entender que conviene utilizar un modelo de fiabilidad serie, la tasa de averías total del sistema (λ_{sys}) será la suma de todas las tasas de averías de la unidad en régimen permanente (λ_s), es decir (véase la Nota):

$$\lambda_{sys} = \sum_{j=1}^{J=M} \lambda_s(j)$$

donde:

$\lambda_s(j)$ es la tasa de averías de la unidad en régimen permanente para la unidad j ;

M es el número de unidades.

NOTAS

1 Se supone que las tasas de averías de la unidad en régimen permanente reflejan únicamente las averías que afectan al servicio.

2 En el caso de sistemas redundantes, equipos redundantes y constitución unidad/panel, no es apropiado expresar la fiabilidad total del sistema como la suma de todas las tasas de averías (λ_s). Está en estudio el método de predicción que debe utilizarse en dicha situación.

5 Metodologías para el cálculo de los parámetros de mantenimiento y fiabilidad de respuesta en dispositivos, unidades y sistemas de fibra óptica de configuración en serie

5.1 MTBF de los haces de circuitos enchufables

El tiempo medio entre averías (MTBF, *mean time between failures*) es la esperanza matemática del tiempo entre averías, en régimen permanente. Desde el punto de vista matemático, el MTBF (en años por avería) está relacionado con la tasa de averías (en FIT o averías en 10^9 horas) de la forma siguiente:

$$M = \frac{(1.14 \cdot 10^5)}{F}$$

donde M es el MTBF (en años por avería) y F es la tasa de averías en FIT (averías en un tiempo dado).

El MTBF de los haces de un circuito enchufable se calcula mediante la suma de la tasa de averías de cada uno de los elementos que comprende el haz de circuitos. Por ejemplo, en el Cuadro 6 se muestra el cálculo para un haz de circuitos que comprende un láser por paquetes con una tasa de averías de 1500 FIT, cinco circuitos integrados cada uno con una tasa de averías de 300 FIT, cuatro resistencias cada una con una tasa de averías de 123 FIT, siete condensadores cada uno con una tasa de averías de 57 FIT, un conector y una placa de circuito impreso, cada uno con una tasa de averías de 27 FIT.

Las tasas de FIT por unidad para los elementos que comprenden el haz de circuitos pueden calcularse de diversas formas. Cuando se haga referencia al MTBF de los haces de circuitos enchufables se detallará la metodología para dicho cálculo.

CUADRO 6/G.911

Ejemplo de cálculo del MTBF de los haces de circuitos enchufables

Tipo de dispositivo	Cantidad	Tasa de FIT por unidad	FIT total
Láser por paquetes	1	1500	1500
Circuitos integrados	5	300	1500
Resistencias	4	123	492
Condensador	7	57	399
Conector	1	27	27
Placa de circuito impreso	1	27	27
Total			3945 FIT
$MTBF = \frac{1,14 \cdot 10^5}{3945} = 28,9 \text{ años}$			

5.2 MTBF del sistema (terminal y repetidor)

El tiempo medio entre averías (MTBF) es la esperanza matemática del tiempo entre averías, en régimen permanente. Desde el punto de vista matemático, el MTBF (en años por avería) está relacionado con la tasa de averías (en FIT o averías en 10^9 horas) de la forma siguiente:

$$M = \frac{(1,14 \cdot 10^5)}{F}$$

donde M es el MTBF (en años por averías) y F es la tasa de averías (en FIT).

El MTBF del sistema se calcula sumando las tasas de averías para cada uno de los haces de circuitos enchufables (y otros equipos que no se encuentren en dichos haces) que comprenda el sistema. Por ejemplo, en el Cuadro 7 figura el cálculo para un sistema que cuenta con cinco haces de canales, cada uno con una tasa de averías de 8000 FIT, cuatro fuentes de alimentación, cada una con una tasa de averías de 6500 FIT, cuatro regeneradores, cada uno con una tasa de averías de 12 050 FIT, una placa de microprocesador con una tasa de averías de 12 300 FIT y una placa de comprobación con una tasa de averías de 3400 FIT.

CUADRO 7/G.911

Ejemplo de cálculo del MTBF de un sistema

Tipo de dispositivo	Cantidad	Tasa de FIT por unidad	FIT total
Haces de canal	5	8 000	40 000
Fuente de alimentación	4	6 500	26 000
Regenerador	4	12 050	48 200
Placa de microprocesador	1	12 300	12 300
Placa de comprobación	1	3 400	3 400
Total			129 900 FIT
$MTBF = \frac{1,14 \cdot 10^5}{1,299 \cdot 10^5} = 0,878 \text{ años}$			

5.3 Frecuencia de las acciones de mantenimiento programado

La frecuencia de las acciones de mantenimiento programado es el intervalo de tiempo medio transcurrido entre el inicio de dos acciones sucesivas de mantenimiento programado (preventivo). Se determina calculando dicho intervalo. Por ejemplo, si un suministrador de un sistema de fibra óptica recomienda la realización de acciones de mantenimiento programado cada seis meses, la frecuencia de las acciones de mantenimiento será de dos veces al año.

5.4 Tasa aleatoria de averías

La tasa aleatoria de averías es una medida del número de unidades que fallan por unidad de tiempo debido a una diversidad de defectos de fabricación o (más a menudo) de montaje no relacionados con el mecanismo (o mecanismos) del envejecimiento ordinario. La tasa aleatoria de averías del sistema se determina sumando la tasa aleatoria de averías de cada uno de los elementos que comprende dicho sistema, incluidos las averías que afectan al servicio, las averías que no afectan el servicio y todas las acciones de mantenimiento programado y no programado. Las tasas aleatorias de averías para los elementos que comprende el sistema pueden calcularse de diversas formas. Cuando se haga referencia a las tasas aleatorias de averías del sistema se indicará la correspondiente metodología para el cálculo.

5.5 Factor de mortalidad infantil

El factor de mortalidad infantil (IMF, *infant mortality factor*) es la relación entre el número previsto de averías en el primer periodo de servicio y el número previsto de averías en un año de régimen permanente. Su cálculo se basa en dos parámetros. El número previsto de averías en el primer periodo se determina hallando el área subtendida por la curva de mortalidad infantil de Weibull durante un primer periodo de tiempo a partir del instante en que el usuario utiliza el servicio por primera vez. La curva de Weibull se determina basándose en la suma de las curvas de los elementos del sistema. El número previsto de averías durante un año de régimen permanente se calcula determinando la tasa aleatoria de averías y convirtiéndola en averías por año.

6 Metodología de cálculo de los parámetros de disponibilidad y mantenimiento de sistemas de fibra óptica con protección de línea

6.1 Consideraciones generales – Protección de línea y protección de red

La protección en la transmisión de telecomunicaciones consiste en buena parte en disponer grados de redundancia que permitan aumentar la disponibilidad global de los circuitos extremo a extremo. Esto es necesario por el hecho de que la característica de disponibilidad neta obtenida poniendo en cascada un gran número de elementos de red es incompatible con las expectativas de gran número de clientes.

El objetivo de una red redundante es que los clientes aprecien un alto nivel de disponibilidad de los circuitos, lo que el operador puede conseguir pero, naturalmente, a un cierto coste. Puede decirse, a grandes rasgos, que este coste adicional se debe al aumento de equipo físico necesario para proporcionar circuitos de reserva a través de la red. Han de preverse, sin embargo, otros dos importantes factores de coste, a saber, el coste de los mecanismos de control (por ejemplo, el soporte lógico) utilizados para asegurar el restablecimiento de los circuitos averiados y el coste del personal de mantenimiento adicional necesario para reparar el mayor volumen de equipo averiado resultante del aumento del equipo físico de la red.

Los métodos de protección en telecomunicaciones pueden clasificarse en términos de disponibilidad de trayectos, tiempo de respuesta y complejidad. Por lo general, son preferibles los métodos rápidos y sencillos, tal como el de protección de enlaces « $N + 1$ », ya que reducen la indisponibilidad en aproximadamente un orden de magnitud, en comparación con los sistemas no protegidos (véanse los Anexos A y B), con un coste adicional mínimo. Además los sistemas de protección de enlaces pueden automatizarse fácilmente, con lo que se consiguen notables mejoras adicionales, con equipo físico mínimo, de tipo conmutadores de protección, señalizaciones y controles. La protección en anillo o protección anular es un caso especial de la protección « $1 + 1$ », en el que el tráfico puede ser encaminado en ambos sentidos en torno al anillo.

Otros esquemas de protección más complejos exigen el funcionamiento en red, sea por simple triangulación (utilizando un conjunto fijo de trayectos adaptados previamente programados) o por reencamamiento global, que exige pleno conocimiento de la red para eludir los equipos averiados. La protección de enlaces y la protección de redes son ambas aplicables a las redes con estructura en malla, pero necesitan un complejo soporte lógico de señalización y control. De todos modos, la mejora experimentada en disponibilidad de circuitos que permite el funcionamiento en red puede verse compensada por la complejidad adicional del soporte lógico y la vulnerabilidad en situaciones catastróficas (por causas naturales o fallos humanos).

6.2 Metodología del espacio de estados para determinar los parámetros de disponibilidad y mantenimiento en sistemas de fibra óptica con protección de línea

Los ejemplos de los Anexos B y C ilustran la metodología. El método consta de las tres etapas que se describen a continuación.

6.2.1 Etapa 1 – Entradas

Se ocupa de la información necesaria para el desarrollo de las otras dos etapas. Dicha información es:

- Aleatorio (funcionamiento en régimen) tasas de averías de los diferentes dispositivos y elementos de red.
- Tasas de reparaciones de los diversos elementos y subsistemas basada sobre el MTTR.
- Configuración arquitectural del esquema de protección de línea.

6.2.2 Etapa 2 – A partir de las entradas anteriores se determina

- El conjunto de estados.

Un modelo probabilístico matemáticamente dúctil que puede explicar el proceso de muchos eventos que aparecen simultáneamente en un sistema complejo es una cadena de Markov homogénea en tiempo continuo. Lo que sigue se refiere a este planteamiento de Markov.

Cada estado corresponde a una condición específica del sistema, por ejemplo: «componente A averiado», «fallo detectado», «pérdida de redundancia», «reparación en curso» y «sistema averiado».

- Creación de un diagrama de transiciones de estados.

Con frecuencia los sistemas se describen empezando por diagramas de bloques de fiabilidad que definen las combinaciones de elementos del sistema necesarias para proporcionar una función del mismo. La Figura 2 muestra, por ejemplo, un sistema en paralelo con dos componentes (λ_A y λ_B), que son las tasas de fallos de los componentes (en la Figura 2 se ha prescindido, para simplificar, de los trayectos de transición que representan reparaciones). Una barra horizontal sobre el componente significa que dicho componente está averiado. Los estados $\bar{A}B$ and $A\bar{B}$ significan que uno de los componentes se ha averiado pero que el sistema todavía funciona. El estado $\bar{A}\bar{B}$ es un estado de sistema averiado. El modelo equivalente de Markov resumido fusiona los dos estados de componente averiado, pero se pierde la identidad del componente que produce la avería.

Un sistema práctico puede tener K subsistemas, cada uno con m componentes reemplazables o reparables in situ. El valor de K es normalmente 1, 2 ó 3, y m varía de algunas unidades hasta un centenar. El modelo de Markov detallado tendría $2^{K \times m}$ estados, descontados los intermedios añadidos al modelo para detección, mantenimiento y reparación. Esta explosión del espacio de estados suele venir limitada por la truncación del modelo de Markov para representar no más de K fallos coincidentes y sólo aquellas combinaciones de averías de componentes que provocan la avería del sistema. Cuando las tasas de averías de componentes tienen menores órdenes de magnitud que las tasas de detección de averías de componentes, de recuperación tras averías y de reparaciones, la truncación suele tener un efecto despreciable sobre la exactitud del modelo para predecir las medidas de fiabilidad del sistema.

Si un sistema puede sufrir dos o más averías de componentes al mismo tiempo, la reparación puede producirse simultáneamente (reparación simultánea). La Figura 3 representa el modelo de Markov del sistema citado (Figura 2) cuando se supone que las reparaciones pueden ser coincidentes (esta estrategia es aplicable de hecho, a los sistemas de transmisión de fibra óptica).

- Obtención de las probabilidades y las frecuencias de los diversos estados.

La probabilidad limitadora del estado « j » (la proporción a largo plazo del tiempo que el sistema pasa en el estado « j ») de un modelo de Markov viene dada por:

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} t^{-1} [\text{Tiempo total pasado en el estado «}j\text{» durante } (0, t)].$$

Las P_{js} de un modelo de Markov se calculan utilizando el principio del equilibrio en régimen permanente ilustrado en la Figura 4. Cuando el tiempo transcurrido se hace indefinidamente grande, el modelo de Markov de estado L alcanza una situación de equilibrio en la que hay un conjunto de L ecuaciones lineales simultáneas, una por cada estado, como se muestra en la Figura 4. Si se añade a ese conjunto la limitación $P_1 + P_2 + \dots + P_L = 1$, pueden calcularse las P_{js} . No obstante, hay que procurar evitar los problemas del redondeo cuando existen diferencias de varios órdenes de magnitud entre las tasas de transiciones.

Una vez calculadas las P_{js} , puede obtenerse la frecuencia limitadora de cada estado «j» (a largo plazo) en un modelo de Markov utilizando la relación:

$$F_j = \lim_{t \rightarrow \infty} t^{-1} \quad [\text{Número de pasos por el estado «j» durante } (0, t)]$$

$$= (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_m) P_j.$$

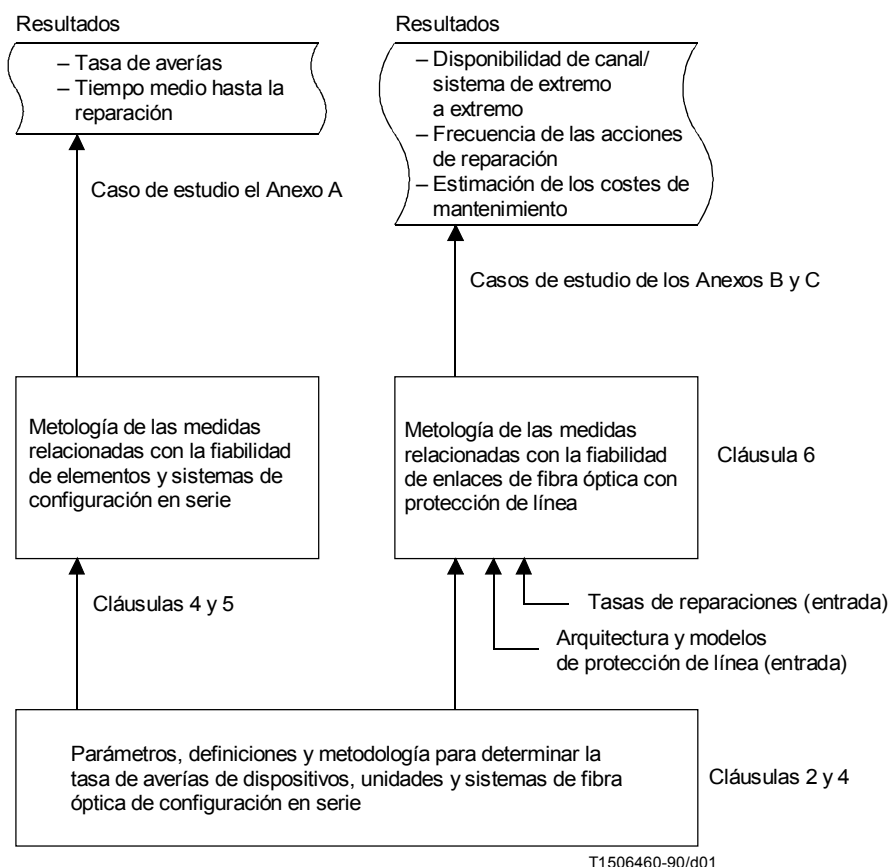


FIGURA 1/G.911
Cómo utilizar la Recomendación G.911

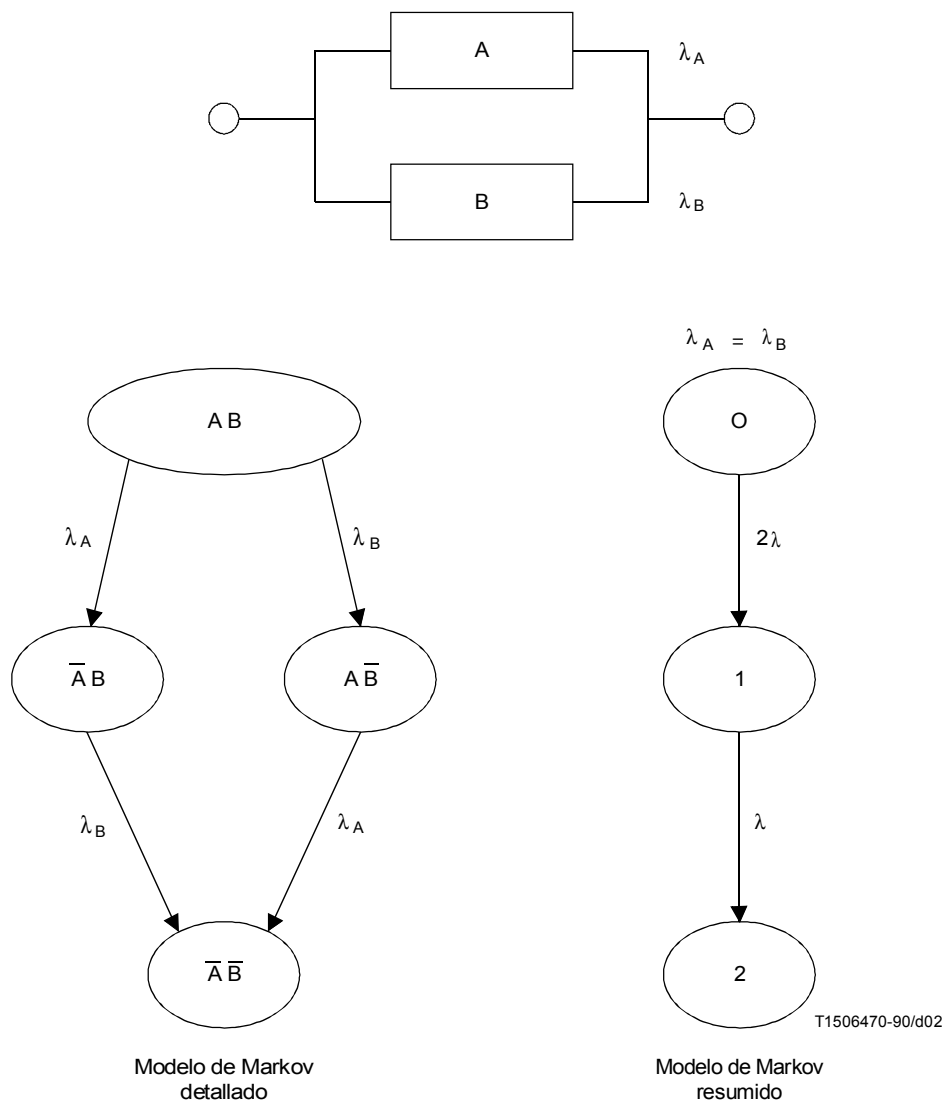
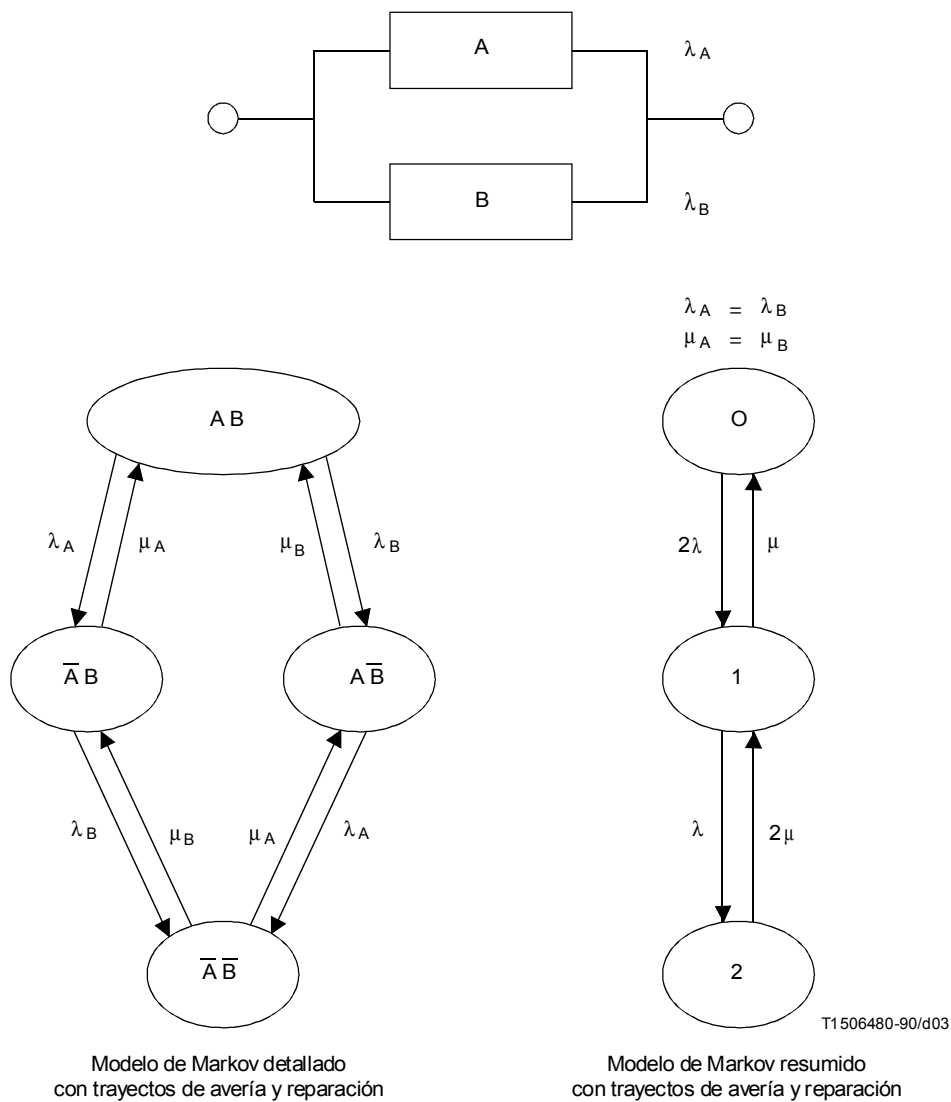


FIGURA 2/G.911
Ejemplo de diagramas de bloques de fiabilidad



NOTA – λ designa tasas de averías y μ tasas de reparaciones.

FIGURA 3/G.911
Descripción del modelo de Markov

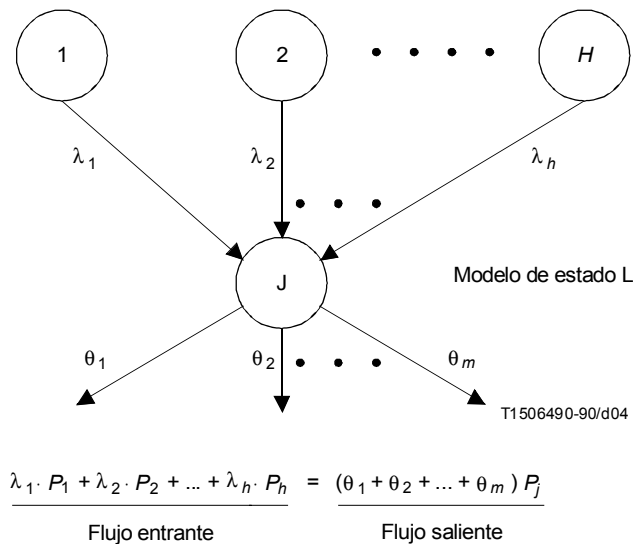


FIGURA 4/G.911

Principios de equilibrio en régimen permanente para modelos de Markov

6.2.3 Etapa 3 – Cálculo de medidas relacionadas con la fiabilidad del sistema

Una vez calculadas las probabilidades y frecuencias de los estados, es posible obtener muchas medidas útiles de la disponibilidad y mantenibilidad del sistema con ayuda de la siguiente expresión:

$$\text{medidas relacionadas con la fiabilidad} = \sum_j (a_j \times F_j + b_j \times P_j)$$

- g) Indisponibilidad: $b_j = 1$ si el estado «j» es un estado de avería del sistema, $b_j = 0$ en otro caso; $a_j = 0$.
- h) Frecuencia de fallos del sistema: $a_j = 1$ si el estado «j» es un estado de avería del sistema $a_j = 0$, en otro caso; $b_j = 0$.
- i) Tiempo de inactividad por unidad de tiempo y canal (cliente): $a_j = 0$; $b_j = N_j/N$ siendo N_j el número de usuarios (canales) sin servicio en el estado «j»; N es el número total de usuarios (canales).
- j) Coste del mantenimiento por unidad de tiempo: $a_j =$ coste de establecimiento de la actividad de mantenimiento iniciada en el estado «j»; $b_j =$ coste por unidad de tiempo de la actividad de mantenimiento en el estado «j».

6.3 Opciones de los sistemas de fibra con protección de línea

6.3.1 Protección de enlaces uno por uno (1 + 1)

Este método de protección de un trayecto es fácil de aplicar, controlar y comprender, por lo que su uso está muy extendido.

En su forma más sencilla, el tráfico procedente de la fuente se transmite simultáneamente por ambos portadores y la decisión de conmutar entre el principal y el de reserva se toma en el punto de recepción; en esta situación, sólo se requieren indicaciones de «pérdida de señal» o similares para iniciar el paso a reserva, sin necesidad de que circule entre ambos puntos información alguna de instrucción y control. Una vez que el portador principal ha sido reparado y puesto en condiciones de servicio, pasa a ser el nuevo portador «de reserva». De esta manera, una avería sólo produce una interrupción en el servicio del cliente, sin que el proceso de restablecimiento introduzca una segunda interrupción.

La protección uno por uno da sus mejores resultados cuando las rutas principal y de reserva son completamente independientes, lo que minimiza el riesgo de averías en modo común (véase el Anexo C). La sencillez de esta técnica de protección garantiza una adaptación muy rápida con una mínima necesidad de equipo complejo de motorización y control.

La protección uno por uno tiene el inconveniente de la poca efectividad del equipo del usuario de la red, ya que el 50% está siempre en situación de reserva, en espera de ser utilizado.

6.3.2 Protección de enlaces uno por N ($N + 1$)

Esta técnica de protección es una extensión de la anterior y trata la cuestión de la falta de eficacia de utilización del equipo de reserva. Partiendo del principio de que la tasa de averías de una ruta es suficientemente baja como para asegurar que sigue siendo muy improbable la avería simultánea de dos o más rutas en un grupo de N , es posible compartir la ruta de reserva entre las N rutas en servicio (véase el Anexo B).

Este método permite un uso más rentable del equipo que el de protección uno por uno, pero requiere un control ligeramente más complejo y no puede ofrecer el mismo nivel de disponibilidad. Además, el encaminamiento con diversidad de los trayectos principal y de reserva resulta mucho más difícil de conseguir.

6.3.3 Anillos

Se considera a veces que las arquitecturas anulares constituyen una clase por sí mismas, pero conceptualmente la protección ofrecida por un anillo puede analizarse en términos de protección uno por uno. En tanto que la protección uno por uno no implica necesariamente diversidad física total entre las rutas principal y de reserva, se entiende normalmente que un anillo ofrece dos sentidos distintos de comunicación.

Existe una variedad de estructuras anulares, cada una con su propia gama de estrategias de control y gestión, capaces de asegurar un funcionamiento autónomo con autorregeneración.

La ventaja principal de los anillos es su flexibilidad para proveer anchura de banda en cualquier nodo del anillo, en respuesta a una demanda imprevista, eludiendo así algunas de las rígidas reglas de planificación asociadas con los enlaces punto a punto más sencillos.

7 Circuitos de referencia para la disponibilidad de canal de extremo a extremo en sistemas de línea de fibras ópticas

Es necesario distinguir entre sistemas de línea basados en la jerarquía digital plesiócrona (PDH, *plesiochronous digital hierarchy*) y la jerarquía digital síncrona (SDH, *synchronous digital hierarchy*). Los equipos de (SDH) ofrecen una nueva flexibilidad que afecta a los objetivos y a los métodos de modelado debido a que:

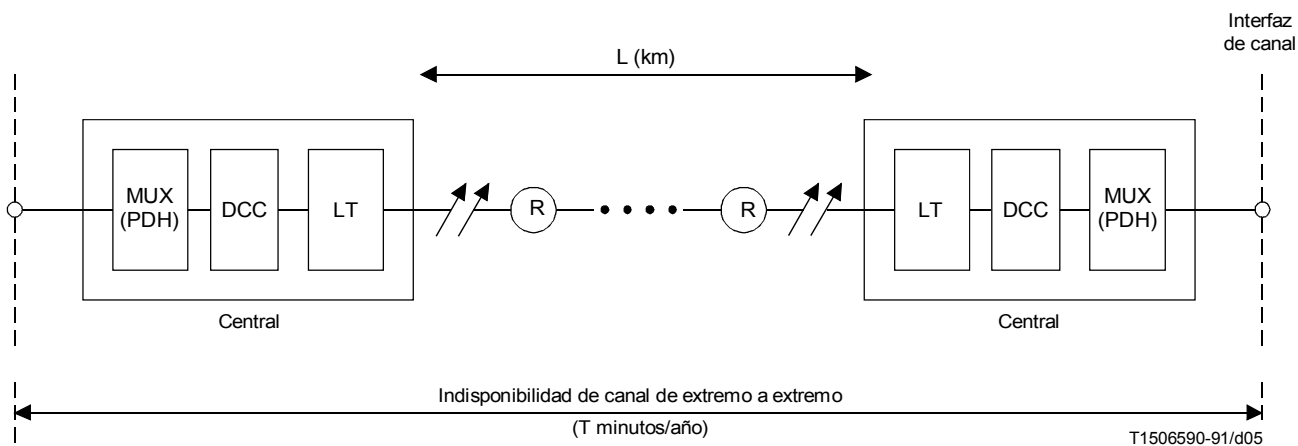
- los sistemas de SDH pueden tener múltiples interfaces de canal (por ejemplo, 1,5 Mbit/s, 2 Mbit/s, ..., 155 Mbit/s), en comparación con una sola interfaz por sistemas de línea de PDH.
- los elementos de la SDH pueden combinar varias funciones, incluida la transconexión digital, la adición-extracción y el transporte en el mismo elemento de red de SDH. Por otro lado, los sistemas de transconexión digital y los sistemas de adición-extracción están separados del terminal de línea de PDH.

Por consiguiente, en un circuito de referencia basado en SDH no es preciso asignar la indisponibilidad en los equipos de multiplexión.

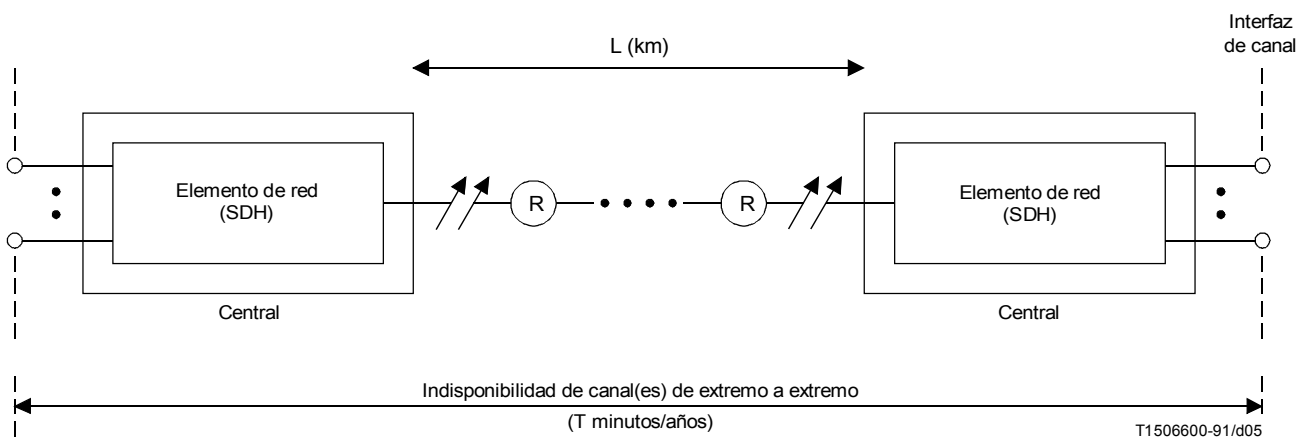
En la Figura 5 aparecen los circuitos de referencia (RC, *reference circuits*) propuestos para la asignación de disponibilidad de extremo a extremo en los sistemas de línea de fibras ópticas. Estas disposiciones son aplicables entre centrales. En los Anexos A, B y C aparecen valores concretos sobre la disponibilidad de extremo a extremo.

Los RC son lo bastante genéricos para permitir la inclusión entre las centrales extremas de un cierto número de repetidores y de centrales intermedias. Sin embargo, para una determinada longitud de RC, se recomienda la misma indisponibilidad por canal (minutos/años) para los circuitos de referencia de SDH y PDH para:

- 1) permitir la introducción gradual de los equipos de SDH en una red basada en PDH, y
- 2) asegurar la coherencia entre los objetivos de disponibilidad de la red de SDH y los actuales objetivos de disponibilidad de la red de PDH.



a) Circuito de referencia para la indisponibilidad de canal de extremo a extremo en sistemas de PDH de fibras ópticas



PDH Jerarquía digital plesiócrona
SDH Jerarquía digital síncrona

(R) Repetir

↗↘ Fibra óptica

DCC Transconexión digital (*digital cross-connect*)

LT Terminal de línea (*line terminal*)

b) Circuito de referencia para la indisponibilidad de canal(es) en sistemas de SD

FIGURA 5/G.911
Circuito de referencia para la indisponibilidad de canal(es)

8 Metodología de asignación de objetivos de indisponibilidad de extremo a extremo

8.1 Causas de la indisponibilidad – Consideraciones relativas a los sistemas de SDH y PDH de fibras ópticas

Los factores que contribuyen a la indisponibilidad de canal de extremo a extremo incluyen:

- a) los multiplexores (no aplicable a los equipos de SDH);
- b) los medios ópticos (cable, empalmes, conectores ... etc.);
- c) terminales de línea y repetidores. Incluida la asignación para:
 - averías del soporte físico, y
 - errores de soporte lógico y de procedimiento de los operadores.

Multiplexores – En los sistemas de SDH no es preciso una asignación separada para los equipos de multiplexación, debido a que las normas de SDH incluyen un método para establecer una correspondencia de los canales con la carga útil de la SDH.

Fibras ópticas, terminales y repetidores – Hasta ahora, los datos señalados por las compañías explotadoras del servicio telefónico demuestran que los medios ópticos tienen una mayor influencia sobre la indisponibilidad que los terminales y los repetidores.

Averías del soporte físico y errores de soporte lógico y de procedimiento de los operadores – Los sistemas de SDH presentan un mayor control por soporte lógico que los sistemas de PDH, porque:

- se ha disminuido el soporte físico necesario por canal;
- se ha aumentado el volumen de soporte lógico; y
- se ha reordenado la utilización amplia del tráfico prevista.

Por consiguiente, puede que en los sistemas de SDH sea razonable aumentar la proporción de indisponibilidad asignada al soporte lógico y a los errores de procedimiento en comparación con los sistemas de PDH.

8.2 Metodología de asignación

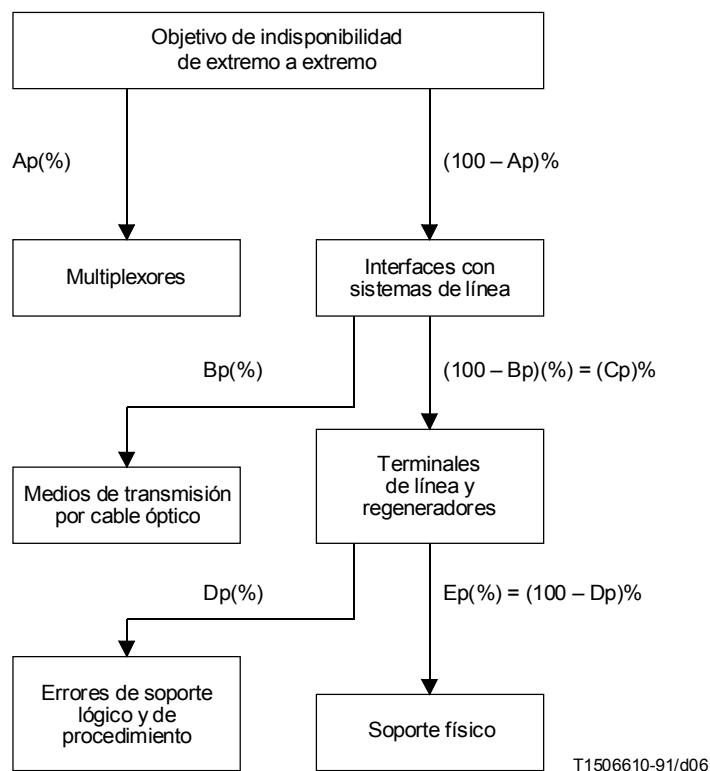
Basándose en las consideraciones anteriores se propone asignar la indisponibilidad de extremo a extremo a las causas pertinentes, como se muestra en las diagramas a) (sistemas de PDH) y b) (sistemas de SDH).

Cabe esperar que la proporción de indisponibilidad asignada a las diversas causas sea distinta en los sistemas de SDH y en los sistemas de PDH, como se muestra en el Cuadro 8.

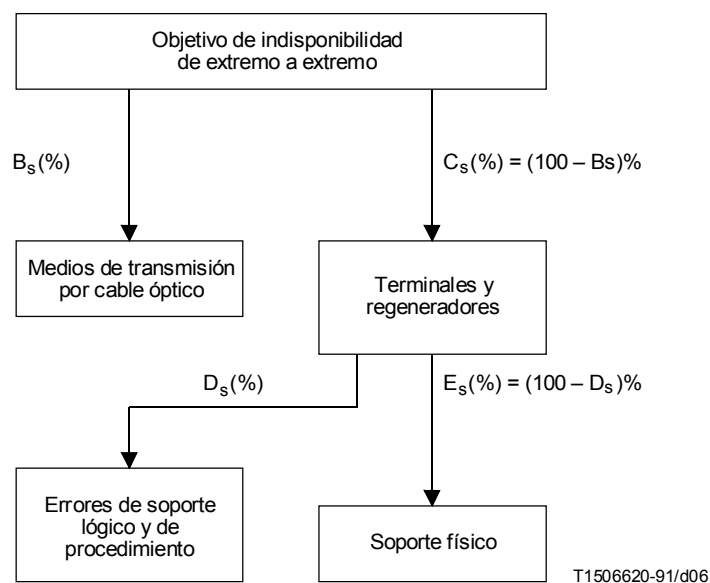
CUADRO 8/G.911

Asignación de indisponibilidad a las diversas causas en un circuito de referencia para una indisponibilidad de canal de extremo a extremo

Factor causante	(PDH)	(SDH)	Comentario
Multiplexores	Ap	No es aplicable	
Cables	Bp	Bs	Valores similares
Terminales y repetidores	Cp	Cs	Proporciones similares
Soporte físico	Dp	Ds	Dp > Ds
Soporte lógico y procedimientos	Ep	Es	Ep < Es
T Indisponibilidad de canal de extremo a extremo (minutos/años) A Porcentaje de indisponibilidad (%) asignado a los multiplexores B Porcentaje de indisponibilidad (%) asignado al cable C Porcentaje de indisponibilidad (%) asignado a los terminales y repetidores D Porcentaje de indisponibilidad (%) asignado a las averías del soporte físico E Porcentaje de indisponibilidad (%) asignado a los errores de soporte lógico y de procedimiento p Sistemas de la jerarquía digital plesiócrona (PDH) s Sistemas de la jerarquía digital síncrona (SDH)			



a) Metodología de asignación de la indisponibilidad de extremo a extremo – Sistemas de la jerarquía digital plesiócrona (PDH)



b) Metodología de asignación de la indisponibilidad de extremo a extremo – Sistemas de la jerarquía digital síncrona (SDH)

FIGURA 6/G.911
Metodología de asignación de la indisponibilidad de extremo a extremo

Anexo A

Determinación de la tasa de averías de una unidad en régimen permanente – Ejemplo

(Este anexo es parte integrante de la presente Recomendación)

A continuación figura un ejemplo de la metodología descrita en 4.3. En este ejemplo se realiza una evaluación de la tasa de averías de la unidad en régimen permanente; no se intenta indicar ningún objetivo de fiabilidad específico, ni para los diversos dispositivos ni para la propia unidad. En el presente ejemplo se utiliza un factor de multiplicación de tasa de averías por el entorno (π_e) igual a 2,0 (véase la Nota 1 de A.3).

A.1 Descripción de la unidad (ejemplo)

Tipo de dispositivo	Cantidad (N_i)
Láser, 1300 nm	1
Transistor, Si, PNP, $\leq 0,6$ W	10
IC digital, bipolar (hermético, 30 puertas)	8
IC digital, NMOS (hermético, 200 puertas)	6
Condensador, discreto, cerámico	6

A.2 Parámetros de fiabilidad de los dispositivos (ejemplo)

Tipo de dispositivo ($\#i$)	X_{qi} (FIT)	π_{qi}	π_{si}	π_j^a	$\#i$
Láser, 1300 nm	20 000	0,5	1,0	1,5	1
Transistor, Si, PNP, $\leq 0,6$ W	25	1,0	1,0	1,2	2
IC, digital, bipolar (hermético, 30 puertas)	10	1,0	1,0	1,2	3
IC, digital, NMOS (hermético, 200 puertas)	130	1,0	1,0	1,2	4
Condensador, discreto, cerámico	12	1,0	1,0	1,0	5
a) Véase la Nota 2 de A.3.					

A.3 Tasa de averías de la unidad en régimen permanente (FIT)

Siguiendo el procedimiento descrito en 4.2 y 4.3, la tasa de averías de la unidad en régimen permanente viene dada por:

$$\begin{aligned}\lambda_s &= (\pi_e)\{(N_1)(15\ 000) + (N_2)(30) + (N_3)(12) + (N_4)(156) + (N_5)(12)\} \\ &= (2) \times (16\ 404) = 32\ 808 \text{ FIT.}\end{aligned}$$

NOTAS

1 Se trata de un valor típico para una unidad instalada en un terminal distante o en los locales del usuario y sometida a impactos y vibraciones o a variaciones de temperatura y humedad. En entornos con atmósfera controlada (como por ejemplo, edificios de oficinas) es más apropiado un valor de π_e igual a 1,0.

2 En el presente ejemplo se supone que la temperatura de funcionamiento de la unidad no es superior a 45-50° C.

Anexo B

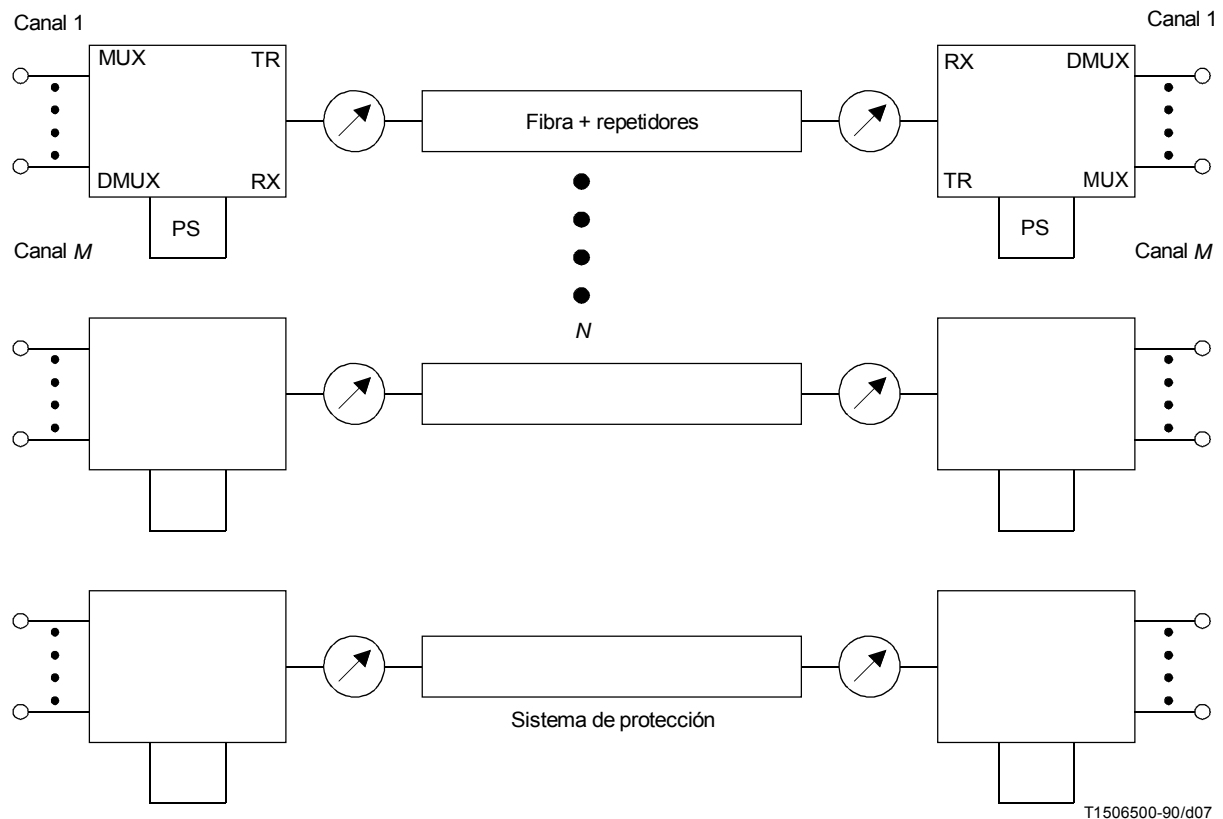
Caso de estudio – Disponibilidad de canal para un enlace con repetidores a 4×140 Mbit/s por fibra óptica con protección de línea «3 + 1»

(Este anexo es parte integrante de la presente Recomendación)

A continuación figura un ejemplo de la metodología descrita en 6. Con dicho ejemplo no se pretende sugerir ni recomendar ningún objetivo de fiabilidad específico.

B.1 Descripción

En la Figura B.1 se muestra un sistema en configuración « $N + 1$ ». Consiste en N sistemas de línea digital por fibra óptica que operan en paralelo con otro sistema idéntico de reserva. A efectos de este caso de estudio, un sistema de línea digital está constituido por una pareja de terminales-multiplexores de línea, y por el cable de fibra óptica con sus correspondientes regeneradores. Los sistemas de línea operan a 565 Mbit/s, cada uno de los cuales soporta cuatro canales de 140 Mbit/s.



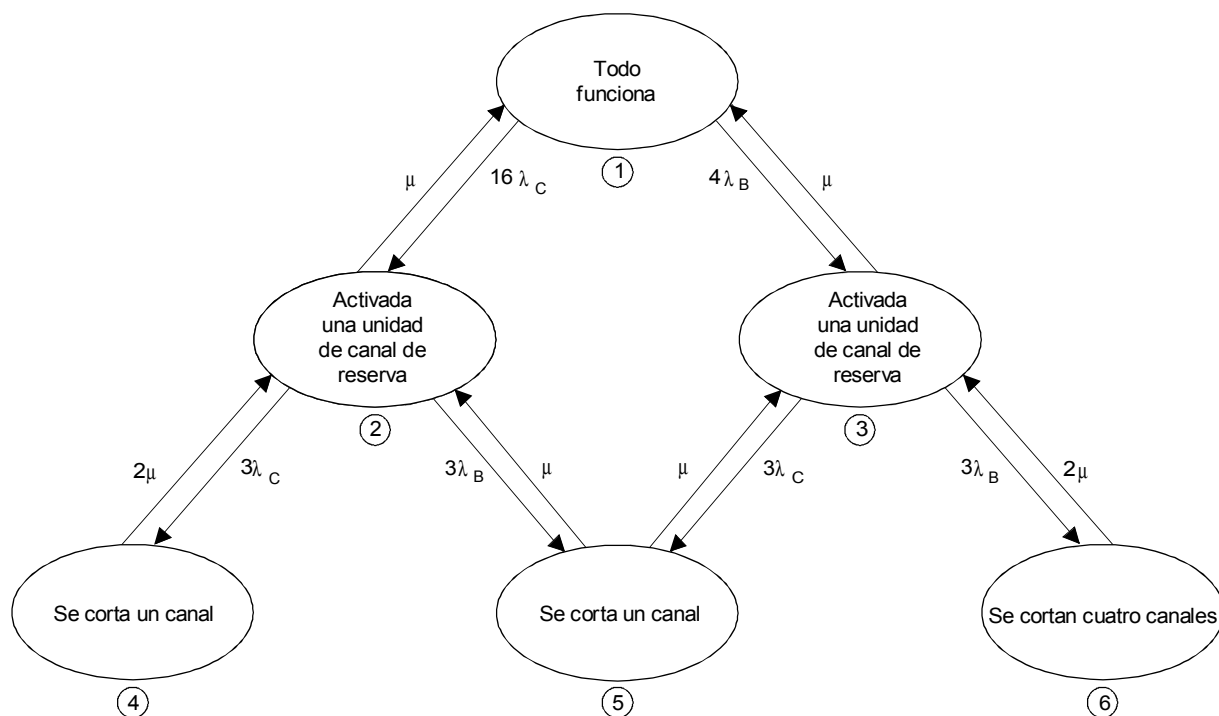
T1506500-90/d07

FIGURA B.1/G.911
Ejemplo – Sistema de configuración « $N + 1$ »
(« N » activos y 1 de reserva)

En la Figura B.2 se muestra el diagrama de estados para el caso particular de tres sistemas en activo ($N = 3$) y un sistema en reserva. En ese diagrama se indican las posibles situaciones a las que pueden dar lugar la aparición de averías en los terminales de línea digital o en los regeneradores.

El sistema de reserva toma, en parte o en todo, el tráfico cursado cuando se avería uno de los sistemas de línea en servicio. Si se avería una unidad de canal (a 140 Mbit/s), entra en servicio una de las cuatro unidades de canal del sistema de reserva. En caso de que se produzca una avería, bien en los repartidores o bien en los terminales-multiplexores de línea, que afecte a todo un sistema, entonces todo su tráfico (cuatro canales de 140 Mbit/s) se pasaría al sistema de reserva. Si en caso de averiarse un canal o un sistema entero el tráfico no pudiera ser transferido al sistema de reserva (por estar ocupado transportando tráfico de otro sistema averiado), entonces el tráfico de ese canal o de ese sistema quedaría en estado de indisponibilidad.

En la Figura B.2 también se ilustra cómo se pasa de un estado a otro, en función de la tasa de averías (número de averías por unidad de tiempo) y de la tasa de reparaciones (valor inverso del tiempo medio que se invierte en subsanar una avería).



T1 506510-90/d08

μ Número de reparaciones/hora

λ_C Tasa de averías por unidad de canal

λ_B $2(\lambda_{MUX} + \lambda_{DMUX} + \lambda_{TX} + \lambda_{RX} + \lambda_{PS}) + N \cdot \text{de repetidores} \times (2\lambda_{TX} + 2\lambda_{RX} + \lambda_{PS})$

TX Transmisor óptico (*optical transmitter*)

RX Receptor óptico (*optical receiver*)

PS Unidad de alimentación de energía (*power supply unit*)

Ejemplo: $M \times 4 \times (4 \text{ tributarios a } 140 \text{ Mbit/s por terminal de línea}) = 16$

$N (+ 1) = 3 \text{ activos (+ 1 reserva)} = 3 + 1$

FIGURA B.2/G.911

Ejemplo – Sistema de configuración «N + 1» – Diagrama de Markov

B.2 Resultados – Indisponibilidad (minutos/año) por canal de 140 Mbit/s

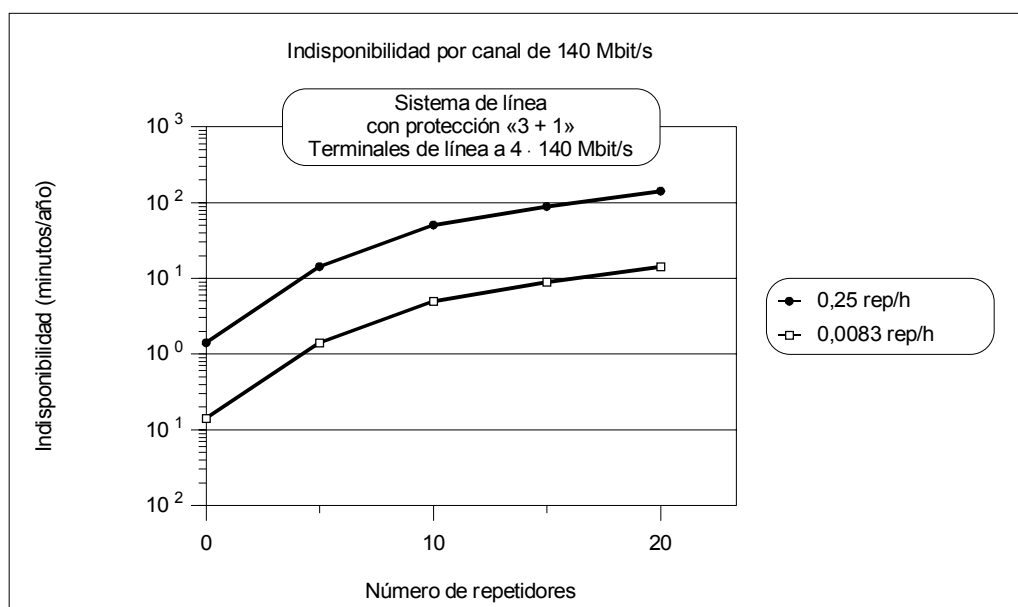
Los resultados que se indican a continuación se basan en una configuración «3 + 1» con sistemas de línea digital por fibra óptica operando a 565 Mbit/s. La indisponibilidad se ha obtenido estadísticamente evaluando la probabilidad de los estados que pueden dar lugar al corte de un canal de 140 Mbit/s (es decir, los estados 4, 5 y 6 ilustrados en la Figura B.2).

La Figura B.3 muestra la indisponibilidad por canal de 140 Mbit/s en función de:

- el tiempo de reparación por avería; y
- el número de repetidores del sistema.

Para estos resultados se ha partido de las siguientes tasas de averías:

- tasa de averías por unidad de canal (de 140 Mbit/s) = 6 000 FIT;
- tasa de averías de un terminal-multiplexor de línea (sin contar las unidades de canal) = 42 000 FIT;
- tasa de averías por regenerador = 42 000 FIT.



T1506520-90/d09

FIGURA B.3/G.911
Indisponibilidad por canal de 140 Mbit/s

Anexo C

Caso de estudio – Disponibilidad de canal para una conexión por fibra punto a punto en la red local con protección de línea «1 + 1», con y sin redundancia de trayectos por cable

(Este anexo es parte integrante de la presente Recomendación)

A continuación figura un ejemplo de la metodología descrita en 6. Con dicho ejemplo no se pretende sugerir ni recomendar ningún objetivo de fiabilidad específico.

C.1 Descripción

C.1.1 Naturaleza del problema

La extendida instalación de fibras ópticas en las redes de telecomunicación y el incremento del tráfico llevado por distintas fibras ha planteado la cuestión de la necesidad de redundancia en los terminales de línea y cables, para reducir las interrupciones del servicio en caso de corte del cable o fallo en el equipo de línea. Este problema es más agudo todavía en la red de acceso, porque los usuarios no tienen conexiones por trayectos alternativos a través de otra central (lo que sí puede ocurrir en la conexión entre centrales).

Estos planteamientos vienen motivados por consideraciones de tipo práctico. Por ejemplo los bancos y los corredores o agentes dan gran prioridad a la fiabilidad de la red. Incluso en el actual entorno de banda estrecha, estas actividades comerciales pueden tener una doble protección 1 : 1 en muchos de sus enlaces de conexión a través del mismo trayecto o de un trayecto alternativo. Esto proporciona enlaces auxiliares uno por uno, con conmutación automática a un enlace auxiliar cuando se avería el enlace. En un entorno de banda ancha, en el que la frecuencia de corte de un cable podría eliminar múltiples líneas de comunicación a 155 Mbit/s, el interés por este tema sería probablemente aún mayor.

En el presente Anexo se describen y evalúan cuestiones relativas a la fiabilidad y la repercusión en la disponibilidad de conexiones de clientes, de los tres tipos de conexión siguientes (véase 1.2):

- conexiones sin redundancia;
- conexiones con redundancia de equipo de línea y conmutación manual;
- conexiones con redundancia de equipo de línea y conmutación automática;
- conexiones con redundancia de cable; y
- conexiones con redundancia de equipo de línea y cables.

C.1.2 Tipo de conexiones

Las conexiones entre la central (CO, *central office*) y el usuario (CP, *customer premises*) se efectúan con fibras monomodo. Todas las fibras se utilizan para transmisión unidireccional, lo que obliga a instalarlas por pares para obtener conexiones dúplex. Dotar de redundancia al equipo supone que la protección de los multiplexores terminales de línea óptica (OLTM, *optical line terminating multiplexers*) es 1 : 1. La redundancia de los cables supone la existencia de un trayecto alternativo a través de una ruta físicamente distinta. La conmutación manual supone un cierto tiempo entre la aparición de la avería y la propia conmutación; durante dicho tiempo la conexión se encuentra indisponible y en el caso de conmutación automática ese tiempo es 0.

Los cinco tipos alternativos de conexión son los siguientes:

- Conexiones sin redundancia [Figura C.1a)].
- Conexiones con redundancia del equipo de línea y conmutación manual [Figura C.1b)]. En el diseño está prevista la protección contra averías del equipo terminal en la central y en las instalaciones de usuario; pero el sistema es vulnerable a las averías del cable de fibra. Se considera el tiempo de conmutación.
- Conexiones con redundancia del equipo de línea y conmutación automática [Figura C.1c)]. El mismo caso que antes pero con un tiempo de conmutación 0.
- Conexiones con redundancia de cable [Figura C.1d)]. En esta alternativa se supone que las fibras de servicio y de protección siguen trayectos físicamente separados hasta la misma central. Este diseño proporciona protección contra las averías del cable de fibra. La conmutación del cable de fibra es automática.
- Conexiones con redundancia del equipo de línea y del cable [Figura C.1e)]. Este diseño ofrece protección contra averías en el equipo terminal y en el cable de fibra. Esta alternativa se divide en dos: (e₁) con conmutación automática y (e₂) sin conmutación automática.

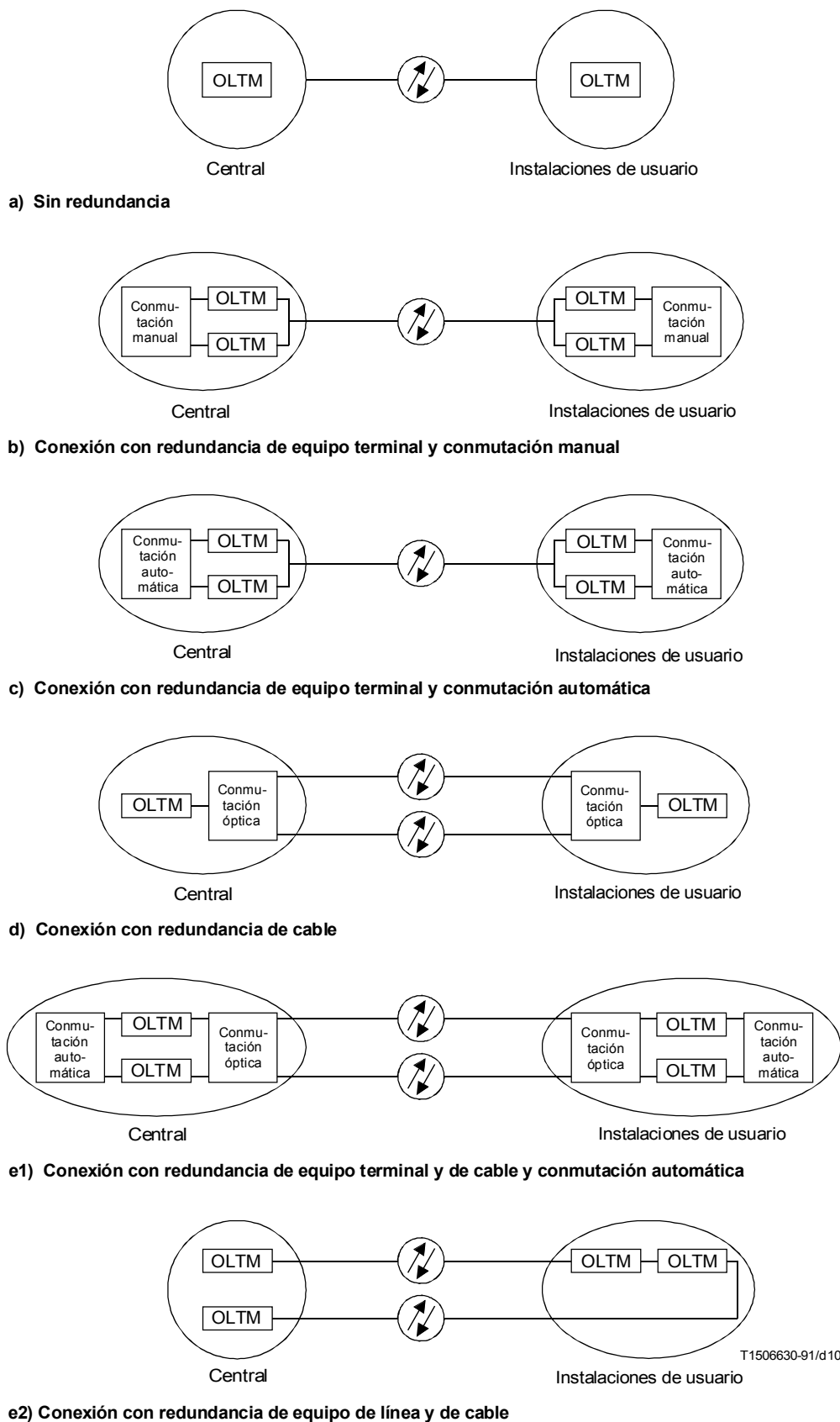


FIGURA C.1/G.911
Tipo de conexiones consideradas

C.2 Resultados

Para cuantificar y comparar las características de fiabilidad de los cinco tipos de conexiones descritos, se presenta en esta cláusula el concepto de indisponibilidad (en minutos por año y canal de 2 Mbit/s), basado en los modelos de Markov.

La Figura C.2 considera el sistema sin protección. El sistema no es operativo si se avería cualquiera de los dos elementos de red.

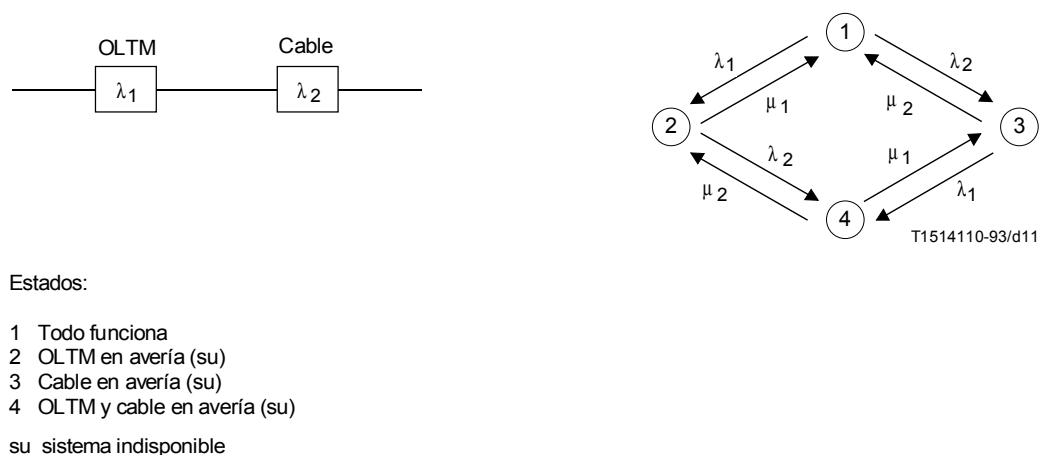


FIGURA C.2/G.911
Sin redundancia y sin modelo de Markov

La Figura C.3 muestra el caso con redundancia de OLTM y conmutación manual. En el estado de funcionamiento normal (1), el equipo terminal de servicio y el de protección en la central y en las instalaciones de usuario son plenamente operativos. Cuando se avería una de las dos unidades (estado 2), la otra unidad la reemplaza, mediante intervención manual en un plazo determinado durante el cual el sistema no es operativo. El sistema puede volver al estado 1 si se realiza la conmutación. El sistema tampoco es operativo (estado 3) si se averían ambas unidades o falla el bucle de cable entre la central y las instalaciones de usuario.

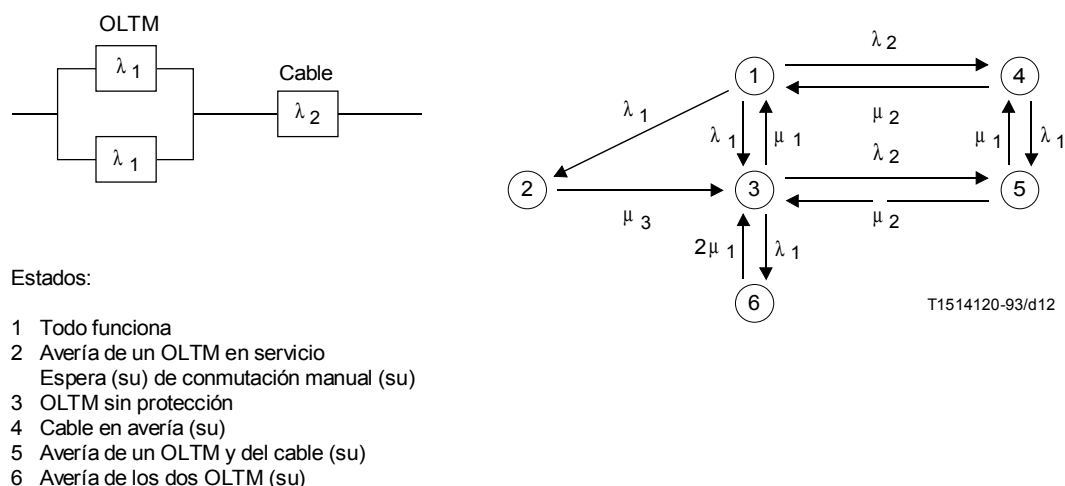


FIGURA C.3/G.911
Conexión con redundancia de equipo terminal
y conmutación manual, y su modelo de Markov

En la Figura C.4 se muestra el caso con redundancia de OLTM y conmutación automática. En el estado de funcionamiento normal (1), tanto el equipo terminal de servicio como el de protección en la central y en las instalaciones de usuario son plenamente operativos. Cuando se avería una de las dos unidades (estado 2), la otra unidad la reemplaza automáticamente y garantiza el funcionamiento continuo. El sistema puede volver al estado 1 si se restablece la unidad averiada. El sistema no es operativo (estado 3) si se averían ambas unidades o falla el bucle de cable entre la central y las instalaciones de usuario.

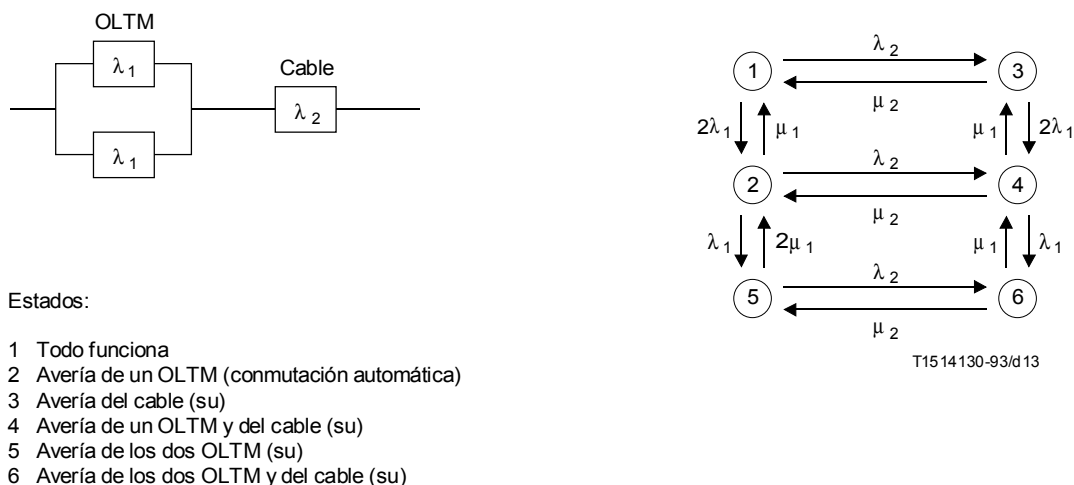


FIGURA C.4/G.911
Conexión con redundancia de equipo terminal y conmutación automática, y su modelo de Markov

En la Figura C.5 se muestra el caso con redundancia del cable. En el estado de funcionamiento normal (1), ambos cables son plenamente operativos. Cuando se avería uno de los cables (estado 2) el otro lo reemplaza automáticamente y garantiza el funcionamiento continuo. El sistema puede volver al estado 1 si se restablece el cable. El sistema no es operativo (estado 3) si se averían ambos cables o falla el equipo terminal entre la central y las instalaciones de usuario.

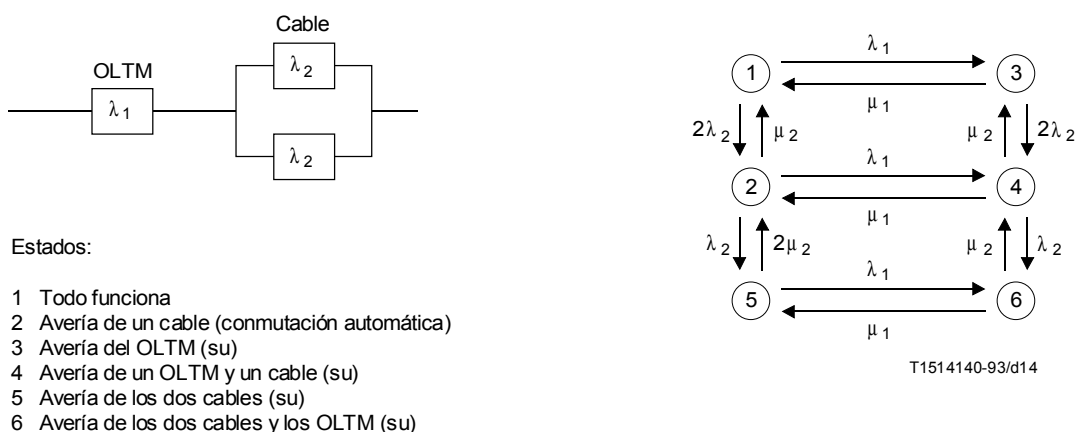
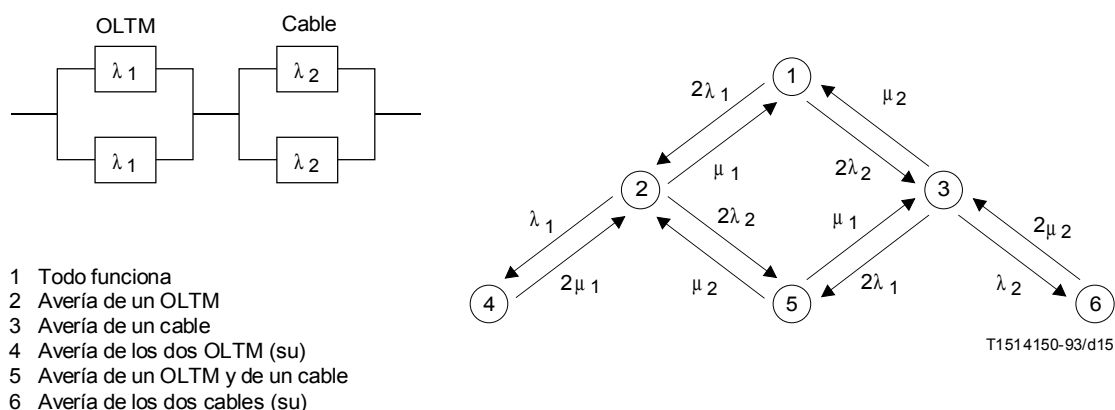


FIGURA C.5/G.911
Conexión con redundancia de cable y su modelo de Markov

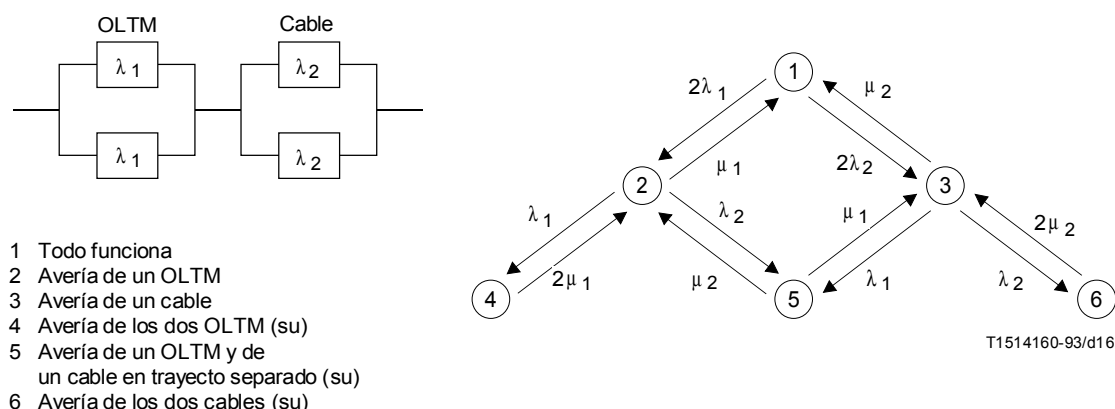
La Figura C.6a) muestra el caso con redundancia del equipo terminal y del cable. En el funcionamiento normal tanto el equipo de servicio como el de protección y el cable son plenamente operativos. El estado 2 corresponde a la situación en que se avería un OLTM o falla un bucle de cable. Las otras unidades las reemplazan automáticamente y garantizan el funcionamiento continuo. El sistema puede volver al estado 1 si se repara la avería. El sistema no es operativo (estado 3) si se averían ambos cables o fallan ambos OLTM.

En la Figura C.6b) se muestra el caso con redundancia de OLTM y cable. En funcionamiento normal, tanto el equipo en servicio como el de protección y el cable son plenamente operativos. Los estados 2 y 3 corresponden a aquellas situaciones en que se avería un OLTM o un bucle de cable, respectivamente. El estado 4 corresponde a las situaciones en las que se avería un OLTM y un bucle de cable, pero cuando estas averías se hallan en trayectos diferentes. En el estado 5 el sistema no es operativo.



NOTA – Estos gráficos no representan todas las situaciones posibles.

FIGURA C.6a)/G.911
Conexión con redundancia de equipo terminal
y conmutación automática, y su modelo de Markov



NOTA – Estos gráficos no representan todas las situaciones posibles.

FIGURA C.6b)/G.911
Conexión con redundancia de cable y de OLTM y su modelo de Markov

El Cuadro C.1 muestra la lista de tasas de avería en régimen permanente, tasas de reparación y tiempos de conmutación manual.

CUADRO C.1/G.911

**Tasa de averías en régimen permanente, tiempos típicos de reparación
y tiempos de conmutación manual**

Tasa de averías en régimen permanente del OLTM (λ_1)	23 000-57 000 FIT; MTBF = 2-5 años
Tasa de averías en régimen permanente del cable (λ_2)	11 500-23 000 FIT; MTBF = 5-10 años
Tiempo típico de reparación de los OLTM (μ_1)	(entre 1 y 2 por día)
Tiempo típico de reparación del cable (μ_2)	(entre 0,5 y 1 por día)
Tiempo de conmutación manual ($1/\mu_3$)	(entre 0,5 y 4 horas)

En los Cuadros C.2 a C.6 figuran los resultados de los distintos casos.

CUADRO C.2/G.911

**Comportamiento de conexiones locales de usuario
no protegidas en banda ancha**

($1/\lambda_1$) años	($1/\lambda_2$) años	($1/\mu_1$) días	($1/\mu_2$) días	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	647
2	10	0,5	1	504
5	5	0,5	1	432
5	10	0,5	1	289
2	5	1	2	1294
2	10	1	2	1006
5	5	1	2	863
5	10	1	2	576

CUADRO C.3/G.911

**Comportamiento de conexiones de acceso de usuario
con redundancia de equipo terminal y conmutación manual**

$(1/\lambda_1)$ años	$(1/\lambda_2)$ años	$(1/\mu_1)$ días	$(1/\mu_2)$ días	$(1/\mu_3)$ horas	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	0,5	303
2	10	0,5	1	0,5	159
5	5	0,5	1	0,5	294
5	10	0,5	1	0,5	150
2	5	1	2	0,5	591
2	10	1	2	0,5	304
5	5	1	2	0,5	582
5	10	1	2	0,5	294
2	5	0,5	1	1	318
2	10	0,5	1	1	174
5	5	0,5	1	1	300
5	10	0,5	1	1	156
2	5	1	2	1	606
2	10	1	2	1	319
5	5	1	2	1	587
5	10	1	2	1	300

CUADRO C.4/G.911

**Comportamiento de conexiones de acceso de usuario
con redundancia de equipo terminal y conmutación automática**

$(1/\lambda_1)$ años	$(1/\lambda_2)$ años	$(1/\mu_1)$ días	$(1/\mu_2)$ días	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	288
2	10	0,5	1	144
5	5	0,5	1	288
5	10	0,5	1	144
2	5	1	2	576
2	10	1	2	289
5	5	1	2	576
5	10	1	2	288

CUADRO C.5/G.911

**Comportamiento de conexiones de acceso de usuario
con redundancia de cable**

$(1/\lambda_1)$ años	$(1/\lambda_2)$ años	$(1/\mu_1)$ días	$(1/\mu_2)$ días	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	360
2	10	0,5	1	360
5	5	0,5	1	144
5	10	0,5	1	144
2	5	1	2	720
2	10	1	2	719
5	5	1	2	288
5	10	1	2	288

CUADRO C.6/G.911

Comportamiento de conexiones de acceso de usuario

a) Comportamiento de conexiones de acceso de usuario con redundancia de equipo terminal y de cable y conmutación automática

$(1/\lambda_1)$ años	$(1/\lambda_2)$ años	$(1/\mu_1)$ días	$(1/\mu_2)$ días	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	0,40
2	10	0,5	1	0,29
5	5	0,5	1	0,20
5	10	0,5	1	0,08
2	5	1	2	1,61
2	10	1	2	1,14
5	5	1	2	0,79
5	10	1	2	0,31

b) Comportamiento de conexiones de acceso de usuario con redundancia de cable y de equipo terminal

$(1/\lambda_1)$ años	$(1/\lambda_2)$ años	$(1/\mu_1)$ días	$(1/\mu_2)$ días	Indisponibilidad de canal a 2 Mbit/s (minutos/año)
2	5	0,5	1	0,80
2	10	0,5	1	0,48
5	5	0,5	1	0,35
5	10	0,5	1	0,16
2	5	1	2	3,18
2	10	1	2	1,92
5	5	1	2	1,42
5	10	1	2	0,63

