



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE UNA RED METRO  
ENMALLADA DWDM CON ROADM

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA.

ANDRÉS PINEDO RIED

PROFESOR GUÍA:

NICOLÁS BELTRÁN MATURANA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALBERTO CASTRO ROJAS  
NESTOR BECERRA YOMA

SANTIAGO DE CHILE

Agosto de 2010



*A mi familia y mis amigos.*

## *Resumen.*

El objetivo de la memoria es obtener la disponibilidad de servicio para una red enmallada DWDM (*dense wave division multiplexer*). Se entiende por disponibilidad la cifra por ciento que representa la fracción del tiempo que la red está disponible para entregar servicios de comunicaciones.

Toda nueva tecnología presenta riesgos de tener una disponibilidad baja, debido a que en el proceso de puesta en marcha e inicio de operaciones la red puede fallar por el desconocimiento del comportamiento de equipos o bien de perturbaciones externas no consideradas en la planificación. Este es un escenario posible en el desempeño de la red DWDM con ROADM (*reconfigurable optical add drop multiplexer*): las componentes pueden fallar y este es el problema analizado en esta memoria sobre la base de distintas modelaciones.

Se formula un modelo clásico basado en la normativa ETSI adaptado, esto es, se consideran interfaces STM-16/64 de altas velocidades (2,5 y 10 Gb/s) en el modelo de la ETSI. Con esto, es posible estimar una disponibilidad verdadera y útil para la red, pero invariante (es decir, que no tiene oscilaciones) en el tiempo.

Los fundamentos analíticos de la normativa ETSI se rescatan para formular un segundo modelo que debido a su dificultad (NP-complejo) es sólo posible resolverlo con heurísticas. El modelo permite representar a la disponibilidad a través de la tasa de fallas como una cantidad variante en el tiempo. El diseño, que ocupa tabla lógicas para varias fallas simultáneas, permite analizar la tasa de fallas a través de tres zonas de tiempo, y permite llegar a valores medios de la disponibilidad de la red. La modelación usada es la Cadena de Markov apoyada en la hipótesis que caracteriza a la distribución de Weibull.

Finalmente, la representación es contrastada con la anterior mejorando las proyecciones para una determinación más exacta de la disponibilidad. Se hacen cálculos para: redes grandes (más de 10 nodos); redes nacionales; y la red NTFS de Estados Unidos. De esta manera, se concluye que la red enmallada es más confiable que la red anillada primitiva y que usando la teoría de Markov es posible modelar este problema de manera simple y consistente.

## *Agradecimientos.*

Quería agradecer a todos aquellos que me apoyaron en esta larga etapa de realizar una memoria: a mi familia, a Hernán Silva y a mi tía Paula que los quiero mucho.

Agradecer a la empresa ENTEL S.A. y al personal que colaboró entregando información y datos para la realización de esta memoria; especialmente al Sr. Nelson Jorquera el Ingeniero de Proyectos y al tutor de la memoria Sr. José Miguel Valenzuela, al Sr. Sergio Bunel Ingeniero de Proyectos y don Rodrigo Orozco, Sub-Gerente del área de Ingeniería de Redes Core.

Finalmente quería agradecer a mis amigos: a los de LetrasKiltras, a los de SalamagA, a Pedro Valenzuela, a Matías Reitze por ser buena persona hasta en los peores momentos, y a Jenny Alejandra.

## Indice

1	Introducción.....	3
2	Objetivos.....	4
2.1	Objetivos Generales.....	4
2.2	Objetivos específicos.....	5
3	Marco conceptual general.....	6
3.1	Impacto de la convergencia de redes y servicios.....	6
3.2	Synchronous Digital Hierarchi (SDH).....	10
3.3	La técnica de conmutación GMPLS.....	15
3.3.1	Label switching.....	15
3.3.2	El plano de control.....	17
3.4	Matriz de tráfico.....	19
4	Tecnología ROADM.....	23
4.1	Arquitectura G.805.....	23
4.1.1	Síntesis G.805.....	25
4.2	Multiplexación en frecuencia en sistemas de banda ancha.....	28
4.3	ROADM: Reconfigurable Optical Add'n Drop Multiplexor.....	30
4.4	WSS análisis.....	32
4.5	Routing en wss.....	35
5	Modelamiento y solución del problema de Disponibilidades.....	37
5.1	Introducción a tiempos característicos de la estabilidad.....	37
5.1.1	MTBF.....	37
5.1.2	Aplicación técnica.....	39
5.1.3	MTTR.....	40
5.2	Topologías de las redes de Comunicaciones.....	42
5.3	Relación de los tiempos característicos con una red y aplicabilidad.....	45
5.3.1	Base de aplicación para una red enmallada: líneas en paralelo.....	48
5.4	Ejercicio de aplicación.....	50
5.4.1	Diagramas de análisis para una red metro.....	50
5.5	Tabla de las constantes según la ETSI para enlaces de 2 Mb/s.....	53
5.6	Adaptación del problema desde enlaces de 2 Mb/s hacia enlaces de 2,5 y 10 GIGAb/s.....	56
5.6.1	Las tramas de 2Mb/s en las tramas del orden de Gb/s.....	56
5.6.2	Ecuación que modela las tramas STM de 2,5 y 10 Gb/s.....	58
5.6.3	Aplicación a red de 7 nodos.....	59
6	Técnica heurística para resolución de red.....	62
6.1	Presentación inicial y primer intento de aplicación en red.....	62
6.2	Resolución del problema con heurísticas.....	69
6.2.1	Nuevas restricciones al problema.....	69
6.2.2	La función de densidad Weibull.....	71
6.2.3	Metodología.....	76
6.3	Modelamiento e Hipótesis del problema.....	77
6.4	Análisis y uso del modelo en redes CORE.....	91
6.4.1	Aplicaciones a redes grandes y redes nacionales.....	91
6.4.2	Resultados proyectivos.....	94

7	Discusiones de los resultados.....	99
8	Conclusiones.....	101
8.1	Sobre la complejidad del problema.....	101
8.2	Sobre los resultados del proceso.....	101
8.3	Trabajo futuro.....	103
9	Anexos.....	104
9.1	Componentes o corrientes que confluyen en una red convergente.....	104
9.1.1	Internet.....	104
9.1.2	ToIP.....	109
9.1.3	TDM y telefonía digital.....	113
9.1.4	TVdigital.....	114
9.2	Una ruta con 2 respaldos (1:3).....	120
9.3	Ruta con 2 respaldos adaptado para interfaces STM-16/64.....	122
9.4	Heurísticas de redes.....	127
9.4.1	Proceso de normalización.....	127
9.4.2	Cálculos proyectivos de las redes y curvas de Weibull.....	127
9.5	Cadenas de Markov.....	130
9.5.1	Definición de las cadenas de Markov.....	130
9.5.2	Matriz de Transición.....	130
9.5.3	El modelo Markoviano exponencial de tiempo continuo.....	131
10	Referencias.....	133

# 1 Introducción

Dada la gran demanda de ancho de banda originada por los Servicios Internet (paquetes) en redes móviles y fijas nace la necesidad de proteger de manera más eficiente este ancho de banda, que en general se transporta en una red DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexer). De esta manera las redes ópticas DWDM necesitan de tecnologías como las implementadas por un elemento de red ROADM (Reconfigurable Optical Add'n Drop Multiplexer) que soporten las funciones más eficaces en la protección de servicios al mismo tiempo que se genera una gran capacidad de nuevas aplicaciones.

El objetivo a grandes rasgos es evaluar la disponibilidad en una red DWDM que utilice la tecnología ROADM frente a cambios externos en su topología óptica (fibra óptica). Se desea generar un modelo pragmático para la estimación de la disponibilidad en una red DWDM con topología enmallada.

En este trabajo, se formula un modelo (basado en Markov y también considerando el modelo clásico de disponibilidad basado en bloques) apoyado en la distribución Weibull que permitirá ver la evolución en el tiempo de la disponibilidad y de la tasa de fallas. La disponibilidad se define -a grandes rasgos- en la literatura como la cifra por ciento que representa la fracción de tiempo que la red está *up* y corriendo.

La organización de la memoria es la siguiente. En el capítulo 3 se presenta el marco conceptual que envuelve a la memoria y que está detrás de cada concepto. También se habla de los estándares más influyentes subyacentes a la tecnología ROADM

En el capítulo 4 se presenta la tecnología que se desea evaluar y sus ventajas.

En el capítulo 5 se modela el problema con la normativa ETSI y se adapta a la tecnología de enlaces actual.

En el capítulo 6 se modela la red DWDM con la distribución Weibull y se proponen heurísticas para resolverlo.

En los capítulos 7 y 8 se presentan las discusiones y las conclusiones respectivamente.



## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivos Generales**

El objetivo general de esta memoria es: “La Reunión de información estadística y técnica de ROADM en función de modelar la red y resolver el modelo.”

Este objetivo surge porque la red enmallada es una red multiservicio de telecomunicaciones caracterizada por su flujo de información. La red es fácilmente diseñable, basta unir nodos con grafos -en papel- y definir velocidades al bit, pero la modelación de la misma suele encarar complicaciones.

La información que se reúne es para modelar la red, pero claramente no “resuelve el modelo”. La memoria trata en parte el cómo resolver el modelo.

Para que el modelo sea útil, es preciso validarlo aunque sea parcialmente.

El presente objetivo acota la presente memoria, pero no pone restricciones para próximos desarrollos en base al presente.

## **2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos son:

- 1- Obtener un modelo de la red basado en enlaces entre nodos
  
- 2- Considerando la imposibilidad de resolverlo determinísticamente por la naturaleza del flujo de información, el modelo será probabilístico acotado.
  
- 3- Dados dos eventos posibles esto es enlace caído y enlace funcionando; identificar técnicamente las causas probables de la caída del enlace.
  
- 4- Obtener un modelo acotado y de resolución simple, en términos de sumas y multiplicaciones de probabilidad.
  
- 5- Resolver el modelo, evitando el uso de probabilidad condicional y enfatizando el uso de índices como MTBF y MTTR, para obtener la disponibilidad.

## **3 Marco conceptual general.**

### **3.1 Impacto de la convergencia de redes y servicios**

Desde hace algún tiempo se están viviendo una serie de cambios dentro de las redes de los operadores de telecomunicaciones: no basta que una empresa de telefonía ofrezca sólo servicios de telefonía e Internet, o que las empresas distribuidoras de televisión por cable ofrezcan sólo servicios de televisión, sino que todas las redes de telecomunicaciones se están orientando y evolucionando a brindar un amplio espectro de servicios. Este fenómeno se conoce como convergencia de redes o FMC.

El número de tecnologías disponibles hacen que las personas y empresas posean una elección sumamente amplia en cuanto al acceso en las telecomunicaciones. Pero la limitación de interoperabilidad hace que no sea fácil contactarse entre usuarios por medios distintos, lo que sería deseable.

Una de las principales tecnologías que iniciaron la tendencia FMC fue la telefonía de protocolo IP. En base a estas redes estandarizadas o estándares de redes como SDH o ATM se puede aprovechar una red para transmitir voz, video y datos a la vez. Luego el concepto de NGN (Next Generation Networks, Redes de la Siguiete Generación) aparece con fuerza en el ámbito de conmutación de paquetes, telefonía IP e integración de redes en una. En la Figura 1 se muestra la jerarquía para redes NGN.

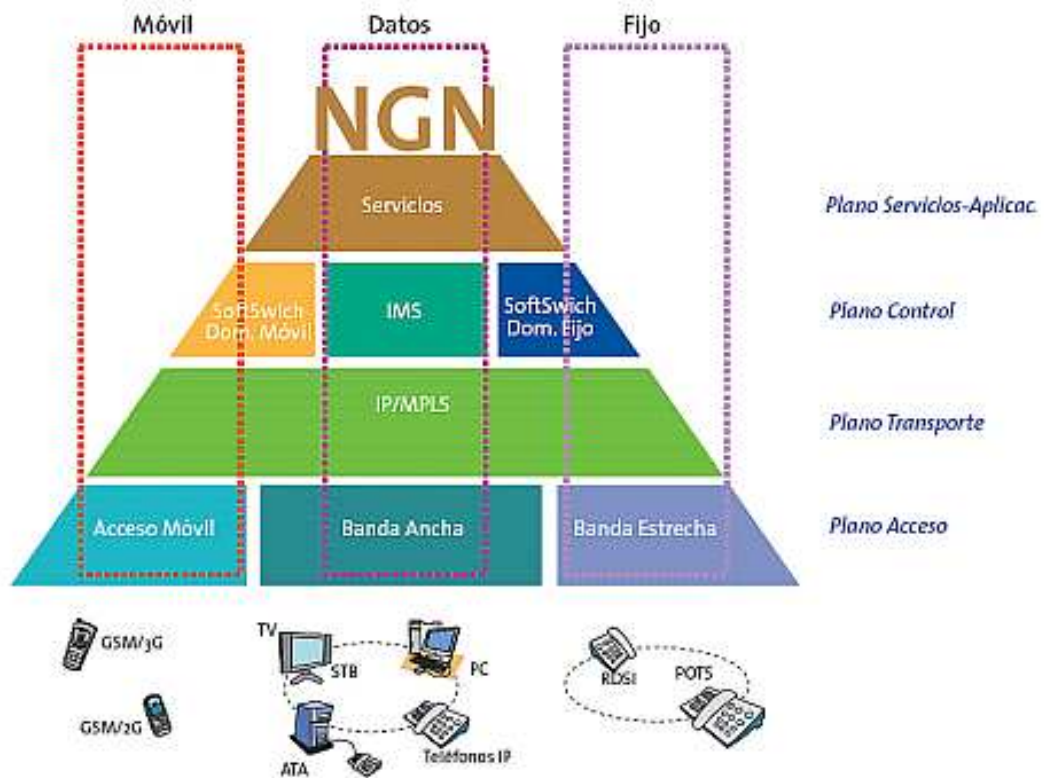


Figura 1: Jerarquía de planos para redes NGN, su composición está expuesta.

En la Figura 2 se muestra la arquitectura de NGN. Se observa claramente que hay una división en estrato de servicio y transporte. Lo más importante es la CONEXIÓN entre cualquiera de las capas detalladas, con otras redes; lo que muestra el paradigma de unión o interconexión con otras redes y como distintos protocolos se ven obligados a entender los protocolos de las "otras redes".

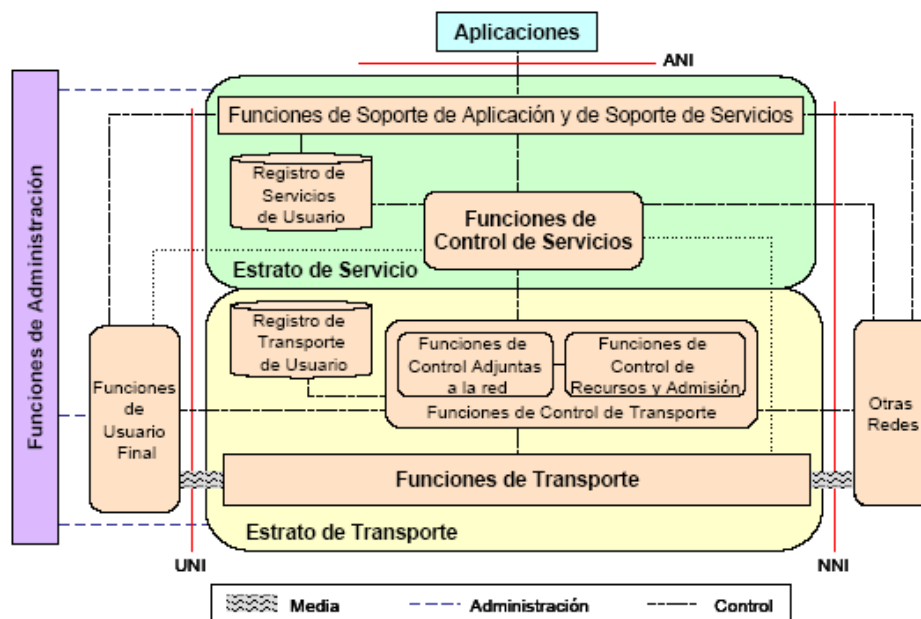


Figura 2: Diagrama de la arquitectura de la red NGN donde se detallan todas sus funciones generales.

Aunque no es el foco de la presente memoria, ha llegado a ser relevante la convergencia en las áreas mercadotécnicas e industriales, puesto que el contenido (*softwares*), la infraestructura de la red, los servicios y los equipos se han integrado facilitando trabajos en la industria y difundiendo los contenidos a lo largo de la red convergiendo el mercado.

En el mundo corporativo, el uso de la convergencia permitirá mejorar la forma en que las compañías administran sus redes informáticas. Los administradores de IT y de redes informáticas vaticinan que esta combinación entre sistemas de comunicaciones y computadoras proveerá una mayor eficiencia y soluciones más efectivas en el campo de los negocios.

Actualmente, algunos operadores de negocios dudan sobre la conveniencia de adoptar el sistema de convergencia. Piensan que "una pequeña diferencia de costo-beneficio no justifica reemplazar sistemas informáticos de eficiencia comprobada, tales como la telefonía

tradicional, por un sistema informático menos confiable". Esta preocupación es infundada y se basa en dos falsos conceptos.

El primer concepto equivocado es pensar que el único beneficio de la convergencia es el menor costo operativo. Esto no es así ya que, además de un menor costo, el sistema de convergencia permite desarrollar nuevas aplicaciones y procesos que, a su vez, generan mayores ingresos. Dichas aplicaciones les permiten a los usuarios (particulares o instituciones) comunicarse de manera más eficiente y compartir información a niveles macro. De ese modo, el sistema de convergencia promete una reducción en los costos operativos y un aumento del rendimiento y de la productividad, además de proporcionar fuentes de ingresos enteramente nuevas.

El segundo concepto erróneo es la falsa creencia de que las redes de datos son poco confiables. Es cierto que la confiabilidad de un sistema informático no es una preocupación menor; sin embargo, en este caso no constituye un problema insoluble. En la actualidad, más del cincuenta por ciento de los problemas con las redes de datos está directamente relacionado con la infraestructura informática. De ese modo, podría pensarse que la cantidad de inconvenientes se acrecentaría sustancialmente con el uso de este sistema. Sin embargo, dado que la aplicación de la convergencia requiere mayor ancho de banda, esto no sucede. Existen diversas soluciones disponibles en materia de transmisión por cable que proveen suficiente margen para el uso de aplicaciones que requieren el uso intensivo de ancho de banda.

Es recomendable verificar que la infraestructura en materia de cableado sea consistente con los requerimientos de ancho de banda que necesita el sistema. Tomando estas precauciones, el sistema de convergencia funcionará de manera confiable y eficiente. La clave para un correcto uso de esta tecnología consiste en aprovechar de manera apropiada el ancho de banda.

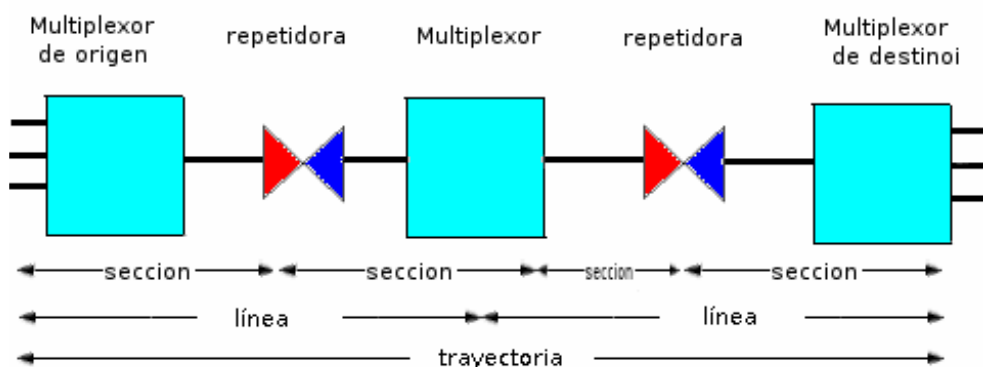
## 3.2 Synchronous Digital Hierarchi (SDH)

SDH son las siglas de Jerarquía Digital Sincrónica en castellano. Es un estándar internacional para transmisión de datos por fibra óptica.

Posee varias características que la hacen única, organizadas como sigue:

- es sincrónica
- múltiplos de tasas 155Mbps
- diseñada para diversos tráficos
- Internet (datos)
- TV digital por tasa de Tx
- Telefonía IP
- define un standard de red (ver figura)-medio mayoritario: fibra óptica
- compatible con ATM
- Jerarquía (LS-MS): fotónica, sección, línea, trayectoria.
- alcanza velocidades del Gbit
- Telefonía digital
- audio y video [3]
- sólo se aproxima a tasas de ATM

Nótese que aunque se afirma el uso de fibra óptica, para enlaces de velocidad de 155Mbps SDH puede emplear también enlaces de Cu y FO como medio de transmisión, es decir, no es una condición ineludible decir que SDH se basa en fibra óptica, ya que es un sistema de transmisión que soporta tecnologías pasadas sobre ciertas condiciones.



*Figura 3: Estandarización de red SDH, un camino entre multiplexores se divide en líneas y subconjuntos de líneas llamados secciones, como se muestra en la figura.*

En sus inicios la jerarquía síncrona no aceptaba tramas STM del orden de 155 Mbps.

**STM-1**=155Mbps  
**STM-4**=622Mbps  
**STM-16**=2.5Gbps  
**STM-64**=10 Gbps

Al principio, SDH sólo soportaba tramas E1 o fibras ópticas de velocidades de 2 Mb/s y hasta a veces de 34 Mb/s, las cuales eran ocupadas por las compañías especializadas en datos y telefonía. Esta primitiva forma de comunicarse continuó lentamente a crecer aceptando velocidades de bit's cada vez más altas con el fin de hacer prácticos las velocidades de 155 Mb/s en la entrada de los equipos como señales cliente. La realidad es que SDH poseía equipos que en su interior MULTIPLEXABAN las señales en tramas STM desde 1 hasta 64.

Un análisis de las componentes SDH ahora se hace necesario. Los componentes del sistema SDH más moderno se esquematizan en la Figura 4, exceptuando los modernos ROADM (que son reconfigurables).



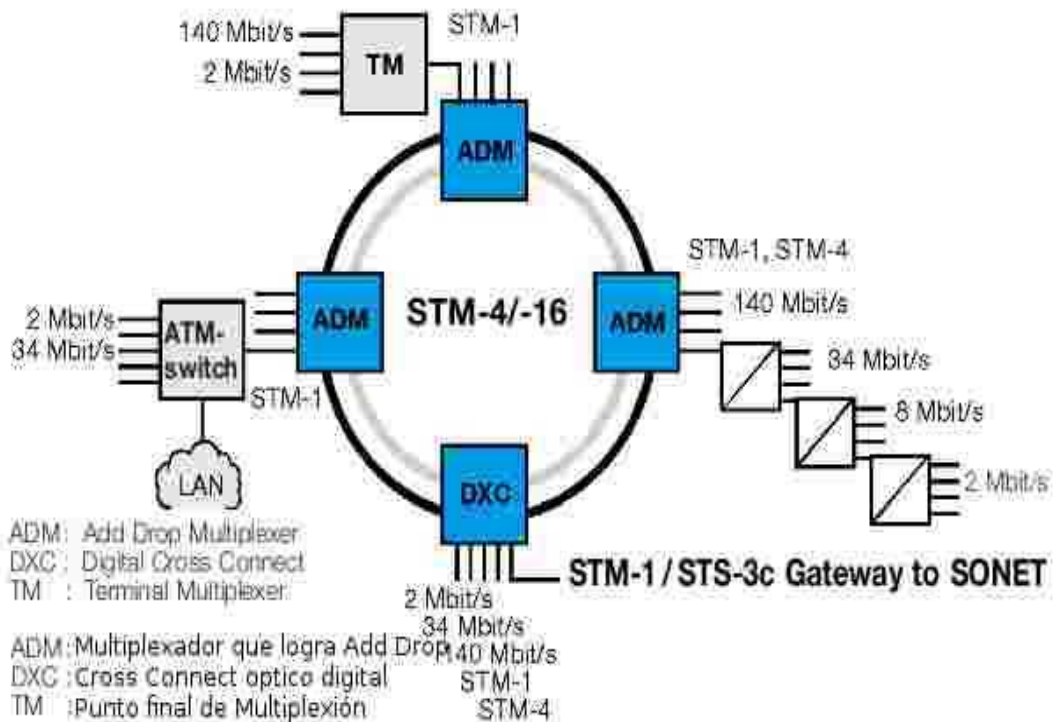


Figura 4: Componentes físicas y electrónicas de los sistemas SDH. En un sistema SDH no todos los componentes pueden estar presentes, algunos son opcionales.

**Regenerators (regeneradores o amplificadores).** Tienen el trabajo de regenerar el 'clock' y las amplitudes de las señales entrantes a este equipo que han sido atenuadas y distorsionadas por la dispersión. Ellos adquieren sus señales de 'clock' de la corriente de 'data' entrante. Los mensajes se reciben mediante la extracción de múltiples canales de 64kb/s (E1s, F1s, etc.) en el RSOH (Regenerator Section OverHead), así los mensajes pueden ser sacados (at output) usando estos canales.

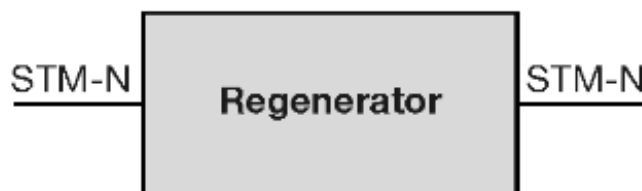
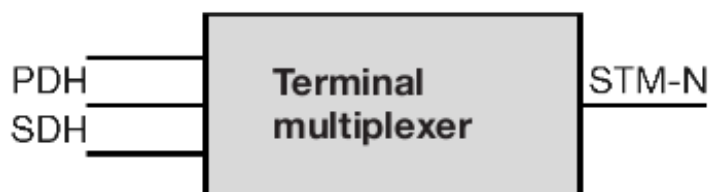


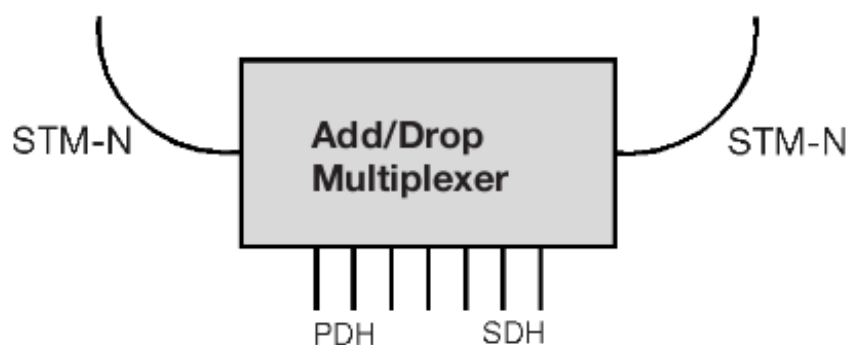
Figura 5: Regenerador en vista Entrada-Salida

**-Terminal Multiplexers (TM, punto final de multiplexión).** Estos son equipos multiplexores usados para combinar señales de entrada de tipo: a) plesiocrona (PDH) y b) síncrona; en tasas más altas de datos tipo STM-n.



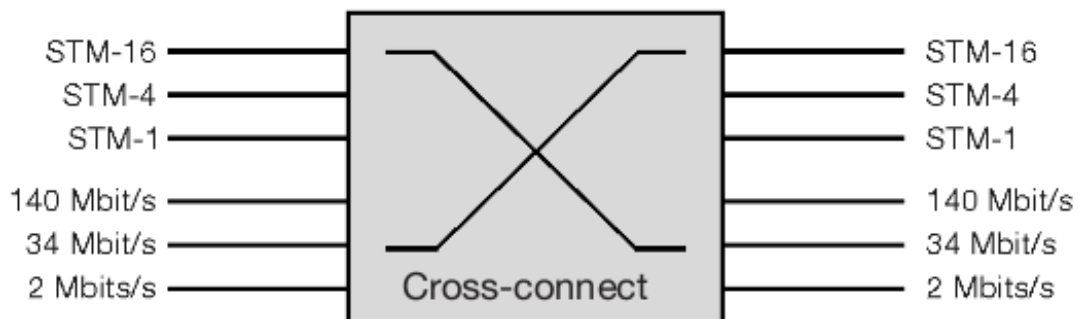
*Figura 6: Terminal multiplexer en vista entrada-salida*

**-Add/Drop Multiplexers (ADM, multiplexador que logra Add Drop).** Señales provenientes de PDH y de corrientes de más baja velocidad de bit se pueden extraer de corrientes de bits de tipo SDH (de alta velocidad), o bien, ser insertadas en las mismas corrientes de bits, todo gracias a las capacidades internas del componente ADM. Esta característica hace posible todo esto configurando la red en estructuras anilladas, las cuales tienen la ventaja de respaldo automático de caminos, mediante el uso de *path elements* de la misma red en anillo (duplicación de caminos).



*Figura 7: ADM en vista entrada-salida. Se nota que puede subir y bajar señales de índole SDH/PDH por los cables de abajo, lo que permite facilidades humanas 'for patch-cording'*

**-Digital Cross-Connect (DXC, Cross connect óptico digital).** Este elemento de red tiene la mayor gama de funcionalidad entre los 4. Permite en resumen *mapear* la señal PDH hacia VC (*virtual containers*, contenedores virtuales de información, en software) así como conmutar varios contenedores (*containers*) hacia adelante e incluyendo estos VC en formato VC-cuatro. En resumen, permite conmutar las señales de PDH sin mezclarlas informáticamente con las señales SDH y que no salgan a una red SDH, en otros términos, PDH se puede mezclar eléctricamente con SDH pero no se mezclará informáticamente.



*Figura 8: Digital Cross connect en vista Entradas-Salidas*

## 3.3 La técnica de conmutación GMPLS

Tanto en las redes SDH como en las ATM se presentan abundancias de tarjetas de red Ethernet con sus estándares: 1GbE, 10GbE, etc; además de las tarjetas STM con capacidad distinta, sin olvidar el tema de que tienen diferentes circuitos, a veces protocolos comunes y otras veces distintos dominios de conmutación. Sin embargo ¿cuál es la tecnología subyacente a estas dos? La respuesta es MPLS y su extensión GMPLS, ambas derivadas de un formato de conmutación (*switching*) llamado Label switching, motivo por el cual se hace este pre-desarrollo sobre GMPLS.

### 3.3.1 Label switching

La premisa del MPLS (Multiprotocol Label Switching) es aumentar la velocidad de la entrega o redirección de paquetes desde conmutadores y proveer la ingeniería de tráfico en las redes de protocolo IP.

Los equipos que tienen integrado Label switching prometen simplificar operaciones que se hacen en la red, a la vez que automatiza las conexiones punto-a-punto o peer-to-peer o P2P que se realizan en una red que soporta la tecnología (G)MPLS.

**Label switching** es una técnica de *relaying* de red que enfrenta los problemas de lentitud que trae el *ruteo de capa 3* etiquetando paquetes que determina el siguiente enlace de envío.

Considérese la Figura 9. Esta muestra una red de dominio genérico (*time, wavelength, fiber, packet*) con *routers* entre enlaces (LSR, o *routers* que soportan Label switching). Estos pueden ser *routers* de la tecnología correspondiente que se está usando como por ejemplo *routers* de *wavelength* (*wavelength multiplexing* y *switching* son técnicas de capa 1 y capa 2 correspondientemente). Abstrayéndose de la tecnología, la red maneja *ruteo* y señalización; en donde se soporta etiquetamiento de paquetes "*label*". Esta técnica consiste en que los paquetes que salen de un *router* como se ve en la Figura 17 -llamados LSR- son etiquetados con un número que identifica la siguiente ruta a

tomar y el *router* que lo pedirá. De esta forma se simplifica y reducen entorpecimientos que provoca el usar *ruteo* por capa 3 en la red, proveyendo el llamado *Label switched*.

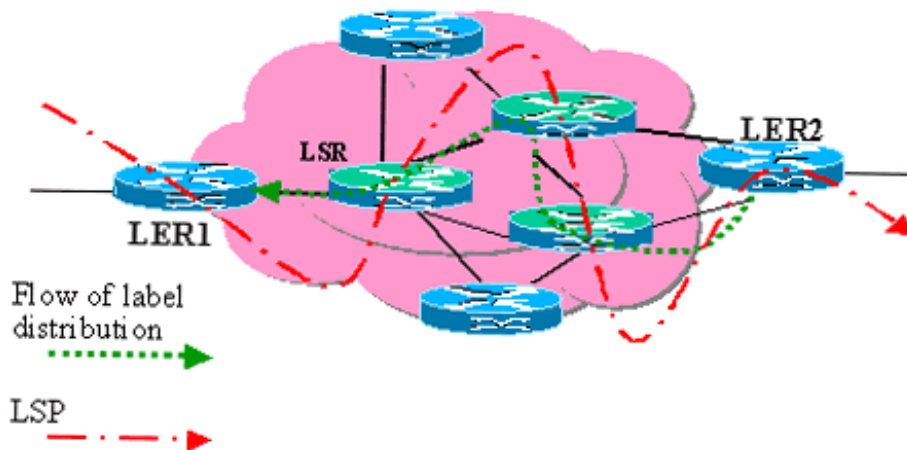


Figura 9: Esquema diagramático que explica como se etiquetan los routers y como se conmutan y entregan los paquetes desde la capa 2 (Label distribution y label swithing)

La señalización corresponde al proceso por el cual se puede saber a cada quien está correspondido el paquete que se está enviando mediante *headers* del paquete en cuestión, pero ¿y qué pasa si la red no está inicializada y no se tiene la información inicial de a quién o qué *router* se le debe enviar el siguiente paquete? .

En la Figura 9 se muestra en rojo el flujo de envío de paquetes por 'path's' y en verde se muestra el flujo de media enfocado a distribuir las etiquetas de cada *router* para ser identificadas en la etiqueta de cada paquete. La señalización acá se ha hecho suprimiendo la información dentro de los paquetes en sí, y más bien etiquetando separadamente estos en su trama (frame) de capa 2 simplificando todo el proceso de envío y *enrutamiento*.

El protocolo más común es **RSVP-traffic engineering (RSVP-TE)**. Este se caracteriza por etiquetar a los *routers* una vez que han pasado los paquetes en la primera vez de su viaje por la red.

RSVP-TE es una versión extendida de la anterior, enfocada a distribuir etiquetas por sus mensajes y proveer la capacidad de ingeniería de tráfico yacente. Nuevamente, en la Figura 9 se muestra el flujo de

distribución de etiquetas que es acarreado por la corriente “derecha-a-izquierda” (corriente inversa) del *router* LER2 mientras que el LSP (*label switching path*) es un flujo derecho o inverso a la corriente de “derecha-a-izquierda”.

### 3.3.2 El plano de control

El plano de control provee a los dispositivos de *ruteo*: automatización de las conexiones punto-a-punto, administración eficiente de los recursos de red y provisión de un buen QoS. También habilita una conexión transparente y convergente a las redes heredadas de MPLS.

El plano de control GMPLS incluye funcionalidades tales como *enrutamiento*, gestión de enlace, señalización y recuperación. Bajo GMPLS existen tres componentes principales involucradas en el establecimiento de un canal:

1. **Exploración de recursos.** Se obtiene información acerca de los recursos de red tales como conectividad o capacidad de los enlaces. Los mecanismos utilizados para diseminar esta información de estado se basan en una extensión del Internet Gateway Protocol (IGP).
2. **Selección de ruta.** Se utiliza para seleccionar una ruta apropiada a través de la red óptica inteligente en base a unas ciertas restricciones impuestas por el entorno y las limitaciones de la capa física.
3. **Gestión de ruta.** Incluye distribución de etiquetas, así como establecimiento, mantenimiento y terminación de ruta. Estas funciones se realizan por medio de un protocolo de señalización extendido como Resource Reservation Protocol for Traffic Engineering (RSVP-TE) o Constraint-routed Label Distribution Protocol (CR-LDP)

Sin perder de vista lo que nos importa, GMPLS provee extensiones de protocolo a MPLS que afectan a la ingeniería de tráfico entre otros, permitiendo la protección y restauración de rutas.

Protección corresponde a respaldar el flujo de información por un enlace (entendiéndose respaldar como el análogo al respaldo de información de un computador) con métodos dedicados o compartidos. El primero significa que el enlace tiene un uso específico de respaldar la señal cuando ésta falla. El segundo significa que la señal será respaldada continuamente por una ruta 1+1, implicando bajísimos tiempos de conmutación (50 ms).

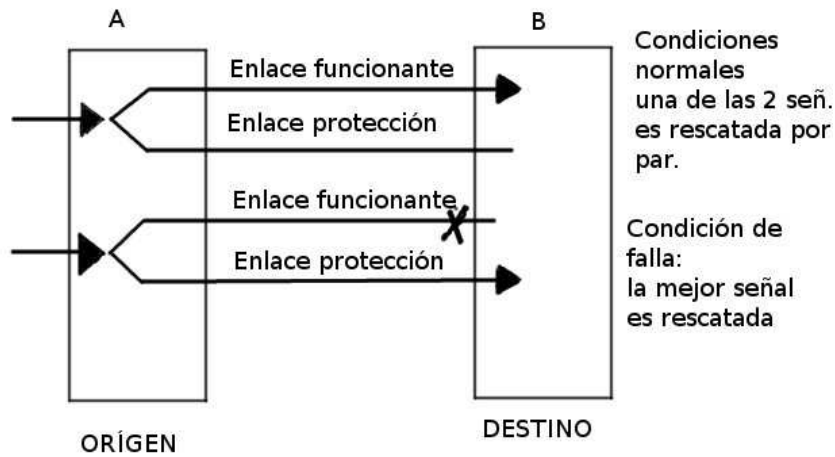


Figura 10: Esquema de la protección 1+1 como ejemplo de protección de recursos.

Restauración por contraste de protección, trata de algoritmos más complejos en la labor de rescatar el tráfico. Restauración consiste en encontrar una RUTA de tráfico alternativo por la cual poder transportar la señal ante la falla en la ruta funcionando. Los tiempos de restauración, en este caso van a ser más altos que los del sistema de protección: 1 segundo, 1 minuto hasta 6 horas.

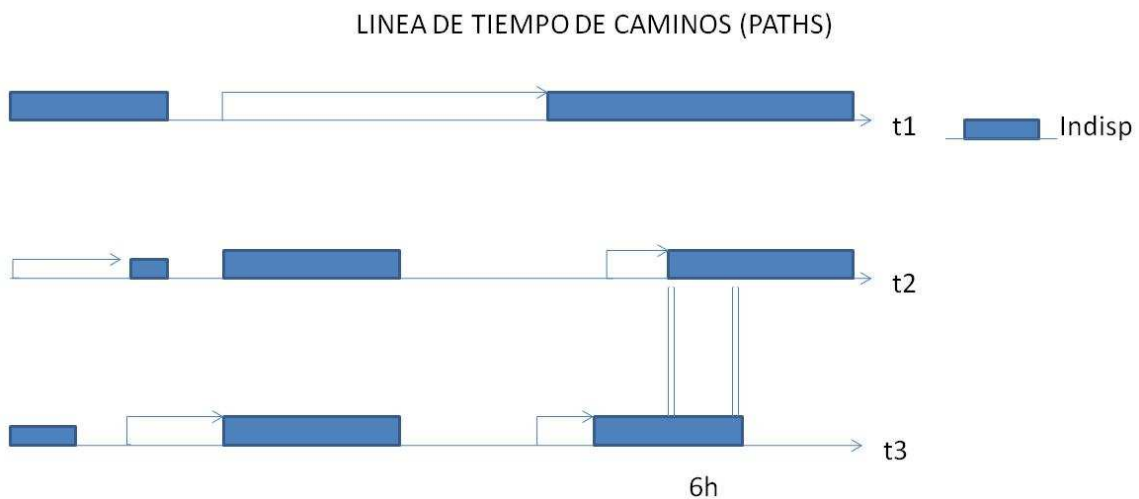


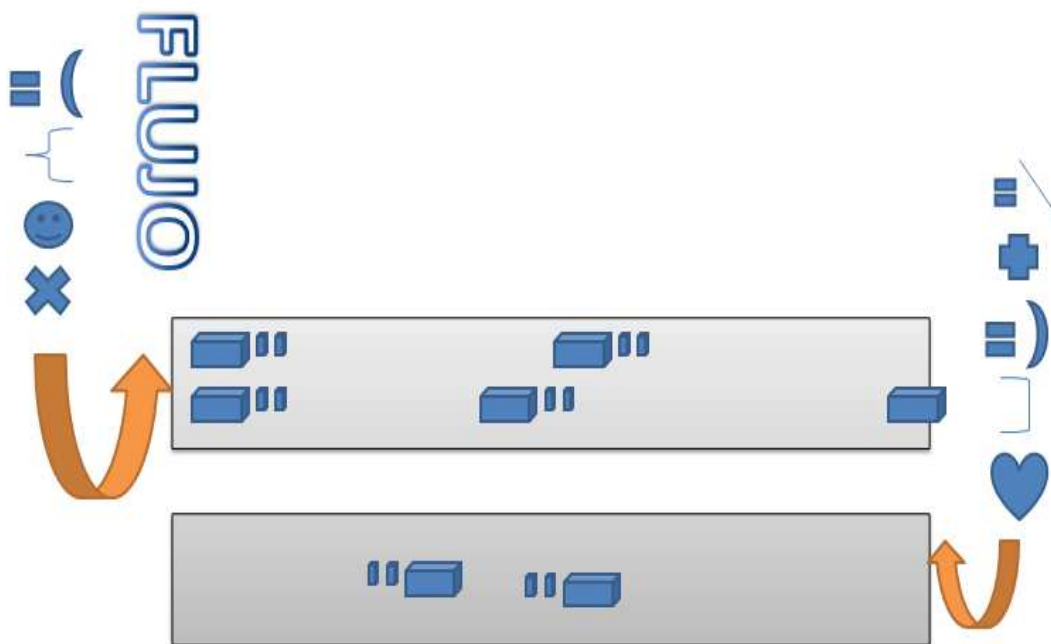
Figura 11: Línea de tiempo de tres diferentes caminos de la red, donde se ve una separación de tiempo que corresponde al tiempo medio que estará la restauración tratando de recomponer el sistema cuando se usa Restauración.

### 3.4 Matriz de tráfico.

La Matriz de Tráfico es una de las matrices más utilizadas en dimensionamiento de redes tanto telefónicas como de internet. Su fin es dar una noción de los flujos de información en una red de topología diversa de la manera más simple posible, dado que se conocen los flujos de información (los tráficos A's).

En esta sección se darán los principios en los que se basa dicha matriz sin desviarse del tema al cual se convergerá.

Considérese un sistema de Banda Ancha core, o en general cualquier sistema de telecomunicaciones digital, el que esté caracterizado por un flujo de bits de información. En la Figura 12 se aprecia el modelo conceptual del sistema.



*Figura 12: Modelo conceptual de un tráfico agregado (de todos los usuarios) del sistema de Tx. A la izquierda y a la derecha del diagrama se puede apreciar cómo se agrega el tráfico final en los extremos transmisores de canal.*

Las variables que describen al modelo son las siguientes:



$A$ : tráfico total por grupo de abonados  $\left[\frac{\text{flujo de información}}{\text{tiempo}}\right]$

$N$ : número total de abonados en el grupo [abonados]

$a$ : tráfico por abonado  $\left[\frac{\text{flujo de información}}{\text{abonados} \times \text{tiempo}}\right]$

$I$ : intensidad de llamadas  $\left[\frac{\text{flujo de información}}{\text{tiempo}^2}\right]$

$h$ : tiempo de ocupación media [tiempo]

Cabe destacar que  $h$  se puede interpretar como la duración media de cada llamada.

Las relaciones básicas que plantea la teoría de tráfico son las siguientes:

$$A = I \times h \quad A = N \times a$$

(1)

Estas relaciones no las vamos a detallar en esta sección, sólo se empleará la noción de tráfico total del grupo y se analizará su relación y previsión con la Matriz de Tráfico.

Considérese una red cualquiera como la de la Figura 13.

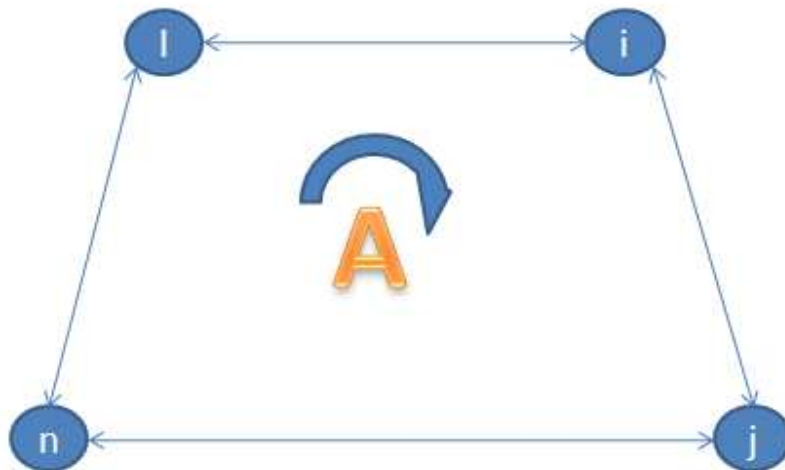


Figura 13: Red de telecomunicaciones caracterizada por un flujo circulante en ella.

La Matriz de Tráfico se define para esta red mediante casilleros que representan el flujo entre cada par de nodos. Su misión es ordenar en un arreglo los tráficos entre puntos de manera que sea fácil visualizar y

operar con celdas las cantidades de 'A'. Un ejemplo de Matriz de Tráfico (para esta red) se puede visualizar en la Figura 14.

	l	i	j	n
l		A(li)	0	A(ln)
i			A(ij)	0
j				A(jn)
n				

Figura 14: Matriz de Tráfico de la red anterior. Se puede apreciar que es matriz triangular superior. Siendo la red de tráfico bidireccional, se omiten o se copian los valores del 'triángulo superior' al 'triángulo inferior'.

Donde:

*A(li): tráfico entre la estación l y la estación l.*

*A(ln): tráfico entre l y n*

*A(ij): tráfico entre i e j.*

*A(jn): tráfico entre j y n.*

Y cada vez que en la matriz haya un cero (0) significa que no hay flujo o enlace entre aquellos par de nodos.

A veces es necesario conocer los flujos terminados en t , t=l,i,j y n. Para conocer los flujos terminados en alguna fila/columna en particular (nodo de salida, nodo de entrada), se agrega una columna al final de la matriz y una fila al fondo de la misma, como se muestra en la Figura 15.

La cantidad Suma' es la suma de la columna al final de la matriz verticalmente, y DEBE dar igual a la suma de la última fila.

	l	i	j	N	Suma
l		A(li)	0	A(ln)	A(li)+A(ln)
i			A(ij)	0	A(ij)
j				A(jn)	A(jn)
n					0
suma	0	A(li)	A(ij)	A(ln)+A(jn)	Suma'

*Figura 15: Matriz de Transición con fila/columna agregada para suma de flujos en un nodo de salida/entrada.*

## 4 Tecnología ROADM

La tecnología ROADM se ha impuesto como la tecnología reconfigurable (de índole 'opcionable' en sus características de calibración) posicionada en lo más alto en el diseño de redes. *Enrutadores*, conmutadores, multiplexadores: ROADM condensa todo eso y más. ROADM cumple con el propósito de acunar tarjetas de tipo 1GbE-10GbE, STM-16 y STM-64 (de grandes velocidades de Tx: GigaByte.) en un sólo equipo que respalda la transmisión por fibra óptica y es capaz de usar como plataforma DWDM.

### 4.1 Arquitectura G.805

Se trata de un modelo más aplicable aún que el de capas OSI para el transporte en redes. El enfoque es plenamente hacia redes orientadas a la conexión. Estas redes son las ilustradas en G.805. La 1ra definición Layer networks.

Layer network es una red con capas que representan redes independientes. Se puede decir que son layer network's porque: existen en 1 capa, y porque es una red en sí misma.

Sea CI una entrada a la red de la Figura 16 como "entrada" y la que es transportada a una salida sin ninguna degradación. Considérese CI.

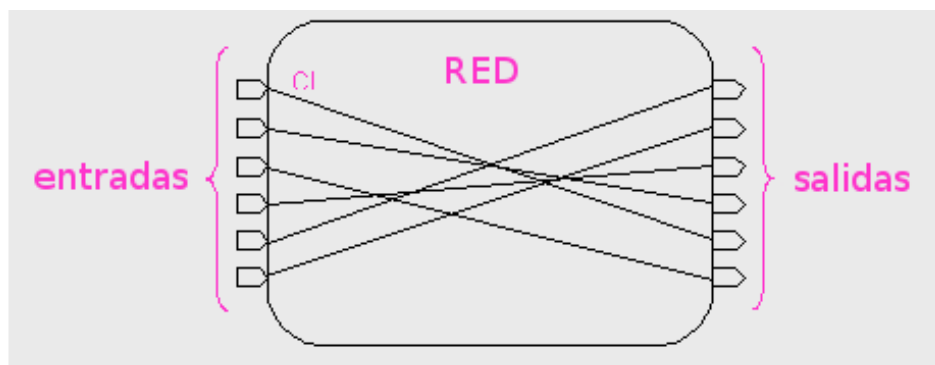


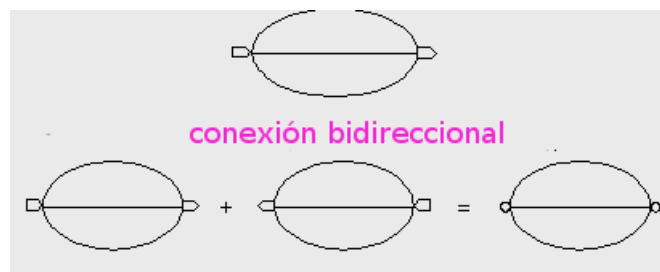
Figura 16: Esquema de un layer network: entradas y salidas.

La asociación de una entrada con una salida se llama conexión.

En redes CO (orientadas a la conexión) estas entradas mutan por la configuración y por un procedimiento tear-down.

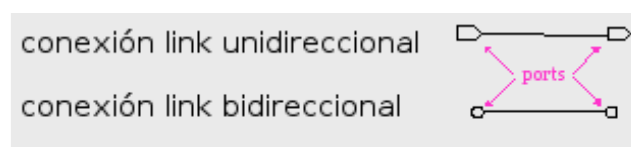
En redes CL (no-orientadas a la conexión) la conexión de red es transiente (para un sólo paquete) o “alargado de vida” (para todo un flujo).

Una conexión de red enlaza una salida con una entrada como se aprecia en la Figura 17, lo que es normal es que se necesite tener una conexión bidireccional como sucede con un transductor o un modem.



*Figura 17: Topología de una conexión de red unidireccional hacia la derecha, unidireccional a la izquierda y su composición resultante: bidireccional.*

Un link connection (LC) es una conexión modificada para tener un enlace entre dos puertos. Una LC es la más pequeña unidad de capacidad administrable o utilizable (controlable). En la Figura 18, se muestran ejemplos de conexiones unidireccionales y bidireccionales.



*Figura 18: Esquema clarificador de las conexiones uni y bidireccionales.*

Una subnetwork connection (SNC) es una conexión flexible especialmente diseñada para redes orientadas a la conexión. Las SNCs mutan a causa de funciones de administración de red. Véase la Figura

19 para comprender y visualizar las conexiones en distintos tipos de subnetwork connection.

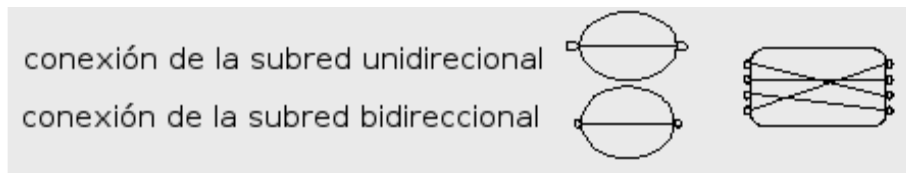


Figura 19: Esquema de SNC's de ambos tipos, donde el dibujo derecho muestra un ejemplo de verdaderos enlaces interconectados en la subred.

En conclusión, **elemento de red** es el más simple SNC (puede ser un switch, un crossconnect o una matriz (en bruto) punto a punto).

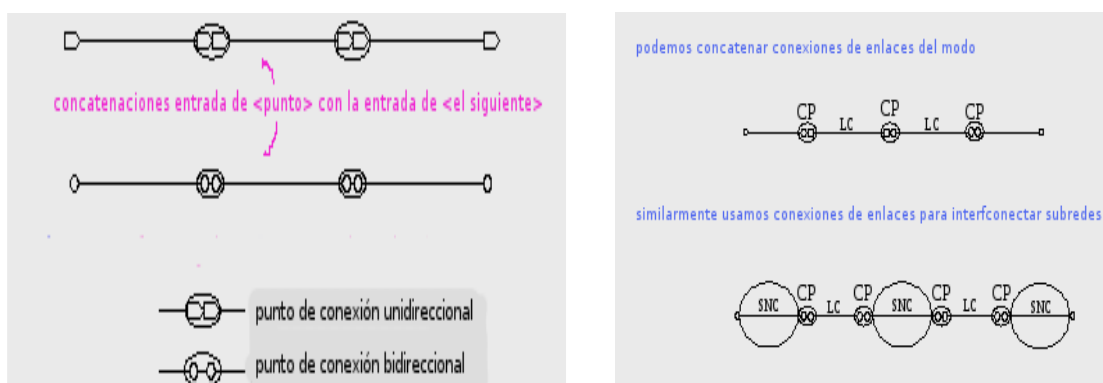
Una entidad de transporte es un elemento que transfiere información desde un punto a otro punto, y una función de procesamiento del transporte es la que ejecuta algunos procesamientos de información necesarios.

Sin embargo, a nivel de abstracción G805 es una norma independiente de la tecnología usada.

Layer networks y Subnetworks son componentes topológicas. Finalmente, LC's y SNC's son entidades de transporte.

#### 4.1.1 Síntesis G.805

Una concatenación de conexiones se muestra en la Figura 20.



20:

Figura 20: Concatenaciones punto a punto y con subredes en el trayecto

OAM (O.A.M., Operations of Administration and Maintenance), Operaciones de Administración y Mantenimiento, como su nombre lo sugiere es un conjunto de operaciones de la capa de red que tiene las funciones de:

- Monitorear la validez de la señal
- Reporte de defectos
- Inhibición o indicación de alarmas

En conclusión, G.805 define abstractamente la terminología básica usada para describir conexiones de red. Está enfocada más en conexiones que en redes. La fortaleza está en que todas esas definiciones son independientes de la tecnología, y muestran conceptos concretos sobre la interacción entre capas. También está enfocada a definir los OAMs, dando expresamente los datos para hacer una red en estándares de control (de flujo).

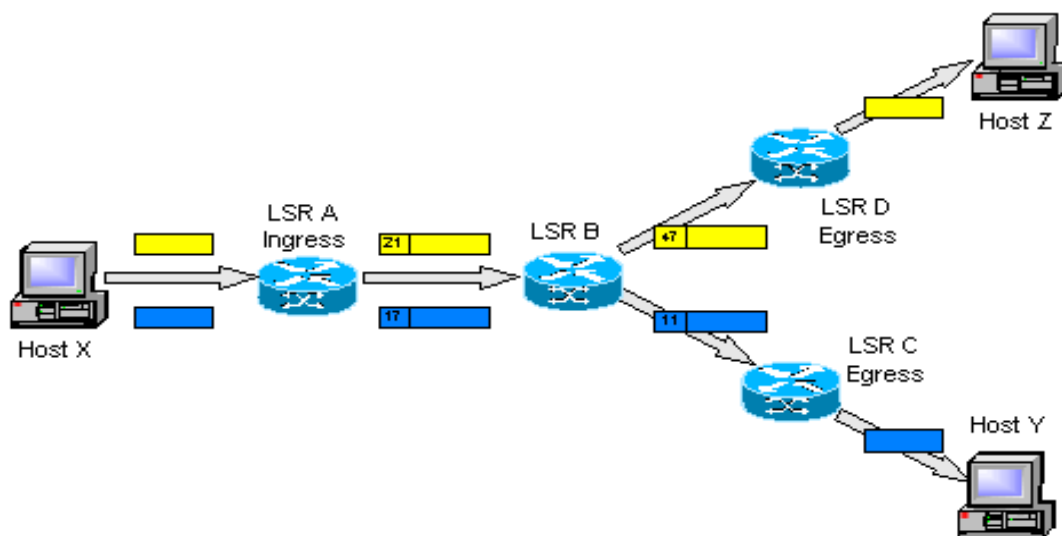
Una técnica muy utilizada e íntimamente relacionada con la multiplexación óptica es GMPLS (generalized-MPLS).

En rasgos generales es MPLS con el Plano de Control al MPLS, lo que apunta a que los "nodos" conmuten todos los *dominios existentes* hasta la fecha: paquetes, time, wavelength y FFOO.

Está claro que la idea de GMPLS es entregar los paquetes a su destino de manera eficiente. O por lo menos, más eficientemente que MPLS u otra tecnología. La única manera de hacerlo fue relajar la función de la capa de red (o 3) en la entrega de paquetes desde "*ingress*" hasta "*egress*". Definiremos los llamados *LSRouter Ingress* (LS=*label switched*) y *LSRouter Egress* **como el primer router que toma el paquete necesario a entregar (a destino) y el router final y último que cumple la función de entrega del paquete a su host de servicio.**

Es necesario una técnica o tecnología que se haga cargo de la entrega mediante un mínimo número de "instrucciones", esto es de LSR ingress a LSR egress. Esta técnica se llama **Label Switching**. Es una técnica de relaying de red que enfrenta los problemas de lentitud que trae el *ruteo de capa 3* etiquetando paquetes que determina el siguiente enlace de envío.

El proceso se hace en la capa de Enlace de datos (2), y la lentitud del proceso de capa 3 se reduce considerablemente. Aquí el *Host X* envía el paquete a un *Host Z* a través del LSR Ingress, el que lo etiqueta de acuerdo a la IP de destino que tiene el paquete enviado. La etiqueta es el no. 21 como muestra la Figura 21, ésta determina el siguiente salto a tomar (qué enlace) y determinará que el siguiente nodo a saltar será LSR B.



*Figura 21: proceso de envío y etiquetado de paquetes en Label Switching de GMPLS*

Nuevamente, en LSR B etiquetará al paquete según su IP de destino, determinándose así el siguiente enlace que tomar y el siguiente nodo a saltar (LSR egress que levantará todas las etiquetas y enviará a destino).

Para un régimen estable de enlaces; los *HOST X-Y* e *X-Z* se comunicarán siempre por el mismo camino punto-a-punto (peer2peer)

Esta modalidad de envío es mucho más expedita y minimizadora de pasos que el uso de la tabla de *ruteo* de capa-3, además que se independiza del uso de *routers* para el envío de paquetes, dando así justificación al uso del invento del sr. Bram Cohen: las redes punto-a-punto.



## 4.2 Multiplexación en frecuencia en sistemas de banda ancha

### WDM

La multiplexación por división de longitud de onda es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED. Se puede ver el aprovechamiento de la fibra óptica en decibeles (por kilómetro).

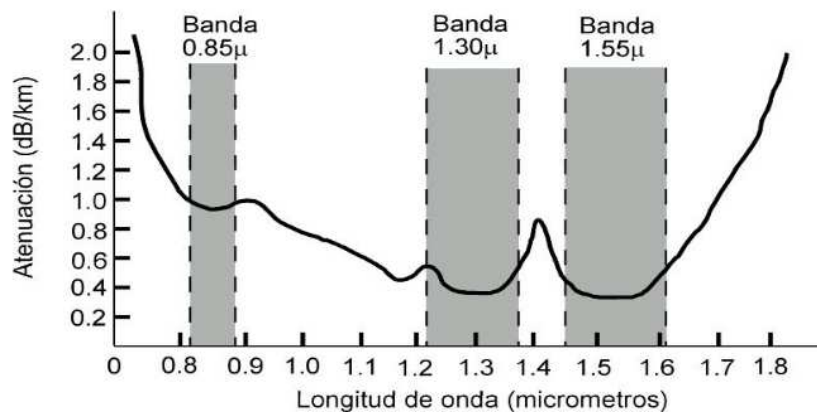


Figura 22: Gráfico empírico de la Atenuación de una fibra contra Longitud de onda, donde aparecen las 2 bandas principales de uso frecuente.

La longitud de onda de un haz lumínico se relaciona con la frecuencia en Hertzios:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

### DWDM

DWDM es el acrónimo de dense wavelength division multiplexing, en castellano multiplexación por división de longitudes de onda densas. DWDM es un método de multiplexación muy similar a la Multiplexación por división de frecuencia que se utiliza en medios de transmisión

electromagnéticos. Es tan similar que la multiplexación la realiza en el espectro longitudinal en vez del espectro frecuencial. Para una muestra práctica de DWDM ver la Figura 23.

De izquierda a derecha, en la entrada del MUX se tienen señales o longitudes de onda de diferentes lambdas, estas son lambdas centrales de la señal o portadoras (carriers). Son haces lumínicos de diferente color. Estas se combinan o multiplexan en el MUX para salir como una señal multiplexada en una única longitud de onda central

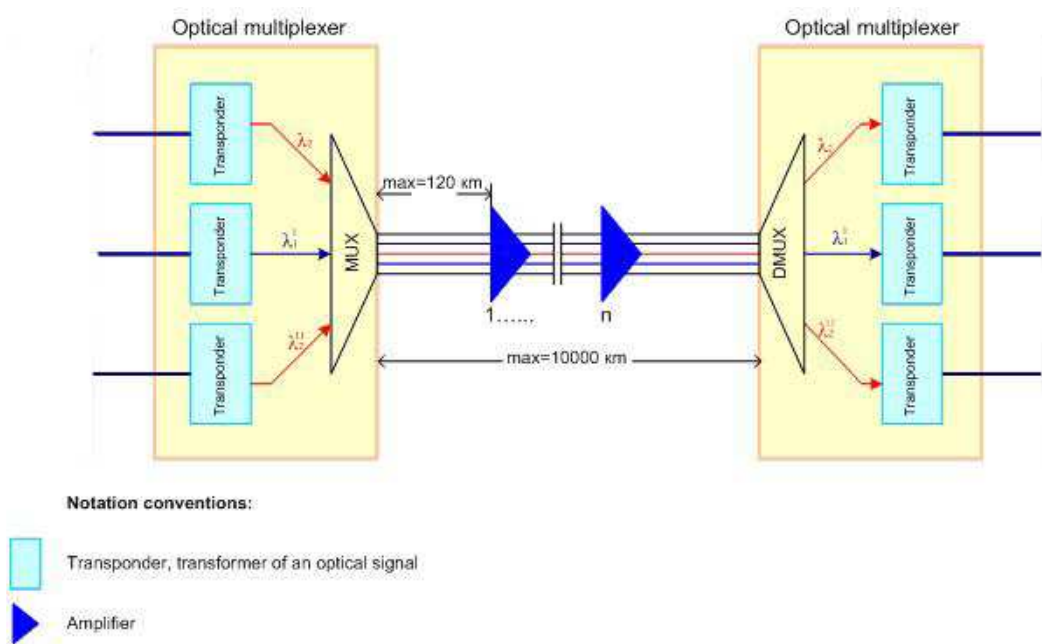


Figura 23: Esquema que se usa en la práctica para sistemas DWDM

La cadena de amplificadores (ópticos) es el elemento que sigue normalmente en el enlace con lambdas multiplexados. Estos se ocupan de dar ganancia a la señal en longitud de onda (potencia  $P[W]$  ).

Finalmente, la señal llega a un DEMUX que recupera las distintas señales en lambda a sus colores respectivos. Estos salen de la salida DEMUX para poder ser bajadas en el lado cliente.

El "alambrado" y equipado antes de la entrada del MUX se llama <Lado Cliente>. Igualmente, el de la derecha del DEMUX se llama <Lado

Cliente>. Los equipos que funcionan con DWDM son full-duplex o bidireccionales.

DWDM y WDM son tecnologías o técnicas de transmisión que funcionan en la capa 1 o capa física, y pueden catalogarse como ópticas con transformación por transpondedores optoelectrónicos.

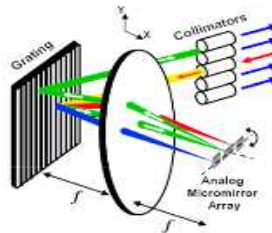
### **4.3 ROADM: Reconfigurable Optical Add'n Drop Multiplexor.**

ROADM (ROADM, Reconfigurable Optical Add'n Drop Multiplexor) no es una tecnología nueva, ROADM ha nacido tiempo antes cuando las TELCO's ya se asomaban a necesitar CrossConnect o Conexiones cruzadas. Eran sistemas ópticos, sistemas autónomos que por supuesto conmutaban circuitos retro-compatibles con circuitos eléctricos de comunicaciones.

**ROADM** como concepto y funcionalidad surgió unos (10) años después. ROADM generalmente se define como **la tecnología cúlmine de conmutación óptica presente en los circuitos cross-connected que son capaces de conmutar (por paquetes) la luz óptica, conjugando las características de reconfigurabilidad, reasignación de anchobanda, flexibilidad y robustez de tráfico y de envío de señales ópticas.**

ROADM es la tecnología que interactúa con DWDM que ofrece más escalabilidad que todas las otras; pero sin duda sus características son la flexibilidad que ofrece en administración de recursos, su robustez y su capacidad de reasignación de recursos de BW en la red a lo largo de períodos de tiempo.

Su medio es el óptico y como tal permitirá ser retro y post compatible con arquitecturas y/o tecnologías como Ethernet y SDH/SONET.



*Figura 24: Reflector interno en conmutadores ópticos WSS adentro de ROADM.*

ROADM es flexible: Puede proveer regulación de los canales ADDed 'n DROPed, puede proveer una regulación de la Atenuación de canal (con su ancho de banda incluido (50G) ), y finalmente, puede regular el umbral (es decir el punto de corte o criterio) de Pérdidas de Potencia a la entrada (una cantidad en Decibelios referidos al miliWatio), dando provisto una tasa de atenuación de la interfaz óptica.

Sin embargo, como en los primeros ROADM's el regular canales era demasiado engorroso - y humanamente infactible-, fue necesario que los fabricantes pensaran en automatizar procesos de constante cambio como *la designación de nuevos requerimientos de BW en la interfaz*, lo que en el plano técnico son procesos de implementación y reconfiguración, por ejemplo: el cambio de tarjeta de 1GBE a una STM-16 de SONET/SDH es un proceso complicado en cualquier otro sistema de *switch* digital, mientras que en ROADM está automatizado.

Su característica de ADD & DROP de canales evita muchos problemas físicos (patch-cord moving). Si se tienen canales add&drop, estos se deben mover de una conexión a otra para poder dejar o subir canales deseados. Estos trabajos son evitados con ROADM: reconfigura de manera automática. La modernización de este procedimiento además implica que está informatizado. Ver la Figura 25.

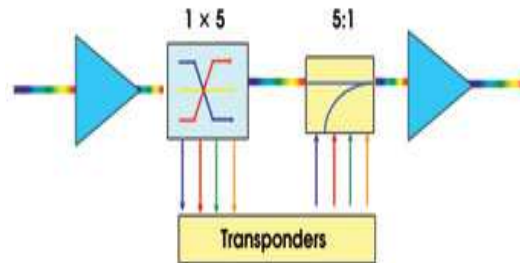


Figura 25: Ejemplo de ADD n DROP que se suben y bajan en Transponder

## 4.4 WSS análisis.

### Definición y análisis

WSS (Wavelength Selective Switches) como su nombre indica son *switches* que transportan la señal óptica en longitudes de onda seleccionadas (distintos canales) hacia distintos destinos sin necesidad de *enrutadores*.

En ROADM sirven como interfaces que captan tráfico y como interfaces que direccionan tráfico, las que también pueden servir para subir o bajar (add & drop) señales de modo que estas puedan ser conmutadas en cualquier parte de la red.

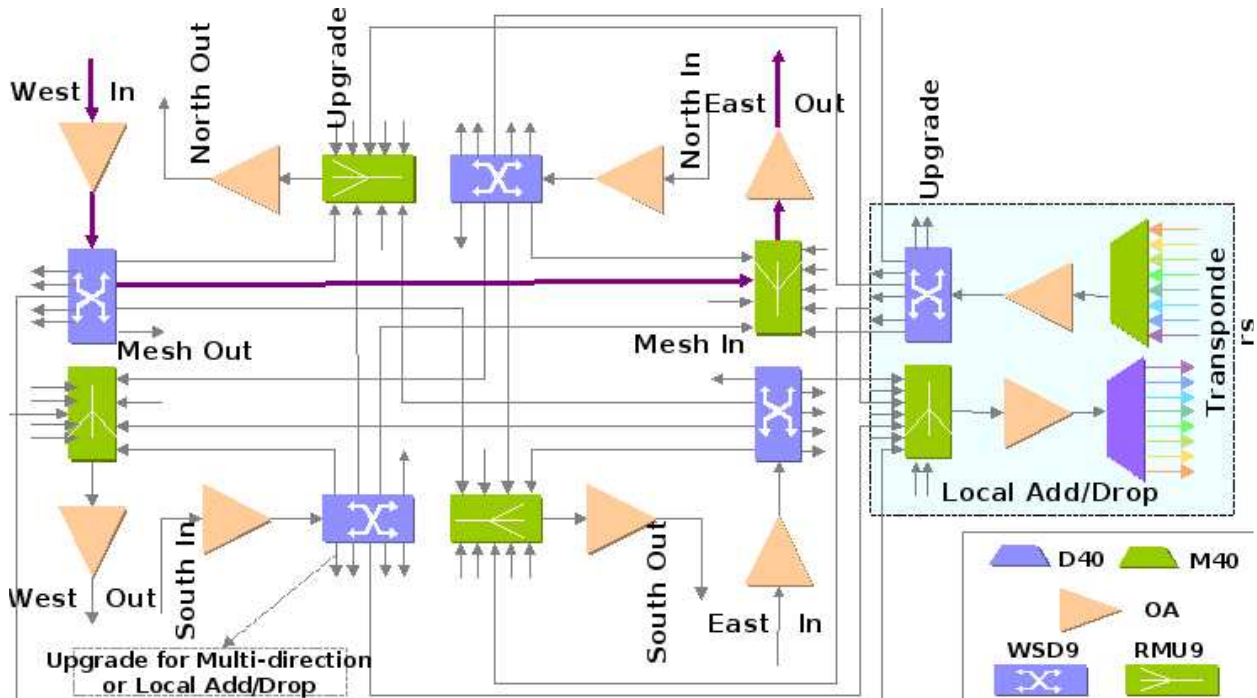


Figura 26: Esquemático de red que muestra en diversos “nodos” la característica conocida como ADD & DROP. Por ejemplo en el primer “nodo” de la matriz hay una subida de lambdas con el nombre de West In

WSS's son, en analogía los interruptores de ROADM.

Se tienen en 3 variedades: (notación [nº entradas]: [nºsalidas]) 1:1 or 1:2, 1:9, 1:20.

Se tienen en 6 tipos de material: (expresados en lenguaje técnico) Cristal líquido (LC), 2-Axis MEMS, 1-Axis MEMS + LC , LCOS, DLP y Integrated Planar Light Circuits (“circuitos azules” o IPLC). Materiales y tipos en Figura 28.

En suma, cumplen con la función de llevar a cabo el envío de señales sin repetición a su destino, permitiendo la amplia selección de frecuencias, rutas (robustez) y proveyendo flexibilidad (tune) en sus características ( Ver Figura 27). En resumen, WSS son los módulos (de última generación) que potencian ROADM.



Figura 27: Ilustración práctica de la flexibilidad ROADM para la aplicación ADD'n DROP.

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span style="background-color: green; color: white; padding: 2px;">✓✓</span> <span style="background-color: yellow; color: black; padding: 2px;">✓</span> <span style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">X</span> </div>					
WSS Type	Factor	Liquid Crystal (LC)	2-Axis MEMS	1-Axis MEMS + LC	LCOS	DLP	IPLC
1x1 2x1	Optical Performance						
	Material Cost						
	Mfg/Control Complexity						
	Rank	1	3	3	2	2	4
9x1	Optical Performance					Impractical	Impractical
	Material Cost						
	Mfg/Control Complexity						
	Rank	4	2	1	3		
20x1	Optical Performance	Impractical				Impractical	Impractical
	Material Cost						
	Mfg/Control Complexity						
	Rank		2	1	3		

Figura 28: Tabla comparativa de las tecnologías WSS según el fabricante de XTELLUS.

El plano de control de GMPLS se usa principalmente en los conmutadores WSS, los cuales utilizan la técnica de Lambda switching. Lambda switching es el homólogo a Label Switching visto en 3.3 pero en dominio fotónico. La fundamentación de Label switching es marcar ciertas longitudes de onda (“lambdas”) presentes en los paquetes transportados por la luz. En consideración de su similitud con la conmutación presente en la multiplexación temporal, los paquetes en la misma trama (*frame*) temporal son conmutados de la misma forma (hacia el mismo enlace, formando un lambda “desorden” que al egresar de la red lambda se ordena).

En conclusión este etiquetamiento de longitudes de onda hace posible a los *routers* realizar su función sin extraer ninguna información incluida en el paquete IP, reduciendo la complejidad de encapsulamiento de 'frames' y aumentando la escalabilidad de la red hacia redes que funcionan con docenas de lambdas.

## 4.5 Routing en wss

En el tema topología y algoritmos de *ruteo* de los nodos WSS, aparece el tema de Robustez en la información emitida. ¿Qué sucede si un enlace falla?. El algoritmo de *ruteo* se muestra en la Figura 29 donde se hace explícito en una red sencilla cómo se *rutea* ante enlaces que fallan sucesivamente en el tiempo.

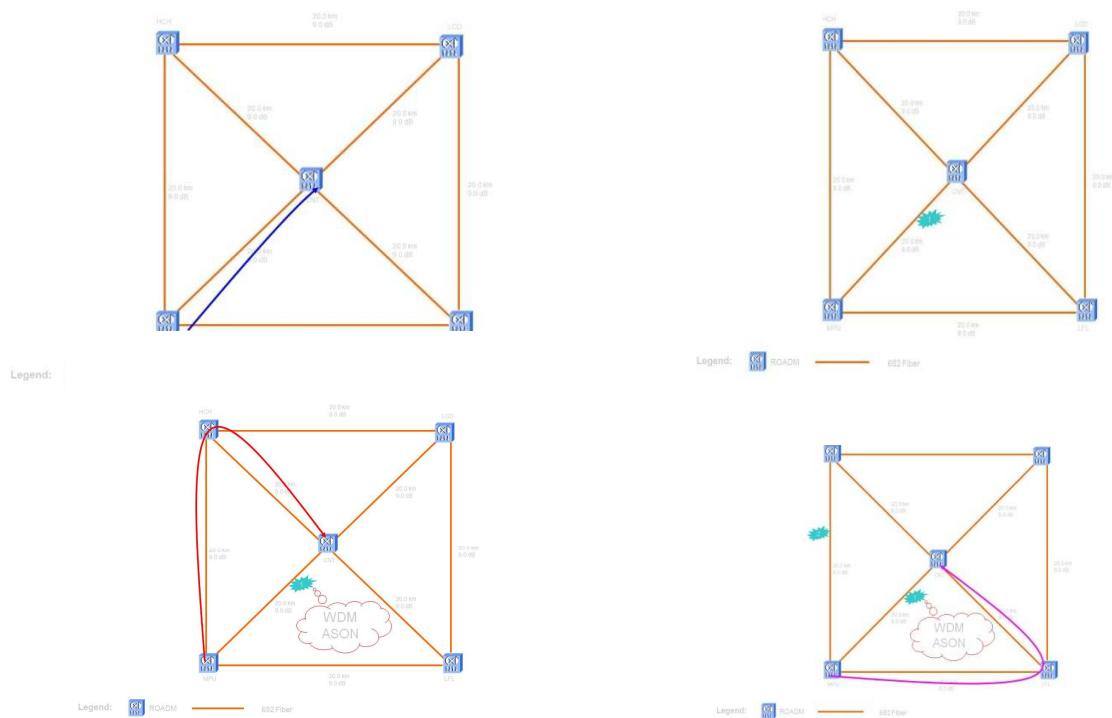


Figura 29: Algoritmo de ruteo en una red ROADM gráfico según rutas alternativas en nodos de grados 3(4) y 4(central).



El algoritmo de *ruteo* da la idea de la inteligencia y tenacidad (“perseverancia” algorítmica) que da ROADM, lo que entrega la sensación de que existe una Ingeniería de cálculo dirigido a probabilidades de tomar múltiples caminos, que ayudan a calcular la probabilidad de tomar una ruta alternativa.

# 5 Modelamiento y solución del problema de Disponibilidades.

## 5.1 Introducción a tiempos característicos de la estabilidad.

El cálculo de disponibilidad en una red se basa en las siguientes dos cantidades:

•**MTBF.** (MTBF, Mean Time Between Failures), como su nombre lo indica, es el tiempo promedio entre que se enciende la máquina y ocurre una falla en el hardware a tratar. Es el tiempo promedio que un fabricante estima antes de que ocurra una falla en un hardware.

•**MTTR.** (MTTR, Mean Time To Repair), es el tiempo que toma reparar una falla de hardware. En un equipo que por lo general entrega respuestas muy satisfactorias, reparar por lo general significa reemplazar el módulo de hardware. Así, El MTTR de un Hardware podría verse como el tiempo promedio que toma el reemplazar el módulo fallido de hardware. Por lo general debiera ser una meta de los diseñadores de sistemas permitir un alto MTTR y todavía así concebir los objetivos de fidelidad a los que apuntan los sistemas.

Estas son las dos cantidades teóricas base más importantes en el cálculo de disponibilidad *de un equipo*.

### 5.1.1 MTBF

MTBF es la media aritmética del tiempo que ocurre entre las fallas del sistema. Un sistema se define como una máquina con entradas y salidas que varían durante el tiempo. En este caso representa un hardware como un computador o un controlador.

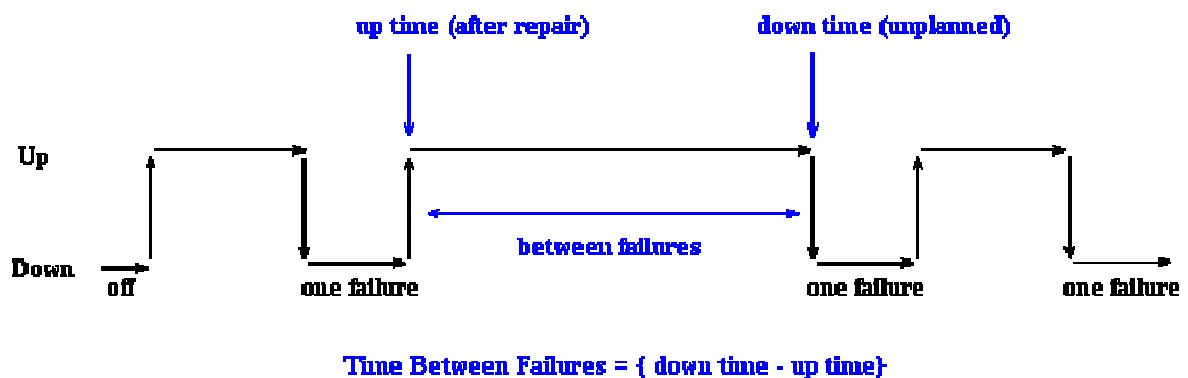


**P : calor, falla de transistor...**

*Figura 30: Esquema básico de un sistema de hardware, el cual es representado con entradas, salidas y perturbaciones.*

El MTBF es una cantidad técnica de un aparato de hardware que asume (en su definición más ideal) que el sistema es instantáneamente reparado (tiempo que toma reparación cero (0)), y que forma parte de su proceso de reincorporación.

La Figura 31 representa el tiempo operativo y el tiempo dado de baja de un sistema en cuestión, donde la reincorporación de la máquina tiene retardo cero (0).



*Figura 31: Línea temporal del periodo de observación de un sistema, donde se explica el periodo <between failures> asociado a una falla.*

De acuerdo a la Figura 31, MTBF es la media de los tiempos operativos, luego se calcula como la suma de los periodos operacionales dividido en el número de fallas observadas

$$MEANTIMEBETWEENFAIL = \frac{\sum(Downtime - Uptime)}{numberoffailures} \quad (1)$$

### 5.1.2 Aplicación técnica

Representando el Sistema como un equipo de hardware, ya sea un *Router*, un WSS, un MUX o cualquier equipo de telecomunicaciones, la definición de MTBF se llevará a su aplicación práctica.

En sí, basta someter el equipo al Horno de Calor, que hará las veces de perturbaciones. Se fija un periodo de observación. Durante el periodo de observación se fijará la atención en el número de fallas. A la vez, con un cronómetro se medirá el tiempo que dura cada falla. Se tabulará en una hoja el ordinal de la falla contra la duración de cada falla.

Finalmente, se sumará verticalmente la columna “duración de cada falla” y se obtendrá un resultado, llamado A. Con esto se tienen todos los datos para estimar el MTBF

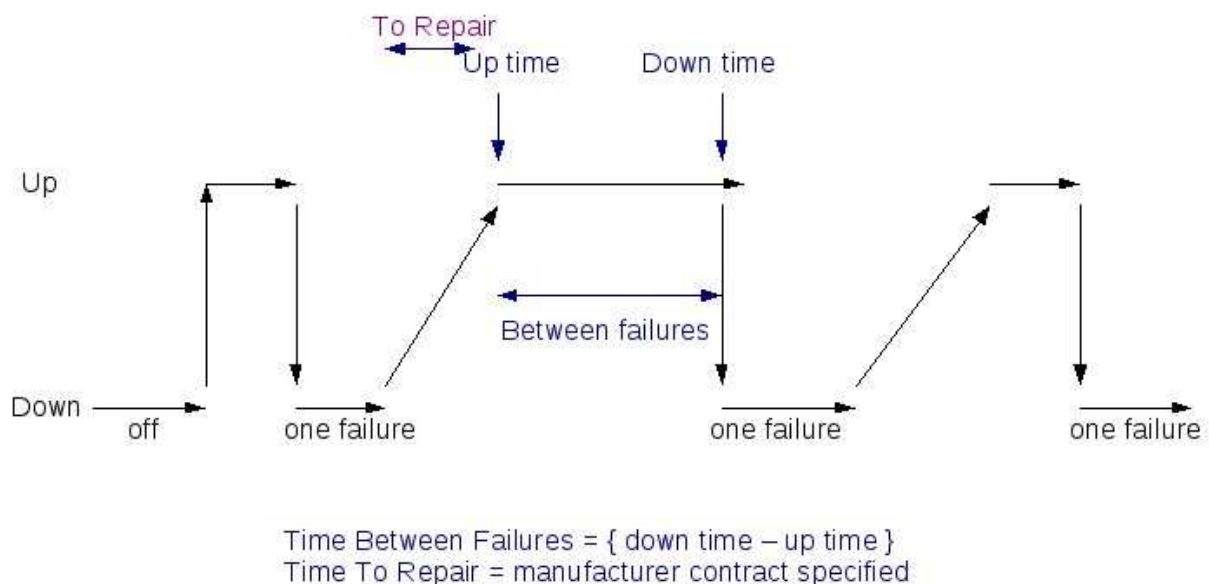
MTBF será la división entre A dividido por la última fila de la columna ordinal de falla.

$$MTBF = A / \text{número de fallas.} \quad (2)$$

Nuevamente, en la realidad no se supone que el sistema sea “multifallado” durante el periodo de interés (no de observación pues la observación estadística ya fue realizada), luego MTBF se puede interpretar como el tiempo que toma el encender el equipo y que falle, con una cantidad *en promedio*.

### 5.1.3 MTTR

MTTR. Es el tiempo que en promedio toma recobrar la operatividad de un equipo de telecomunicaciones. El equipo puede ser auto-reparable, o bien, equipos que deben ser reparados por profesionales (tiempo reparación calculado al orden de semanas) y equipos que deben ser inminentemente reemplazados. Según la Figura 32, el esquema mostrado representa MTTR en base a la Figura 31.



*Figura 32: Línea temporal donde se explica la reparación de una falla "To Repair"*

El MTTR usualmente sería parte de un contrato de mantenimiento por parte de los fabricantes, donde el usuario pagaría más por un sistema cuya MTTR fuera de 24 horas, que por una de 7 días. Esto es porque a menor MTTR mayor es la capacidad de reparación del personal.

En la tabla I se puede notar un ejemplo que ilustra que en su mayoría el MTTR es del orden de días hasta semanas dependiendo de su ubicación física.

<b>Estimaciones del MTTR de un Hardware</b>		
<b>Dónde se han dejado las piezas de Hw.?</b>	<b>Cómo se manipula el lugar?</b>	<b>MTTR estimada</b>
Dentro	24 horas al día	30 minutos
Dentro	Operador lo están llamando telefónicamente 24 horas al día	2 horas
Dentro	Hay trabajo continuo por horas durante los días de la semana así como los fines de semana y los festivos	14 horas
Dentro	Hay trabajo continuo por horas durante los días de la semana	3 días
Fuera. Se embarca por correo cuando se descubre la condición de falla.	El Operador es superado por el sistema cuando una falla es detectada.	1 semana
Fuera. Mantenido en una bodega controlada por un operador	El sistema está localizado remotamente. El operador no es capaz de reparar el hardware.	2 semanas

Tabla I: Estimación de la MTTR para distintas instancias.

### **Relación entre disponibilidad, MTTR y MTBF.**

Se tiende a relacionar MTTR y MTBF con la disponibilidad a través de la ecuación (A es la disponibilidad):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

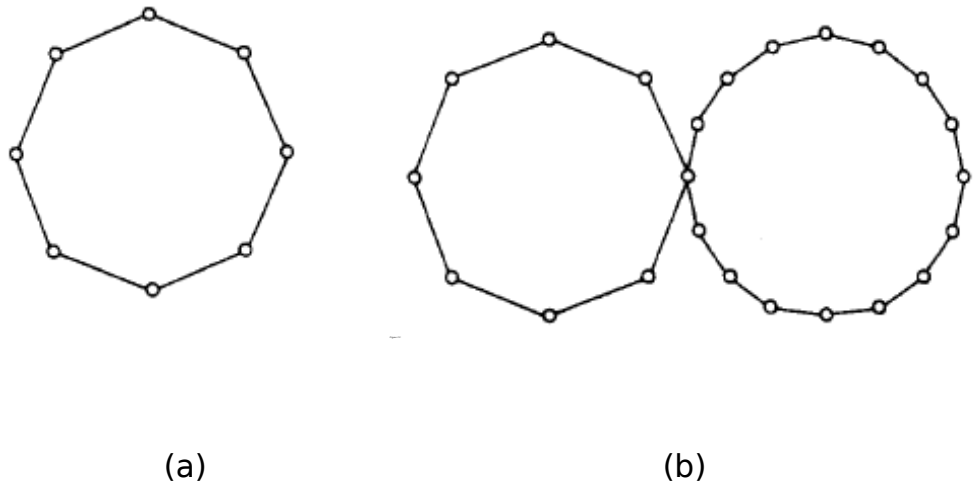
Lo que no necesariamente es cierto, pues se están despreciando los tiempos de notificación de fallas a cero (0); sin embargo, para efectos del estudio se asumirá como cierta.

## 5.2 Topologías de las redes de Comunicaciones.

Dentro del estudio de las redes se pueden dar diversas topologías; es importante saber que una red anillada es menos estable que una red enmallada por ejemplo. En este apartado se discute sólo lo básico de las diversas topologías. Ellas serán usadas de acuerdo a la adaptación de recursos: anillada, enmallada, estrella y completa.

### *Anillo*

Es un formato de red especialmente diseñado para interconectar los *enrutadores* a través de una sola línea "cerrada".



*Figura 33: Topología de un red a) en anillo b) interconexión de anillos*

Aunque la figura 33 (a) describe bien el diseño de anillo, esta se define como la interconexión entre todos los *enrutadores* secuencialmente, y el último está interconectado con el primero.

Cabe mencionar que si algún nodo de la red deja de funcionar, la comunicación en todo el anillo se pierde.

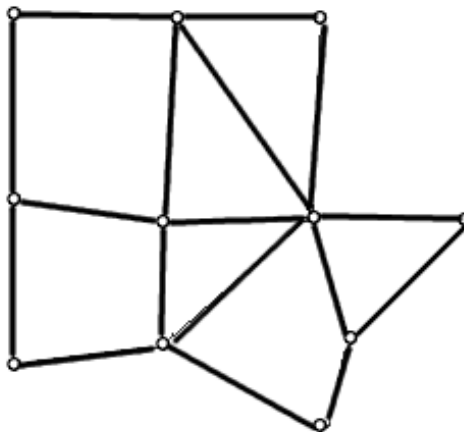
Para interconectar un anillo con otro anillo, estos se intersectan como se ve en la figura 33 (b), con este método es posible interconectar todos los anillos necesarios de una amplia red.[14]

### *Enmallado*

Es un formato de red que interconecta los *enrutadores* como una malla o matriz de puntos. La mayor característica que tiene es que los enlaces no se entrecruzan geoméricamente.

Su mayor fortaleza en comunicaciones es que si un enlace deja de funcionar, la comunicación no se pierde, sino que existen caminos alternativos por donde retransmitir la información.

Por lo general el grado de los nodos no sobrepasa 4

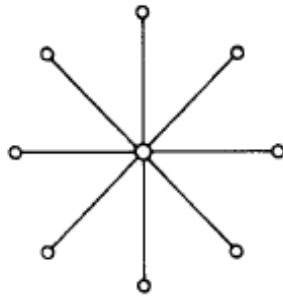


*Figura 34: Topología de una red enmallada*

### *Estrella*

Las redes en estrella, inicialmente concebidas por Bell se caracterizan por que todos los nodos (esta vez no aplicable a *enrutadores*) se interconectan directamente al nodo -llamado central- y ninguno conectado entre sí.



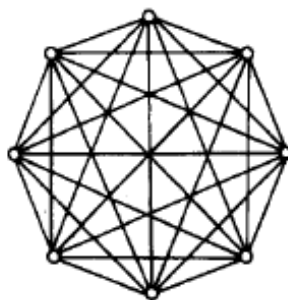


*Figura 35: Topología de una red estrella*

La red en estrella es comúnmente ocupada para interconectar los teléfonos de compañías de teléfonos, o bien, redes de computadores LAN conectados a los llamados “concentradores”. En el caso de las compañías de teléfonos, el nodo central se puede llamar, “conmutador”. [14]

### *Completa*

Formato de red que se caracteriza por que cada nodo de ella está interconectado con todo el resto de los nodos.



*Figura 36: Topología de una red completa de 8 nodos.*

En esta red no se necesitan conmutadores. Así, su costo es muy alto en interconexiones.[14]

### **5.3 Relación de los tiempos característicos con una red y aplicabilidad.**

En la práctica **hay enlaces entre los equipos de hardware, por lo que la disponibilidad se debe tanto por fallas de enlaces como de equipos.**

Se puede calcular la no-disponibilidad en función de longitudes de enlaces, y de 2 constantes que a la vez dependen del tipo geográfico *del enlace* (inter-country, international, national), para un tiempo reducido de observación. Es la llamada **indisponibilidad (UA)** que se encuentra en las recomendaciones de la norma **ETSI EN 300 416**.

Luego, es necesario tener una medida que asocie UA con un periodo de observación extendido (como por ejemplo 1 año). En este sentido se emplea la cantidad Outage Intensity (OI) que representa la cantidad de fallas que suceden en un período extendido de tiempo.

$$OI = \text{numero de fallas en el período de observación (en general de un 1 año)} \quad (4)$$

Al igual que UA, OI se encuentra de manera similar en la normativa **ETSI EN 300 416**.

UA y OI son sólo cantidades referenciales en la norma ETSI, ya que el periodo de cálculo de UA no es necesariamente extendido (extendido en el mismo sentido que OI). Para fijar ideas, los periodos de cálculo de UA y OI no son los mismos, por tanto sus cantidades no se pueden mezclar (multiplicar, sumar, dividir).

La interpretación de UA es que representa matemáticamente la probabilidad de que el enlace en cuestión (o maquinaria ya sea

conmutador, WSS, OADM) falle durante un periodo de observación, pues *es tiempo de duración de la falla partido por el tiempo total*:

$$UA = P(\text{ enlace en cuestión falle}) \tag{5}$$

Si definimos disponibilidad como la probabilidad de que el enlace no falle y la denotamos con la letra A, trivialmente se tendrá:

$$UA + A = 1 \tag{6}$$

Como probabilidad, UA puede representar eventos disyuntados entre otra UA, en particular con un siguiente enlace en la línea, por lo tanto la probabilidad de que ambos enlaces fallen será:

$$\begin{aligned} P(\{\text{enlace 1 falle } \} \text{ OR } \{\text{enlace 2 falle}\} ) &= P(\text{ enlace 1 falle}) + P(\text{ enlace 2 falle}) \\ &= UA1 + UA2 \\ \Rightarrow UA(\text{ línea}) &= UA1 + UA2 \end{aligned} \tag{7}$$

El primer miembro de la ecuación es la indisponibilidad de la línea entera, porque físicamente está constituida por dos enlaces en serie que fallarán de acuerdo a una disyunción lógica (OR). La línea fallará si uno falla, dos falla o uno y dos fallan simultáneamente, lo que representa la tabla del OR lógico, ver tabla II

OR		C1	C2	C1 OR C2
		0	0	0
		0	1	1
		1	0	1
		1	1	1

*Tabla II: Tabla lógica del OR, en la aplicación 1 representa la falla del enlace.*

Una línea compuesta de n enlaces como en la Figura 37 tendrá una indisponibilidad de:

$$UA(\text{línea de n enlaces}) = \sum U_{Ai} \tag{8}$$

Por supuesto, también se presenta la caída de enlaces en paralelo (o *switches* con líneas 1:2), pero el enfoque de multiplicación de probabilidad (AND lógico) se remitirá a un desarrollo más elaborado y con aproximaciones, que se verá en el siguiente apartado.

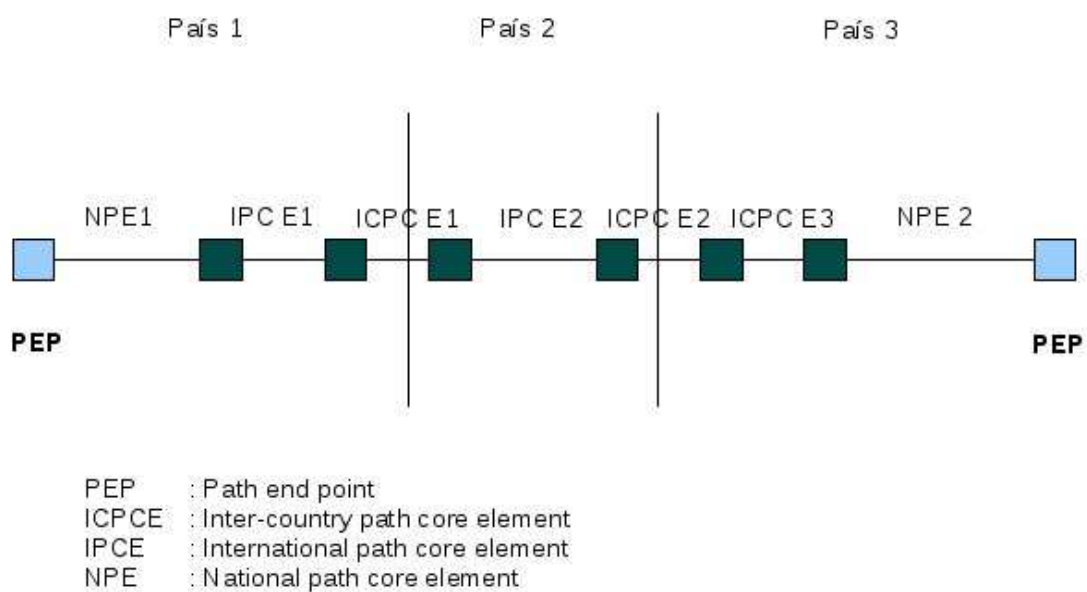


Figura 37: Línea de FFOO SDH compuesta por enlaces entre las cajas oscuras (core elements). Las cajas claras corresponden a los path end points y la línea compuesta también se puede designar como un serial de enlaces.

### 5.3.1 Base de aplicación para una red enmallada: líneas en paralelo.

Para comprender las líneas en paralelo, primero se debe considerar que las cantidades de OI (outage intensity [caidas/año]) también se suman al estar en serie (véase Figura 37):

$$OI(\text{línea de } n \text{ enlaces}) = \sum OI_i \quad (9)$$

La intuición que lo explica es que si el enlace 1 falla  $m$  veces en un año (por ejemplo 19 veces) y el enlace 2  $n$  veces al año (7 veces), implica que la línea fallará la reunión de ambos ( $m+n$ ) (26 veces) dado que las veces que fallan '1' y '2' son independientes y aditivas.

Lo que la normativa ETSI llama Topología redundante se muestra en la Figura 38 y le llamamos Líneas en paralelo.

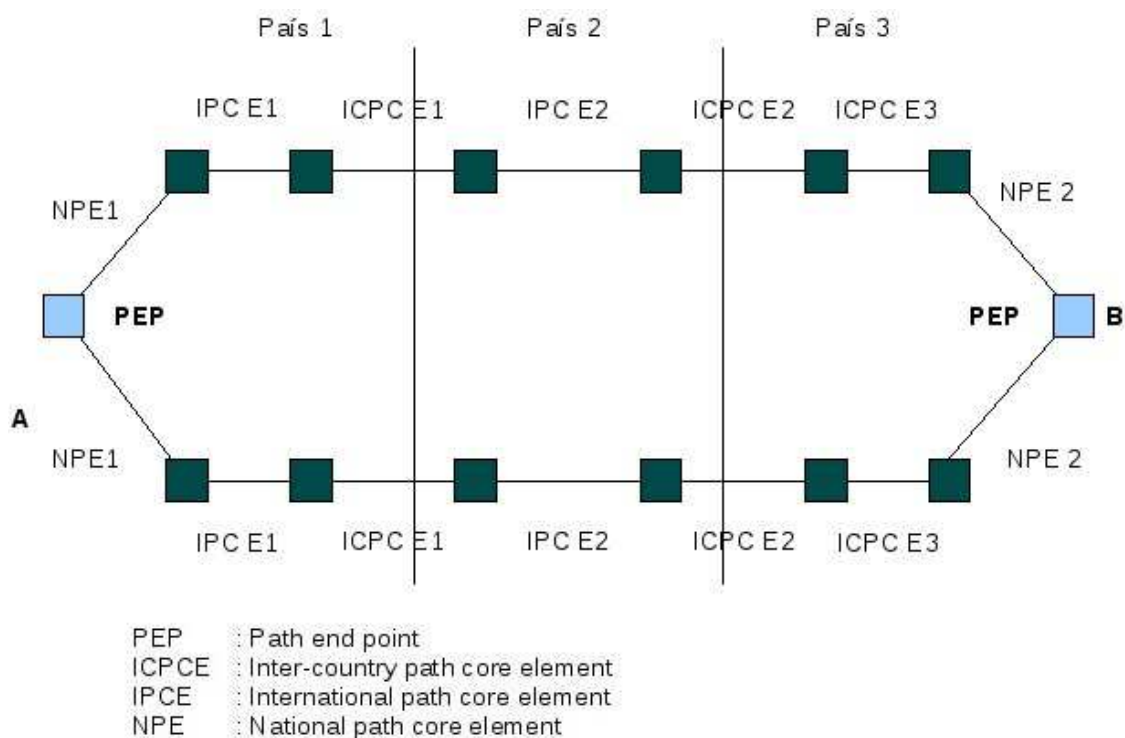


Figura 38: Línea de FFOO SDH compuesta por dos líneas interconectadas a los extremos por dos switches(cajas claras). Cada línea es una línea con enlaces en serie. La configuración se puede llamar línea en paralelo.

**Las 2 ecuaciones siguientes son parte integral de la normativa ETSI EN 300 416.**

En esta configuración y al ocupar un *switch* de protección en cada “end” (uno para cada final del extremo transmisor), la indisponibilidad del “camino con enlace respaldado 1:2” se puede calcular como:

$$U_{AB} = U_{A1} \cdot U_{A2} + U_s \quad (10)$$

Donde  $U_1$ ,  $U_2$  son las indisponibilidades de los caminos paralelos,  $U_s$  es la indisponibilidad del *switch* de protección, para una dirección.

La Indisponibilidad está dada por un AND lógico entre caminos que son alternativos. Por otro lado, la adición del “*término-switch*” a la ecuación es dada por la Indisponibilidad del *switch* calculado como función de MTBF y MTTR, que son términos entregados por el fabricante de *switchs* (o WSS's).

OI del camino “con enlace respaldado 1:2” tal como fue visto en la Figura 38 entre A y B puede obtenerse de la siguiente fórmula [16]

$$O_{Iab} = O_{I1} \cdot U_{A2} + O_{I2} \cdot U_{A1} + O_{Is} \quad (11)$$

La intuición que lo explica es un promedio ponderado por las probabilidades de caída del enlace contraparte.

$O_{I1}$  y  $O_{I2}$  son las Outages intensities de los caminos paralelos y  $O_{Is}$  es la Outage Intensity del *switch*. Nuevamente el “*término switch*” depende del fabricante.

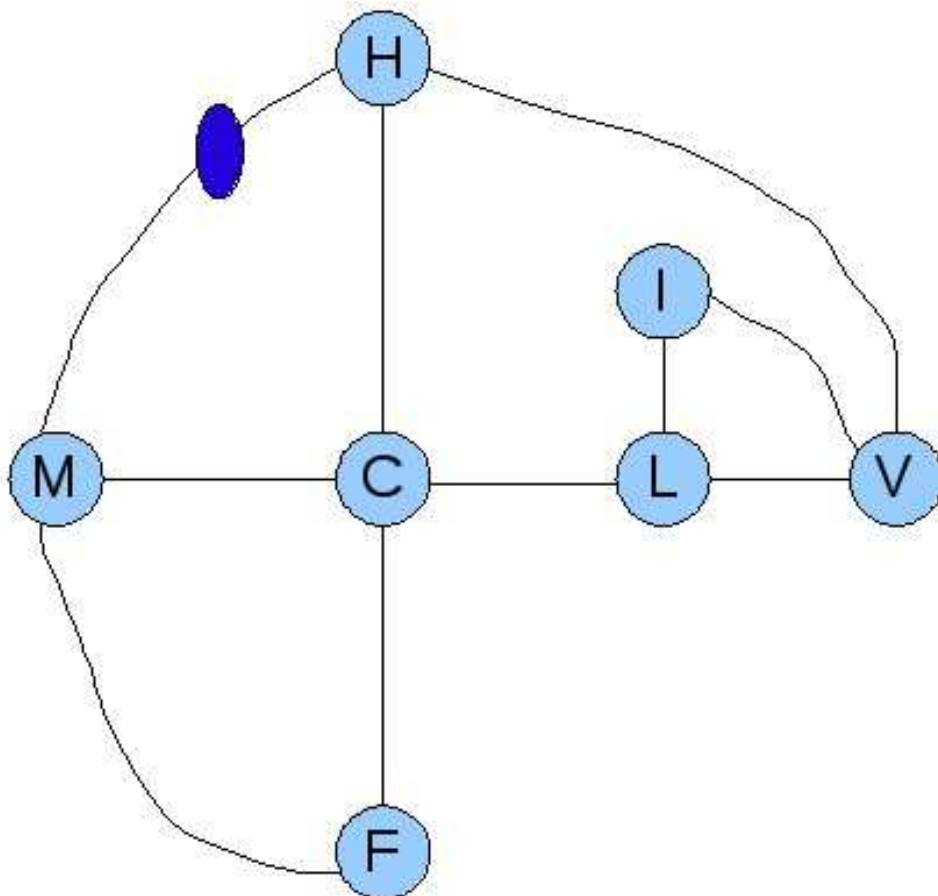
$U_1$  y  $U_2$  se pueden calcular con la suma de enlaces en serie, y lo mismo para  $O_{I1}$  y  $O_{I2}$ .

## 5.4 Ejercicio de aplicación

### 5.4.1 Diagramas de análisis para una red metro.

Esta materia se puede aplicar a una combinación de líneas en paralelo y en serie, en particular una red enmallada mediante el uso de las ecuaciones anteriores y la identificación de paralelo y serie de enlaces.

Se aprecia en la Figura 39 una red enmallada de 7 nodos con sus distancias entre nodos en tabla III. Cada nodo se puede entender como en paralelo con su adyacente interconexión



*Figura 39: Red enmallada construida a partir de combinaciones en paralelos entre líneas. Las cajas oscuras en serie en cada línea han sido omitidas, pero hay sólo dos en cada línea.*

grado máximo de nodos!= 4		
estación1	estación2	Longitud[Km]
H	M	20
H	C	20
H	V	20
H	/	N/N
C	M	15
C	H	20
C	L	10
C	F	13
F	M	17
F	C	13
F	/	N/N
F	/	N/N
M	H	13+7
M	C	15
M	F	17
M	/	N/N
V	H	20
V	I	10
V	L	10
V	/	N/N
L	I	10
L	C	10
L	V	10
L	/	N/N
I	L	10
I	V	10
I	/	N/N
I	/	N/N

N/N : no name.

Tabla III: Largos de líneas entre cada par de nodos posibles.



Además, en cada línea sólo hay un enlace; excepto en la línea MH que en serie tiene dos enlaces. Luego se tiene un complejo de líneas cuyas disponibilidades se calculan como sumas y multiplicaciones de un cálculo de indisponibilidades

UA

Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos mostrado en la Figura 40, aplicando la ecuación (10).

La disponibilidad será el complemento de la ecuación (6), resultado que, para tres caminos es aproximadamente 99% ( $U_s = 1\%$ ), para ver el detalle revisar anexo 9.2 y la sección 5.5

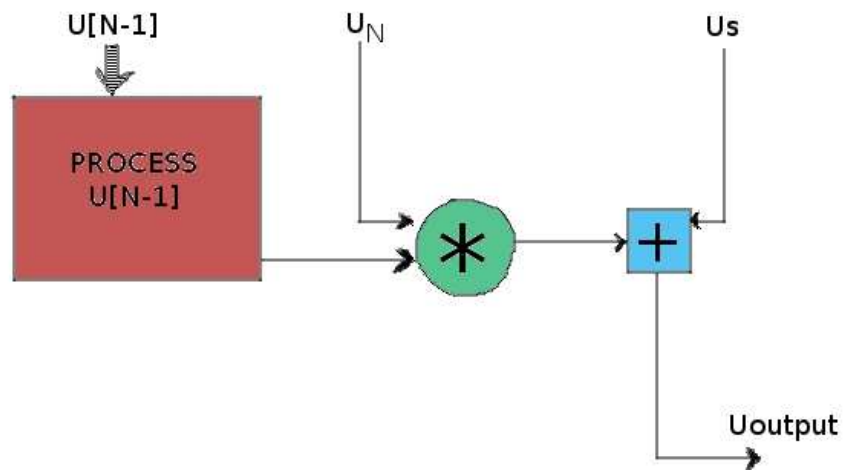


Figura 40: Algoritmo recursivo para calcular la indisponibilidad  $U_{final}$  dado un arreglo de  $U[N-1]$ . Como algoritmo recursivo la condición de finalización es  $[U_1, U_s]$  (dato).

OI

Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos en la Figura 41, aplicando la ecuación (11). Los valores que se obtienen son cercanos a 100 [outages/year] ( $O_s = 99$  [outages/year]), para ver el detalle revisar anexo 9.2 y la sección 5.5.

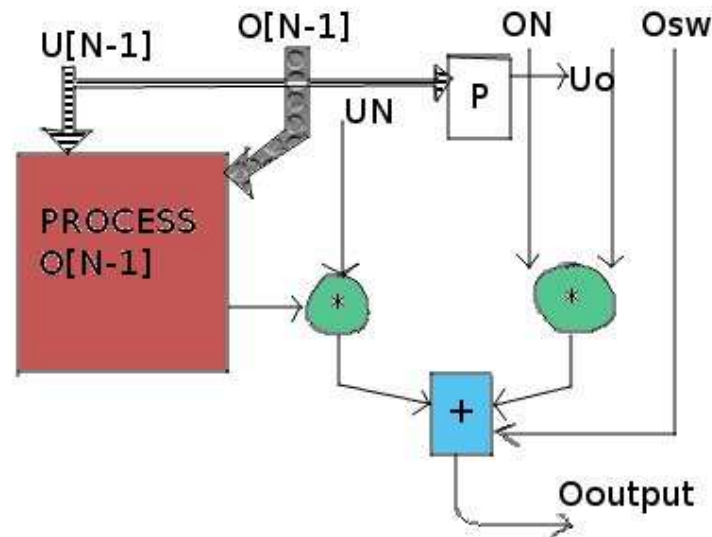


Figura 41: Algoritmo recursivo para calcular la OI final dado un arreglo de  $OI[N-1]$  y  $U[N-1]$ . La caja P es el procesamiento de la figura anterior (44)

## 5.5 Tabla de las constantes según la ETSI para enlaces de 2 Mb/s

Las mediciones mostradas en las tablas siguientes fueron hechas en enlaces de velocidad 2 Mb/s sobre SDH.

La norma ETSI contempla categorías de enlaces (o path elements) según su longitud. De acuerdo a esta inecuación:

$$500(i-1) \leq L < 500i \quad \text{donde } i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (12)$$

ETSI clasifica 5 tipos de longitudes, en intervalos de 500 Km, dentro del intervalo de 0 hasta menos de 2500 Km. Por eso cada categoría estará etiquetada con la *letra i* que será el funcional (el argumento matemático) para la inecuación (12).

Se obtendrá la indisponibilidad de cada enlace con la siguiente ecuación [16]. (j: enlace j-ésimo de la red, s: standard)

$$U_{js} = A_{js} + i * X_{js} \quad \text{CALIDAD standard} \quad (13)$$

j representa a un tipo de Camino {IPCE,NPE,ICPCE}

Donde i representa el intervalo o categoría del enlace que se puede obtener de acuerdo a la inecuación de longitud (12)

Y donde  $A_{js}$  y  $X_{js}$  se obtienen de la fila en negrilla de la tabla IV

Camino/Ruta	Nivel de ejecución	$A_j$	$X_j$
IPCE	only standard	0	15
<b>NPE</b>	<b>only standard</b>	<b>0</b>	<b>20</b>
ICPCE	only standard	0	20
NOTA:			

IPCE : International path core element

NPE : National path element

ICPCE : Inter-country path core element

Tabla IV: Parámetros para la razón de indisponibilidad, valores medios ( $\times 10^{-4}$ ) [16]

Básicamente, la ecuación (13) explica que U es función lineal (es decir, proporcional a la distancia con constante de posición [A]) de la longitud del tramo en que se enfoca.

La tabla sólo aplica la fila en negrilla, lo que no quiere decir que las demás filas sean despreciables. Por el contrario, si se quisiera diseñar una red internacional como EEUU inter Canadá; las filas 1 y 3 aplicarían. Aplicaría en el contexto de que la última fila representa a enlaces (path

core elements) “entre-países” (enlaces como dice su nombre que unen país con país 2). Se ocupan los NPE solamente porque son enlaces dentro de un solo país, en cambio IPCE e ICPCE son enlaces entre-países y fuera de país respectivamente.

$$500(i-1) \leq L < 500i \quad \text{donde } i = 1, 2, 3, 4, 5. \quad (14)$$

Análogo para la Outage Intensity -como función lineal-, se obtendrá OI de la ecuación (15) [16](j: enlace j-ésimo de la red, s: standard)

$$OI_{js} = B_{js+i} * Y_{js} \quad \text{CALIDAD standard} \quad (15)$$

Donde i representa el intervalo o categoría del enlace que se puede obtener de acuerdo a la inecuación de longitud (14)

Y  $B_{js}$  e  $Y_{js}$  se obtienen de la tabla V, fila en negrilla.

Camino/Ruta	Nivel de ejecución	$B_j$	$Y_j$
IPCE	only standard	30	20
<b>NPE</b>	<b>only standard</b>	<b>57</b>	<b>42</b>
ICPCE	only standard	18	13
NOTA:			

IPCE : International path core element  
 NPE : National path element  
 ICPCE : Inter-country path core element

Tabla V: Parámetros para Outage intensity, valores medios [outages /year][16]

Los valores referidos son valores medios de UA y OI.

La tabla VI muestra el tiempo (en días, horas, minutos, segundos) que un sistema está indisponible versus la Disponibilidad que por lo demás es esperada. La cantidad de nueves es el funcional clave para hacer una tabla Disponibilidad versus Tiempo indisponible de dicho sistema.

<b>Disponibilidad</b>	<b>Tiempo fallado</b>
90% (1-nueve)	36.5 días/año
99% (2-nueves)	3.65 días/año
99.9% (3-nueves)	8.76 horas/año
99.99% (4-nueves)	52 minutos/año
99.999% (5-nueves)	5 minutos/año
99.9999% (6-nueves)	31 segundos/año

tabla VI: Disponibilidad del sistema versus Tiempo fallado de acuerdo a la notación de número de nueves (9).

## **5.6 Adaptación del problema desde enlaces de 2 Mb/s hacia enlaces de 2,5 y 10 GIGAb/s**

Como se mencionó en la sección 5.5, las ecuaciones (13), (15) y por lo tanto todas las de probabilidad sólo eran válidas para enlaces SDH de 2Mb/s (la norma en que se basan las ecuaciones es del año 1998), es por eso que se adaptará el problema antiguo a las nuevas necesidades de velocidad como lo son las nuevas interfaces de 2,5Gb/s y 10Gb/s llamadas STM-16 y STM-64 respectivamente.

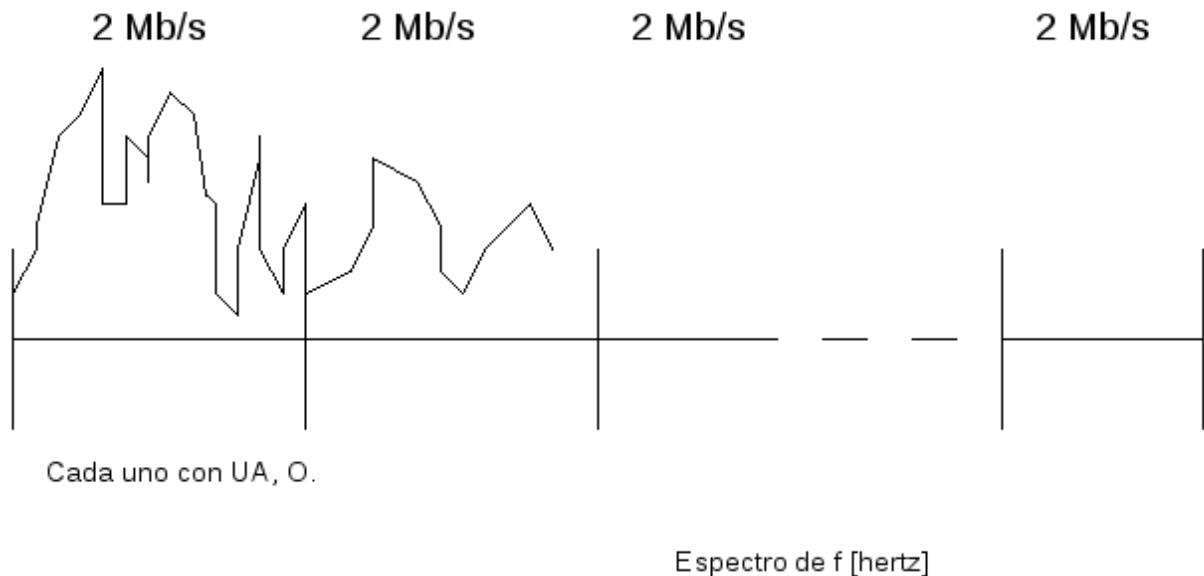
### **5.6.1 Las tramas de 2Mb/s en las tramas del orden de Gb/s**

Antiguamente, SDH tenía como velocidad base 2Mb/s, estándar también compatible con la telefonía que utilizaba tramas E1 con tecnología TDM y a su vez poder transmitir alta cantidad de información como Internet y Video (múltiplos de 155 Mb/s). Era un tiempo en que la convergencia de servicios no era posible pero no improbable, dadas las restricciones de canales de aquella época, pero actualmente sí se puede realizar esta convergencia y, más que nada, el propósito aquí es ilustrar la relación que tienen las tramas de 2Mb/s con las tramas del orden del Gigabit.

Como se ve en la Figura 42, los espectros frecuenciales de las tramas STM-16 y STM-64 abarcan muchos canales de 2Mb/s en múltiplos

exactos, cada trama STM contiene n canales 2Mbps sin error alguno. Es decir, se componen las tramas STM's con simples enlaces de 2Mb/s.

Cada canal tiene una indisponibilidad UA según el antiguo modelo de la ETSI, cada canal de 2Mb/s se le puede asociar una indisponibilidad y una Outage intensity.



*Figura 42: espectro de frecuencias de la trama STM-n en base a tramas de 2Mbps. Estas últimas dividen exactamente las tramas STM-16 y 64*

Luego hay  $2500/2=1250$  canales E1 en STM-16 y  $10000/2=5000$  canales E1 en STM-64.

Los WSS captan las señales en sus terminales y envían la información, de manera segmentada como TDM y en espectros de lambda desordenados, entonces se puede modelar una interfaz STM con los enlaces de 2Mb/s en paralelo (o respaldos) siendo sus terminales comunes los terminales de la interfaz STM: A y B, como se muestra en la Figura 43

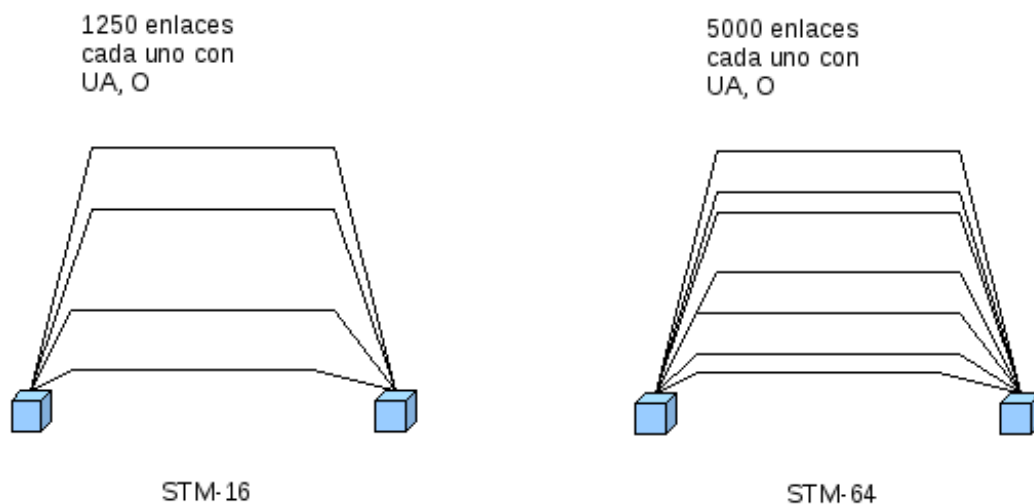


Figura 44:

Figura 43: Modelo de las tramas STM-16 y 64 al componerlas por un número exacto de tramas de 2Mb/s.

Además, otro argumento que apoya esta modelación es que si falla un segmento de la línea STM, por ejemplo el canal 50 de 2Mb/s, la línea entera no falla y su información será respaldada por el resto de los enlaces, modelación característica de las líneas en paralelo.

Si en el modelo de un STM respaldado falla el “subenlace” 1, entonces se pierden durante cierto tiempo 2Mb/s de flujo, sin embargo en los momentos venideros la señal 1 pasará por otro de los canales restantes (o su respaldo) pues se han perdido y deben reenviarse. Finalmente, en el end-point (B), se reordenarán las corrientes 1,2,3,4,5 y 6 que pasaron durante la falla del “subenlace” 1 para que lleguen a su destino por una red de Telefonía o de xDSL.

### 5.6.2 Ecuación que modela las tramas STM de 2,5 y 10 Gb/s

Según la Figura 43 y ocupando la ecuación (10), se llega a que la UA de un circuito STM-m  $m=16,64$  es:

$$UA_{ab} = UA^n \quad (16)$$

Donde UA es la indisponibilidad calculada según la norma ETSI, n la cantidad de tramas de 2Mb/s.

Para obtener la ecuación para Olab se necesita más desarrollo. Ocupando la ecuación (11) para circuitos paralelos:

1. dos tramas 2Mb/s  $O_{Iab} = UA \cdot (OI1 + OI2)$
2. tres tramas 2Mb/s  $O_{Iab} = UA^2 \cdot (OI1 + OI2 + OI3)$
3. cuatro tramas 2Mb/s  $O_{Iab} = UA^3 \cdot (OI1 + OI2 + OI3 + OI4)$
4. cinco tramas 2Mb/s  $O_{Iab} = UA^4 \cdot (OI1 + OI2 + OI3 + OI4 + OI5)$

al identificar que el patrón es el incremento del exponente del primer factor, y el incremento de un sumando OI en el segundo factor se llega a una fórmula inductiva a la que añadiremos esta condición:  $OI_i = OI$ , llegando finalmente a la fórmula de Olab para enlaces STM-m  $m=16,64$ :

$$O_{Iab} = UA^{n-1} \cdot OI \cdot n \quad (17)$$

indica ésta que la intensidad de fallas en la fórmula prevalece UA sobre el término OI ( $\sim 10^{-4}$ ) por su pequeñez.

### 5.6.3 Aplicación a red de 7 nodos

Se procederá a implementar el procedimiento de integración STM-m  $m=16,64$  a una red de 7 nodos. Este caso interesa a Entel para reconfigurar la red SDH actual.

El primer caso será la red de la Figura 39 con enlaces sólo de STM-16 (2,5Gb)

El segundo caso será la red con enlaces sólo de STM-64 (10 Gb)

#### Primer caso

UA

Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos que se muestra en la Figura 44, que aplica la ecuación (10) y (16), con  $n=1250$ . En esta figura se observa que se ha aplicado como entrada  $U_N^n$  debido a la ya dicha composición en paralelo de los enlaces entre A y B.



La disponibilidad será el complemento de la ecuación (6), resultado que, para tres caminos es aproximadamente 99,99% ( $U_s = 1\%$ ), para ver el detalle revisar anexo 9.3 y la sección 5.5.

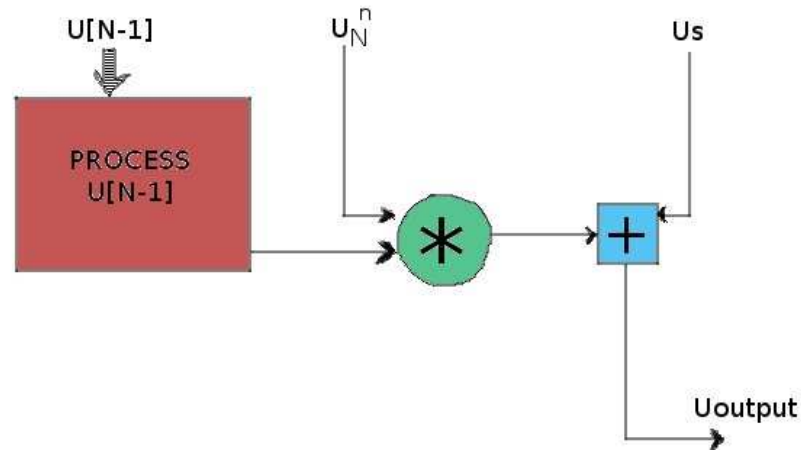


Figura 44: Algoritmo recursivo para calcular la indisponibilidad  $U_{final}$  dado un arreglo de  $U[N-1]$ . Como algoritmo recursivo la condición de finalización es  $[U_1^n, U_s]$  (dato).

OI

Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos en la Figura 45, que aplica la ecuación (11) y (17). Nuevamente,  $ON(STM-16/64)$  es el término OI que aparece por la composición en paralelo de los enlaces STM. Los valores que se obtienen son 99 [outages/year] ( $O_s = 99$ [outages/year]), para ver el detalle revisar anexo 9.3 y la sección 5.5

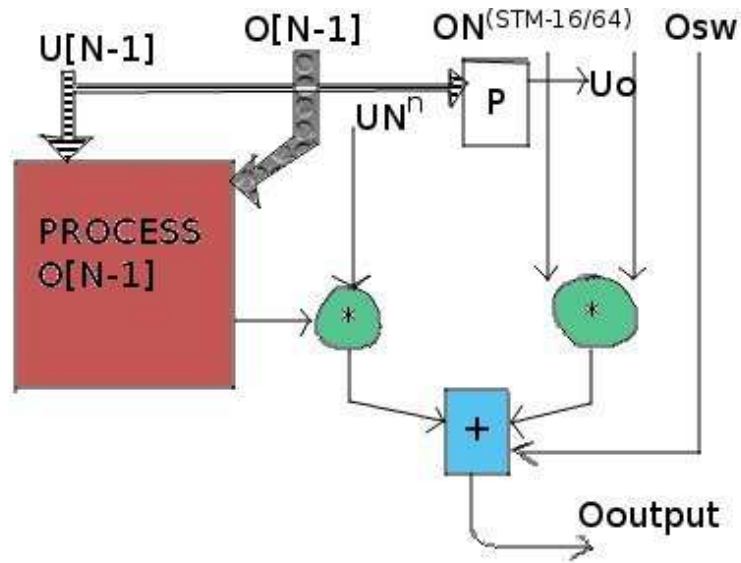


Figura 45: Algoritmo recursivo para calcular la  $O_{final}$  dado un arreglo de  $O[N-1]$  y  $U[N-1]$ . La caja P es el procesamiento de la figura anterior (49). Las condiciones de finalización son  $[O1(STM-16), O2(STM-16), U1^n, U2^n, Usw, Osw]$ .

## Segundo caso

UA

Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos que se muestra en la Figura 44 con  $n = 5000$ . En esta figura se observa que se ha aplicado como entrada  $U_N^n$  debido a la ya dicha composición en paralelo de los enlaces entre A y B.

La disponibilidad será el complemento de la ecuación (6), resultado que, para tres caminos es aproximadamente 99,99% ( $U_s = 1\%$ ), para ver el detalle revisar anexo 9.3 y la sección 5.5.

OI

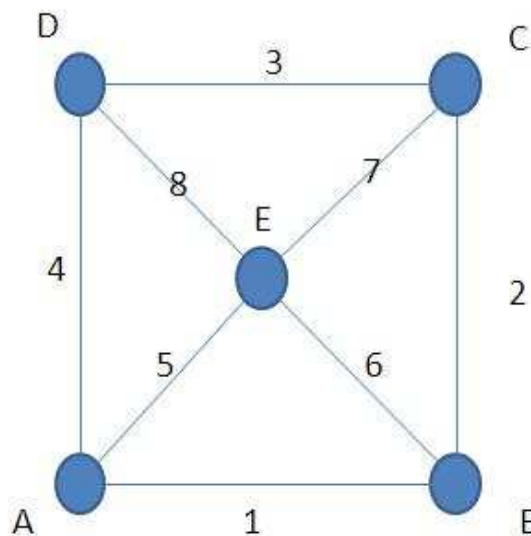
Para proceder a calcular la indisponibilidad de la red se usa el diagrama de flujos en la Figura 45 con  $n=5000$ . Nuevamente,  $ON(STM-16/64)$  es el término OI que aparece por la composición en paralelo de los enlaces STM. Los valores que se obtienen son 99 [outages/year] ( $O_s = 99[\text{outages/year}]$ ), para ver el detalle revisar anexo 9.3 y la sección 5.5.

## 6 Técnica heurística para resolución de red.

En el presente capítulo se resolverá una red completamente enmallada con una técnica que permitirá llegar a una solución aproximada en tiempo de ejecución y sin hacer sacrificios mayores en su estructura.

### 6.1 Presentación inicial y primer intento de aplicación en red.

El problema consiste en definir la disponibilidad en una red grande (5 nodos) y luego ver qué sucede si se eleva el número de nodos (sube/baja la disponibilidad). Este objetivo es abordado inicialmente por la siguiente red de 5 nodos en la Figura 46.



*Figura 46: Red de experimento, que tiene por nodos los indicados por las letras y tiene por enlaces los indicados por números.*

El objetivo será calcular la indisponibilidad de la red dado que uno o más enlaces están fallados. El (los) enlace(s) fallado(s) y los(el) enlaces sanos componen el *ESTADO DEL SISTEMA*<sup>1</sup>. Lo más importante es determinar la indisponibilidad para todo tiempo (t), puesto que ésta varía en el

<sup>1</sup> El estado del sistema depende del estado del enlace. Este puede ser:

- fallado = 1
- sano = 0.

tiempo y no es realista determinarla para una fecha dada. Se hará el supuesto que se poseen **infinitos recursos de Ancho de Banda**.

La indisponibilidad de la red se calculará por supuesto con la normativa ETSI vista en el capítulo anterior. Para esto se determinarán dos puntos /nodos de red que permitirán determinarla provisoriamente. [21]

El primer paso será describir todos los estados posibles. Para la red de la Figura 46 la cantidad de enlaces se denota con  $n$ , y en este caso  $n=8$ . La cantidad de estados de sistema posibles (con estados 1 y 0) es entonces  $2^n = 2^8$ .

Se tendrá una tabla de tamaño 256. Una pequeña parte de la tabla es mostrada en la tabla VII. La tabla contiene TODOS los estados de la red (para variación de disponibilidad por causa de los enlaces).

0 enlace      no fallado  
1 enlace      Fallado

E°	enl	enl	enl	enl	enl	enl	enl	enl
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1
8	1	0	0	0	0	0	0	1
9	1	0	1	0	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	0	0	0

Tabla VII: Parte de la tabla de estados posibles del sistema. Se puede apreciar que hay fallas simples (1 falla simultánea) y fallas dobles (2 fallas simultáneas). La tabla original tiene 256 filas en lugar de 10.

Nota: Las tablas tienen filas y columnas variables en dependencia de la relación  $2^n = R$  si  $n$  es la cantidad de columnas, entonces  $R$  es la cantidad de filas. Estas se llaman *registros*.

Como se muestra en la tabla anterior, la primera columna presenta números en orden ascendente que cambian de contador cuando se pasa de una falla simple a una falla doble, es decir, a un grado de falla mayor. Para una falla simple el número de registros es 8, para una falla doble el número de registros es 28 ¿cuántos registros tiene la falla triple, y la cuádruple y la quíntuple? Para esto se usará la siguiente fórmula de combinatorias:

$$C_k^n = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad (18)$$

La cantidad de estados para  $n$  enlaces sobre grupos de  $k$  fallas simultáneas se calcula con la fórmula de arriba. Entonces, la falla de grado 3 tiene  $8!/(8-3)!3! = 56$  registros.

El segundo paso será calcular las probabilidades que se presenten en cualquier estado de red entre los nodos A y E. La probabilidad de falla del enlace 1, la probabilidad de falla del enlace 2, la probabilidad de falla del enlace 3, la probabilidad de falla del enlace 4,..., luego la probabilidad de falla del enlace 1 y 2, la probabilidad de falla del enlace 2 y 3, la probabilidad de falla del enlace 3 y 4,..., luego la probabilidad de falla del enlace 1, 2 y 3,... y así sucesivamente. El cálculo, basado en la normativa ETSI (ver sección 5.5), para una falla simple del enlace 1 se presenta en la Figura 47.

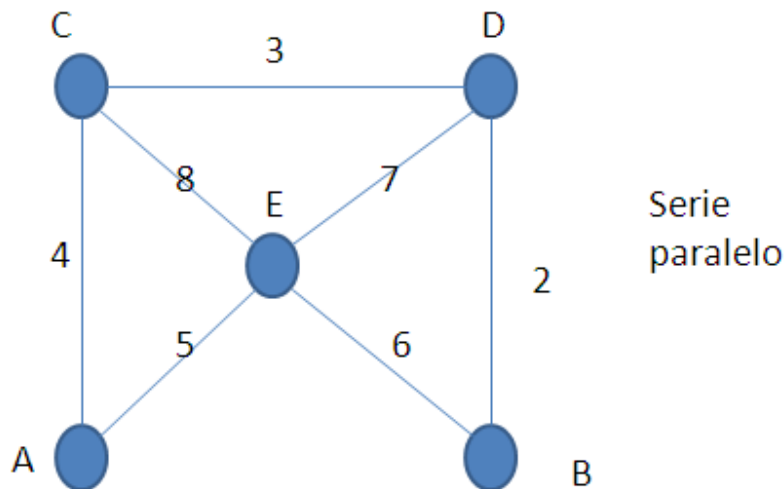


Figura 47: Red experimental, dado que ha fallado el enlace 1 (entre A y B). La disponibilidad a calcularle es entre los nodos A y E.

La fórmula que representa la reducción serie-paralelo de la red de la Figura 47 es la siguiente:

$$U_{ae} = enl5 + [enl4 + enl8 // (enl3 + enl7 // (enl2 + enl6))] \quad (19)$$

Donde  $U_{ae}$  es la indisponibilidad entre los puntos A y E,  $enl\ i$  es la indisponibilidad del enlace  $i$ , y donde  $//$  es un símbolo que refiere a la reducción en paralelo entre dos elementos de red.

Para evaluar esta fórmula se hace un trabajo mayor: sabemos que la indisponibilidad es función de la longitud de los enlaces de fibra óptica, por eso aplicaremos primero la expresión (3), de la sección 5.1.3.

La expresión tiene dos términos: MTBF y MTTR. Si suponemos que se posee una buena distribución de repuestos y todo problema se puede arreglar tan-bueno-como-esté-nuevo, entonces puede considerarse MTTR como una cantidad constante.

En cambio, MTBF depende de la distancia entre nodos, esto sucede porque las fallas están distribuidas homogéneamente por kilómetro de fibra. Es por esto que se hace uso de la fórmula que expresa la cantidad de horas media entre fallas por kilómetro, ésta es la siguiente:[18]

$$\begin{aligned} m_{tbf} &= 2000[h / km] \\ MTBF &= m_{tbf} \cdot d \end{aligned} \quad (20)$$

El tiempo medio de reparación:

$$MTTR = 12[h]$$

(21)

Evaluando en la expresión (3) con (20) y (21), y aplicando la ecuación  $U=1-A$ , se puede obtener el valor de la indisponibilidad de la red (en (19)):

$$U_{ae} = 0,0000001$$

Se ocupó la tabla VIII para evaluar las distancias entre nodos.

enlace	longitud[Km]
1	40
2	20
3	40
4	20
5	20
6	10
7	20
8	10

Tabla VIII: Longitudes para cada enlace de fibra óptica.

El cálculo para cada estado de la red como se puede es laborioso, considerando que se tratan de 256 registros. De todas maneras, se muestra este cálculo para los primeros 18 registros en la tabla IX.

Importante notar que los eventos que definen los estados de la matriz se suponen **Mutualmente Excluyentes entre sí**.

0 enlace      no fallado  
 1 enlace      Fallado

E°	enl 1	enl 2	enl 3	enl 4	enl 5	enl 6	enl 7	enl 8	PROBB.
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0000001
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0,0003005
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0000001
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0,0003003
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0	0	0	0,00015
5	0	0	0	0	1	1	0	0	0,0004502
6	0	0	0	0	0	1	1	0	0,00000027
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0,00000023
8	1	0	0	0	0	0	0	1	0,00000027
9	1	0	1	0	0	0	0	0	0,0000003
10	0	1	0	1	0	0	0	0	0,0000002

Tabla IX: Parte de la tabla de estados posibles del sistema. En ella se puede apreciar los cálculos en la última columna de probabilidad de estado (Ejemplo, [10000000] P=P1=0,0000001).

Como se dijo anteriormente, la tabla contiene todos los estados posibles, inclusive el estado [ 00000000 ], el cual calcula la disponibilidad de la red. Su cálculo se hace al hacer 1 menos la suma de las probabilidades de los “estados fallados”.

El problema de este método es que realizarlo en tiempo de ejecución, con planillas Excel, no es posible. El extenso tiempo de cálculos lo hace imposible e inmanejable matemáticamente hablando, puesto que si la red aumenta en nodos, entonces aumenta en enlaces (y los registros aumentan exponencialmente en base 2), entonces aumenta la complejidad algorítmica del problema. Se hace necesaria así una técnica más heurística para resolver de manera más directa el problema.

Las heurísticas a emplear serán básicamente la reducción de estados del sistema a una cantidad manejable. Por otro lado se hace notar, que en el



proceso de determinar el método a emplear se recurrieron las siguientes alternativas:

- **Método de Máxima Verosimilitud con una sólo matriz de transición de estados.** Determinar la matriz de transición de estados de Markov (como se verá más adelante) con simulación computacional y estimación estadística con Máxima Verosimilitud.
- **Método de determinación por definición directa de la matriz de transición de estados.** Determinar la matriz de transición de estados (de Markov) por definición usando probabilidades condicionales.
- **Uso directo de 3 estados más 1 Estado Cero.** Como se verá más adelante, usar 3 Estados F que se traducen en 9 estados y aplicar las cadenas de Markov con el método por describir provee excelentes resultados. No así ocupar 3 estados simples, pues no provee resultados fiables.

Lamentablemente, ninguna de las 3 heurísticas anteriores provee resultados fiables para efectos del estudio, por lo que se optará en las siguientes secciones a describir la heurística exitosa.

## 6.2 Resolución del problema con heurísticas

**Heurística.** Se puede definir como “habilitación de una persona a descubrir o entender algo por sí mismo”. En un contexto más computacional sería el “procedimiento de llegar a una solución en base a ensayo y error o por reglas no rigurosas”[17]

La heurística será la técnica a usar para formalizar el problema y llegar a una solución cercana a la solución de verdad, la que arroja el algoritmo original. El objetivo será aproximar la heurística a la Disponibilidad real.

La discusión abarcará un aumento en el número de nodos, y cómo eso afecta a la cantidad denominada Disponibilidad Aproximada (es decir, si aumenta o disminuye).

### 6.2.1 Nuevas restricciones al problema

- 1) Cuando el conjunto universo de posibles eventos aumente, aumentarán al mismo tiempo las probabilidades de estado  $P$ :  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  en dependencia de los enlaces que tiene cada nodo.
- 2) La heurística contemplará el resolver parte del problema total que será acotado en los puntos 3) y 4). Esto es coherente con la definición de heurística.
- 3) Toda red será un problema dividido, donde se calculará la probabilidad de estado  $P_i$ 
  - a. En toda red se necesitará dejar de buscar la probabilidad de estado  $P_i$  para los  $i \geq 4$ . Esto es, no buscar probabilidades de falla de más de cuatro enlaces fallados.
  - b.  $i=1$  falla de 1 enlace,  $i=2$  falla de 2 enlaces,  $i=3$  falla de 3 enlaces, ...
  - c. En toda red, y aprovechando que se hace el proceso de modelamiento y diseño al mismo tiempo, se forzará a que todos los nodos no tengan más de 4 enlaces de salida y no menos de 2 enlaces de salida inclusive. Esto se hace uniendo caminos redundantes.
- 4) Calcular la disponibilidad total para el estado de mínima probabilidad, para el de máxima, y asumiendo que las

probabilidades se distribuyen como una Normal, para el de probabilidad media.

- 5) El proceso de ensayo y error sucederá de esta forma: si  $DISPO_{real} > DISPO$  ( $DISPO_{real}$  medida con equipos reales), entonces se cambiarán las restricciones de la heurística; sino, se aceptará el modelo.

Detallemos el punto 4. Se supone que, dada la topología de la red, existe un mínimo de indisponibilidad en un grupo (de estados) con igual grado de falla. Lo mismo existe para la máxima. Si se tiene la hipótesis que los valores se distribuyen como una Normal, y la varianza no es muy amplia, entonces podemos quedarnos con los valores de la máxima, la mínima y la media de la probabilidad de estado, tomando de esta forma 3 representantes de estados de igual grado de falla. A esta "escala" le llamamos soltura de una falla. Esto se puede apreciar mejor en la Figura 48.

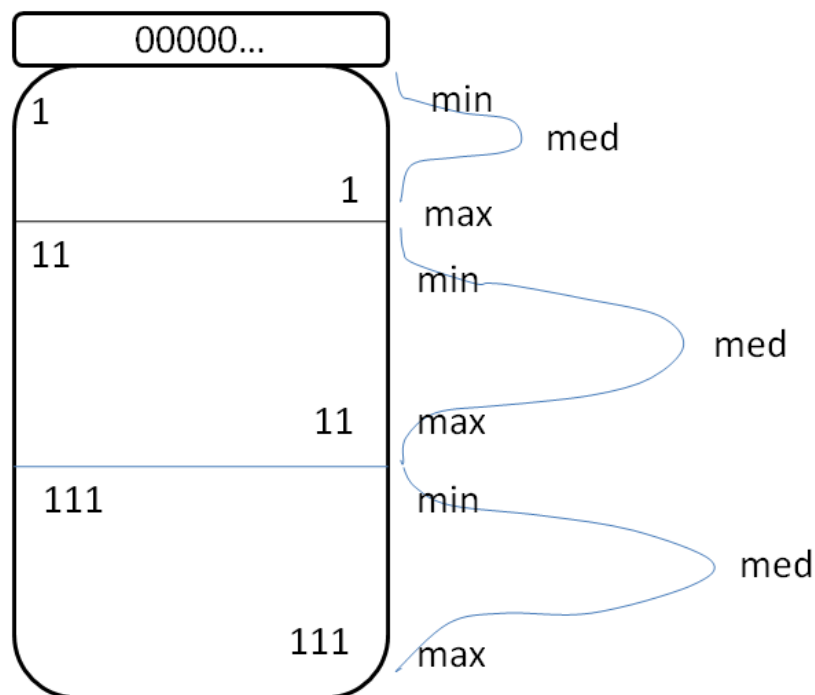


Figura 48: Tabla de estados con división para cada grado de falla.

Otro punto importante a detallar es el punto 3. Este dice lo siguiente: si usted se fija en la tabla segunda notará que a mayor grado de la falla, menor son las probabilidades de falla (los valores de grado 2 son menores que los de grado 1, los valores de grado 3 son menores que los

valores de grado 2). Esto llega a un extremo con la falla de grado 4, en que sus valores de probabilidad son muchos menores que los de grados 3, interpretándose como si fuera muy difícil la ocurrencia de esta falla (grado 4) en la red, lo mismo sucede con los estados de falla de grados mayor a 4. Luego se opta por no incluirlos en la tabla. Esto se aprecia mejor en el diagrama de conjuntos de la Figura 49

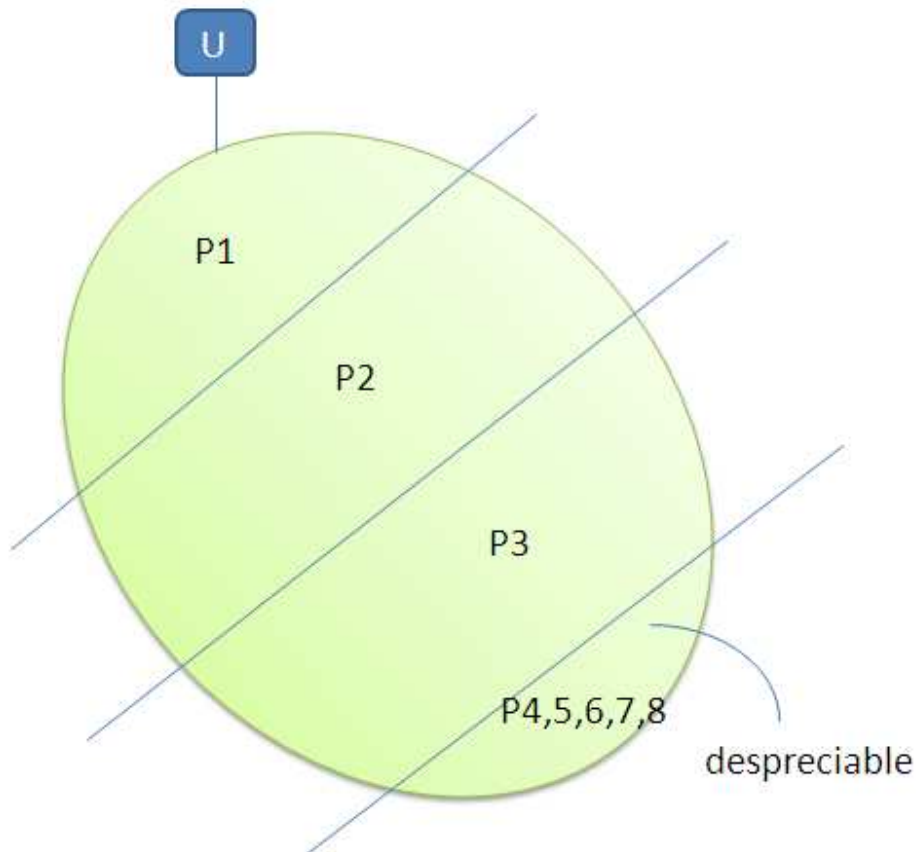


Figura 49: Conjunto de eventos según grado de la falla  $P1, P2, P3, P4...$

## 6.2.2 La función de densidad Weibull

La distribución Weibull servirá para modelar la fdp (función densidad de probabilidad) de la red entera, consistente de una variable aleatoria tiempo 't' que es la duración total de la falla en el sistema.

### 6.2.2.1 Introducción al objeto matemático Weibull

La distribución Weibull es una función de densidad de probabilidad caracterizada por:

- Ser continua
- Tener dos parámetros, uno de forma y otro de escala
- Ser de la misma “naturaleza” que la Exponencial.

La fdp Weibull está definida por la variable aleatoria tiempo de ocurrencia del hito t:

$$f(t) = \frac{k}{\lambda} \left( \frac{t}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-(t/\lambda)^k} \quad \text{Para } t > 0 \quad (22)$$

Como se observa en la ecuación (22), Weibull posee dos parámetros  $k > 0$  es el parámetro de forma y  $\lambda > 0$  es el parámetro de escala de la distribución. El primero es un parámetro que altera la forma funcional de la fdp Weibull, como se verá más adelante.

Una propiedad importante es que la función probabilidad acumulada de la Weibull es la siguiente:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\lambda)^k} \quad (23)$$

La fdp Weibull se grafica de distintas formas dependiendo de sus parámetros, estos se aprecian en la Figura 50

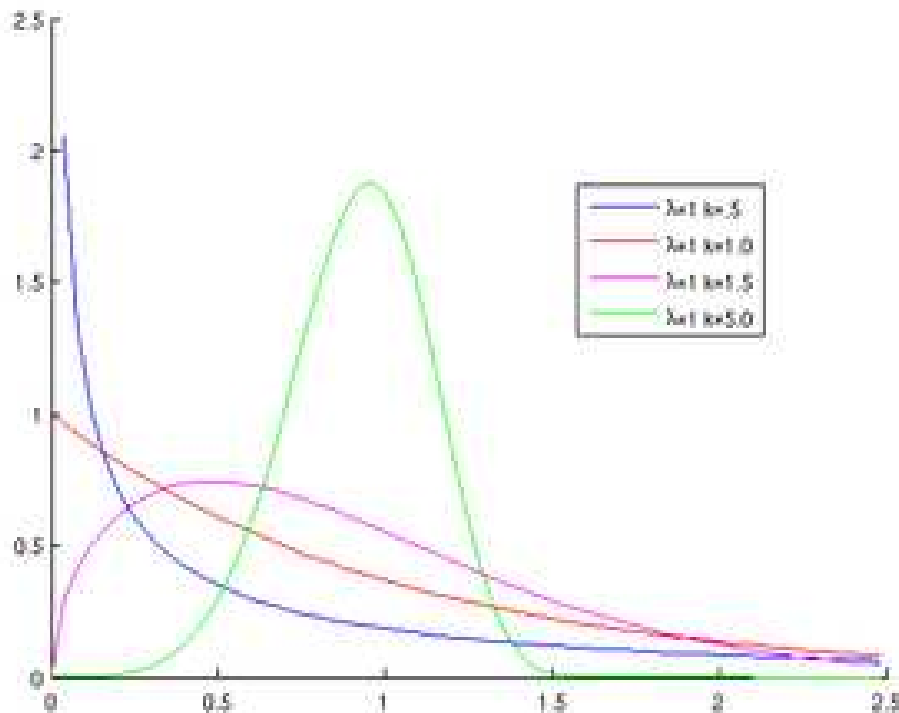


Figura 50: FDP Weibull para parámetros de escala constante, y parámetros de forma variable.

Finalmente, la distribución Weibull describe una familia de distribuciones que, desde el punto de vista de la matemática aplicada es útil por su flexibilidad (puede representar distribuciones Normales, Exponenciales o incluso Planares ( $k < 1$  Ejemplo  $k = 0,5$ ) en una sólo función).

### 6.2.2.2 Aplicaciones de la fdp Weibull

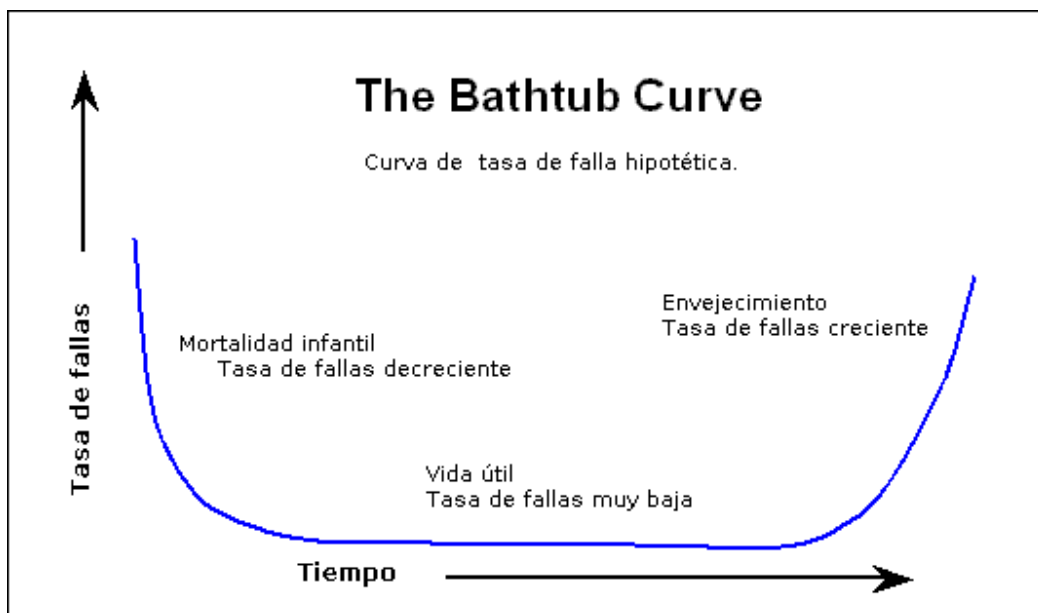
Weibull como distribución estaría asociado al uso de grandes equipos complejos y con cierto grado de sofisticación, como por ejemplo grandes tractores, aviones o sistemas distribuidos (redes), los cuales tienen una probabilidad de fallar debido a factores internos, así como fallas de operación.

La interpretación de la variable tiempo  $t$ , es que es la duración total de las fallas en el sistema (la duración es al azar).

Según la ecuación (22), el valor de  $k$  puede ser interpretado directamente como sigue:

- $K < 1$  indica que la tasa de fallas decrece con el tiempo. Esto sucede sólo si hay una “mortalidad infantil” significativa, o ítems defectuosos que fallan tempranamente y la tasa de fallas decrece con el tiempo ya que los ítems defectuosos son eliminados de la población.[19]
- $K = 1$  indica que la tasa de falla es constante con el tiempo. Esto podría sugerir eventos externos aleatorios que están causando mortalidad, o falla[19]
- $K > 1$  indica que la tasa de fallas incrementa con el tiempo. Esto sucede si hay un proceso de envejecimiento, o partes que son más propensas a fallar a medida que el tiempo pasa.[19]

La idea central de la fdp Weibull es poder construir a partir sus 3 “zonas” (3 zonas según el valor de  $k$ :  $<1, =1, >1$ ) la “curva de la bañera”, lo que se podrá hacer aplicando un algoritmo que avance en el tiempo de la Disponibilidad, mediante ciertas hipótesis.



*Figura 51: Curva de la bañera como composición de las 3 funciones Weibull's.*

La obtención de la curva de la bañera implica tener la evolución del sistema (la red en este caso) a lo largo de extensos periodos de tiempo (de 1 a 10 años) mediante un objeto matemático (fdp) que se interpreta estadísticamente como la frecuencia de fallas del sistema, dado que la interpretación frecuentista de las probabilidades aplica en este ámbito. Es así como nace la necesidad de obtener la fdp Weibull mediante la inspección de la Tasa de Fallas (en la Figura 51).

### 6.2.2.3 Weibull aplicado

Cada tiempo del eje horizontal tiene un punto en el eje vertical, punto el cual está asociado a algún parámetro de la tabla IX.

Una tabla equivaldría a una fecha de la Weibull, cada tabla construye las distintas tasas de fallas de la fdp Weibull.

La tasa de fallas se define como sigue[20]

$$\lambda(t) = \frac{1}{MTBF} = \frac{1-A}{MTTR} \quad (24)$$

La expresión a la derecha se obtiene aplicando argumentos de la ecuación (3). La tasa de fallas recientemente definida constituye la construcción de la “curva de la bañera” pues es la ordenada de la curva y el tiempo de fallas es la abscisa. De esta manera se piensa construir una curva tasa de fallas versus tiempo (de duración de las fallas) con el objetivo de tener la disponibilidad para todo tiempo con un horizonte de 10 años (87600 horas). La teoría escogida para hacer avanzar en el tiempo a la tabla, y por consiguiente a la tasa de fallas, es la cadena de Markov (ver anexo 9.5). Su propiedad que básicamente dice que el proceso estocástico tiene memoria, o bien que un hecho en el presente depende del hecho justamente pasado, servirá para comprobar la hipótesis principal que la tasa de fallas describe una “curva de la bañera”.



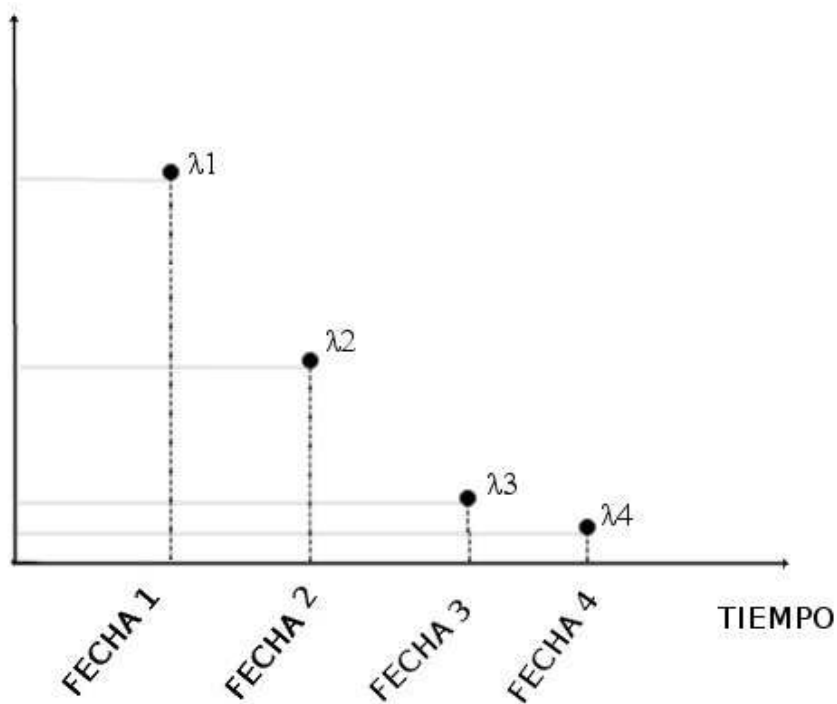


Figura 52: El gráfico presenta la tasa de fallas para cada fecha en que se produce la tabla reducida.

### 6.2.3 Metodología.

Se seguirá una metodología dividida en 6 pasos iterativos, y basados en la heurística que se explicó en la sección 6.2.1. Estos pasos se detallan a continuación. El diagrama como se organizan se muestra en la Figura 53.

- **Red.** Se plantea el modelo topológico de la red, donde se detallan las longitudes de la fibra óptica entre cada nodo.
- **Tabla.** Se escribe la tabla con todos los estados del sistema. Como usted se dará cuenta, derivar toda la tabla no es aplicable dado su gran tamaño y debe ser reducida.
- **Heurística.** Esta considera reducir la tabla como se especificó en la sección 6.2.1, así como considerar sólo los tres representantes de estado de igual grado, debido a las diferentes longitudes entre enlaces.
- **Hipótesis.** Plantear y llevar a ecuaciones las hipótesis que más adelante se verán, para conseguir llegar a la “curva de la bañera” de envejecimiento del sistema.

- **Markov.** Aplicación de las cadenas de Markov para que, dada una tasa de fallas inicial, se avance en el tiempo y se visualice la variación de la tasa de fallas.
- **Ajuste.** ¿Se ajusta la tasa de fallas al modelo de Weibull o no?.

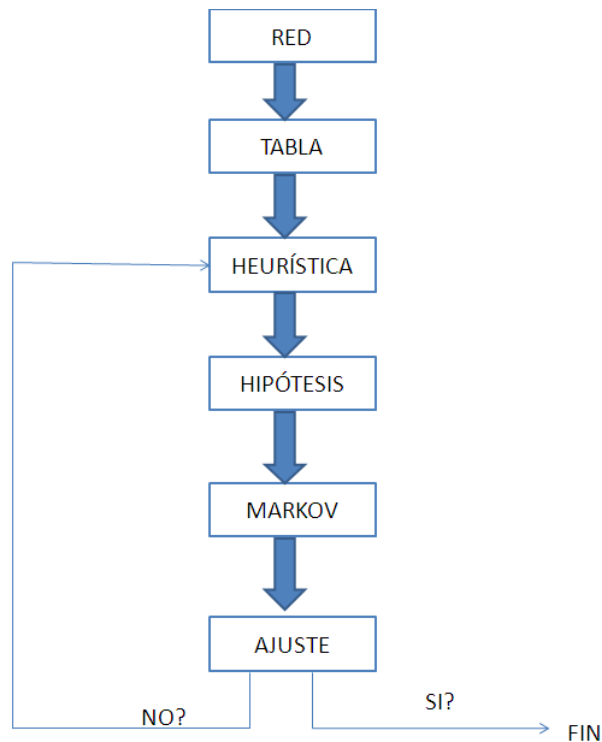


Figura 53: Diagrama de bloques de la metodología a aplicar.

### 6.3 Modelamiento e Hipótesis del problema.

El modelar el problema contempla el uso de las cadenas de Markov. Esto conlleva al uso de parámetros desconocidos, porque la red enmallada no está implementada y no se puede observar la evolución aleatoria de la misma (fallas aleatorias). Muy por el contrario, sólo nos podemos basar en observaciones de la red en anillo primitiva. Más adelante se verá esto en detalle. Para todo esto será necesario plantear hipótesis al problema en base a la observación de las máquinas y la fibra misma de acuerdo a su comportamiento tanto práctico como probabilístico de falla.

Sólo la heurística exitosa es mostrada en esta sección. El paso 1 Red está formulado en la Figura 46 y en la tabla VIII, y el paso 2 Tabla está formulado en la tabla IX. El formular la heurística es un paso más complicado, pues resulta diferente a lo ya visto.

Primero, se referirá al anexo 9.5 para revisar las Cadenas de Markov. En estas es necesario plantear un vector de estado inicial como hipótesis a las Cadenas de Markov. Más adelante se expresará este vector de estado como una función de la Tabla Reducida y se dirá cuál es el vector de estado a usar. Se recomienda estudiar y revisar en este anexo sólo las secciones 9.5.1 y 9.5.2.

La Tabla será planteada incorporando las restricciones 3) y 4). A esta Tabla le llamamos Tabla Reducida, de la cual se tiene un ejemplo en la tabla X. Ésta contiene Estados con 'E' mayúscula y estados con 'e' minúscula, para distinguirlos de su grado de falla y de su soltura.

Estado F	estado	Tipo probabilidad	Probabilidad
	1	Min	0,005
F1	2	Med	0,4
	3	Max	0,2
	4	Min	0
F2	5	Med	0
	6	Max	0
	7	Min	0
F3	8	Med	0
	9	Max	0
F4	10	--	0,395

Tabla X: Tabla de estados de falla. En la primera columna se pueden distinguir los Estados F que indican el grado de falla, y en la segunda columna los estados (con 'e' minúscula) que indican los estados en detalle de la red. Estos pueden ser clasificados por soltura (mínima probabilidad, máxima probabilidad y probabilidad media).

En la Tabla X se especifica al Estado F4 o 10 como al estado de falla 0.

El siguiente paso de la heurística (Markov) es identificar el **vector de estado** del sistema de forma de ocupar la ecuación (30) y graficar la tasa de fallas. El vector de estado, según Markov, sería el vector con las probabilidades de cada estado (de soltura) que se muestra en la última columna de la tabla X.

Por supuesto, este vector de estado es un ejemplo, y hay que plantear una hipótesis (como en toda Cadena de Markov) para dar una condición inicial para la Cadena.

Como se sabe que la red contiene una alta componente de la falla doble (se verá en 'hipótesis del conjunto de procesos markovianos') en los primeros tiempos, se escoge el siguiente vector de estado inicial:

$$\vec{p}(0) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0,1 \quad 0,4 \quad 0,5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

El cual es escogido al azar, pero siguiendo ciertas reglas: la soltura mínima tiene la mínima probabilidad; la máxima tiene la máxima; y la media tiene una probabilidad media.

Se desconoce la Matriz de Transición de Estado como se ve en la ecuación (29), por lo que es necesario empezar a plantear las hipótesis, hipótesis que dejarán claros sus valores para esta red que estamos empleando.

### **Hipótesis del conjunto de procesos markovianos**

Las hipótesis en este caso cumplen la función de dar precisión a los valores desconocidos del problema. Estas probabilidades (de eventos mutuamente excluyentes) de transición de estados (como se ve en la propiedad de Markov en el anexo 9.5.1) no son posibles de observar directamente, puesto que la red que estamos analizando está diseñada pero no existe en la realidad, es decir, no se puede hacer observación estadística sobre ella, que es lo que regularmente se hace para descubrir los parámetros de Markov.

Ante todo, unos valores importantes son los delta t's entre cada punto en el eje t del gráfico, puesto que como se trata de una Cadena de Markov no homogénea, estos son variables y dependientes del estado en que se esté. Para esto es importante ver el anexo 9.5.3.

Las hipótesis en este caso dividen al problema en 3, correspondiente a las tres zonas de las curvas de Weibull: Mortalidad Infantil ( $k < 1$ ), Vida

Util ( $k=1$ ) y Envejecimiento ( $k>1$ ) como se ve claramente en la Figura 50 y Figura 51. Es por esto que se ocuparán 3 Matrices de Transición de Estado diferentes y encadenadas en los tres periodos de tiempo diferentes.

Por eso es que se tienen 3 zonas de hipótesis.

### Zona 1:

Zona de mortalidad infantil. Esta primera zona se caracteriza por una fuerte componente de fallas dobles y a veces de fallas triples. Es una fase de aprendizaje del personal encargado de operarla, pues inicialmente se desconocen los equipos.

Las hipótesis son:

- Condición inicial en  $t_0$ : Alta Indisponibilidad en  $t_0$ , Mortalidad Infantil.
- Partida en el Estado F3, hay un coeficiente grande de vuelta al Estado F3 desde el Estado F4.
- Transiciones con altas probabilidades de transición F3-F2-F1, y bajas probabilidades de transición F1-F2-F3, debido a que se ha observado que la inexperiencia del personal inicial se va transformando en experiencia a medida que se cometen errores y se aprende de ellos.
- El estado 3 pasa al Estado F4 y Estado F4 vuelve al estado 3 realizando un intercambio de estados transitorios, debido a que se ha observado que es más probable que la red “gire” entre esos estados una vez alcanzado el Estado F3.
- Las duraciones de los estados cumplen las siguientes relaciones:
  - $\lambda_I = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$
  - $\lambda_{II} = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$
  - $\lambda_{III} = \lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9$
  - $\lambda_{IV} < \lambda_I < \lambda_{II} < \lambda_{III}$
- Para calcular la duración promedio de cada intervalo se usa la relación basada en el análisis de Jasper van Casteren [20]

$$E(\Delta t) = \sum p_i \cdot \lambda_i$$

## Zona 2:

Zona de vida útil. La segunda zona se caracteriza por una alta componente de las fallas simples y estado 10, así como una baja componente de la falla doble. Es la fase en que el sistema puede ser mejor aprovechado, y por ende, no cae en múltiples errores.

- Condición inicial igual a la condición final de la zona 1
- Partida desde el estado 1 del Estado F1.
- Tránsito con alta probabilidad de transición F1-F2-F3-F4 y baja probabilidad de transición F4-F3-F2-F1.
- Estado F4 muy estable.
- Sólo se puede pasar a igual calidad de falla al siguiente grado de falla. La probabilidad de retorno es alta. La probabilidad de paso es baja. Esto es porque hay algunos items defectuosos que causan falla.
- Las duraciones de los estados cumplen las siguientes relaciones:
  - $\lambda_I = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$
  - $\lambda_{II} < \lambda_{III}$
- Una vez que se alcanza el Estado F4 es muy fácil mantenerse temporalmente en él. Esto se refleja en la siguiente relación:

$$\lambda_{IV} > \lambda_I$$

- La probabilidad de transición a una catástrofe, modelado como el Estado F3, es baja, y la probabilidad de salida de una catástrofe tiende a ser extremadamente alta, en especial la posibilidad de transición al estado de cero fallas y además, al estado de algún grado menor de falla.
- Para calcular la duración promedio de cada intervalo se usa la relación basada en el análisis de Jasper van Casteren [20]

$$E(\Delta t) = \sum p_i \cdot \lambda_i$$

### Zona 3:

Zona de envejecimiento. Esta zona se caracteriza por una muerte de piezas muy propensas a fallar dado su uso constante e intensivo. Se caracteriza por una alta componente de la falla de tercer grado y segundo grado, así como una nula componente de la falla de primer grado.

Las hipótesis son:

- Condición inicial: misma condición final de la zona 2.
- Partida desde el estado 10 del Estado F4.
- Tránsito con alta probabilidad del estado 10-1-4-7-6-4-3, y con baja probabilidad del estado 3-4-6-7-4-1-10.
- Estado F3 muy estable.
- Una vez que se alcance el estado 3 de F1, este retornará al Estado F4, debido a que se ha observado que la falla simple de mayor probabilidad es la más fácil de reparar.
- Las duraciones de los estados cumplen las siguientes relaciones:
  - $\lambda_I = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$
  - $\lambda_{II} = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6$
  - $\lambda_{III} = \lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9$
  - $\lambda_I \ll \lambda_{II} < \lambda_{III}$
  - $\lambda_{IV} < \lambda_{II}$
- El estado 6 de F2 pasa con alta probabilidad al estado 4 de F2, debido a que se ha observado que la falla doble más probable es fácil bajarle la calidad de falla.
- Para calcular la duración promedio de cada intervalo se usa la relación basada en el análisis de Jasper van Casteren [20]

$$E(\Delta t) = \sum p_i \cdot \lambda_i$$

### Hipótesis de Horizonte

El horizonte de tiempo es 10 años (duración por observación de la fibra+equipos).

Se descompone respectivamente por zona en: **1 año, 6 años y 3 años** (zona de mortalidad infantil, zona de vida útil y zona de envejecimiento), valores que son datos de experiencia por parte de Entel.

## Modelamiento

Al emplear las hipótesis se obtuvieron los siguientes diagramas de estado para los procesos de Markov zona 1, zona 2 y zona 3 siguientes (en la Figura 54, Figura 55 y Figura 56 respectivamente)

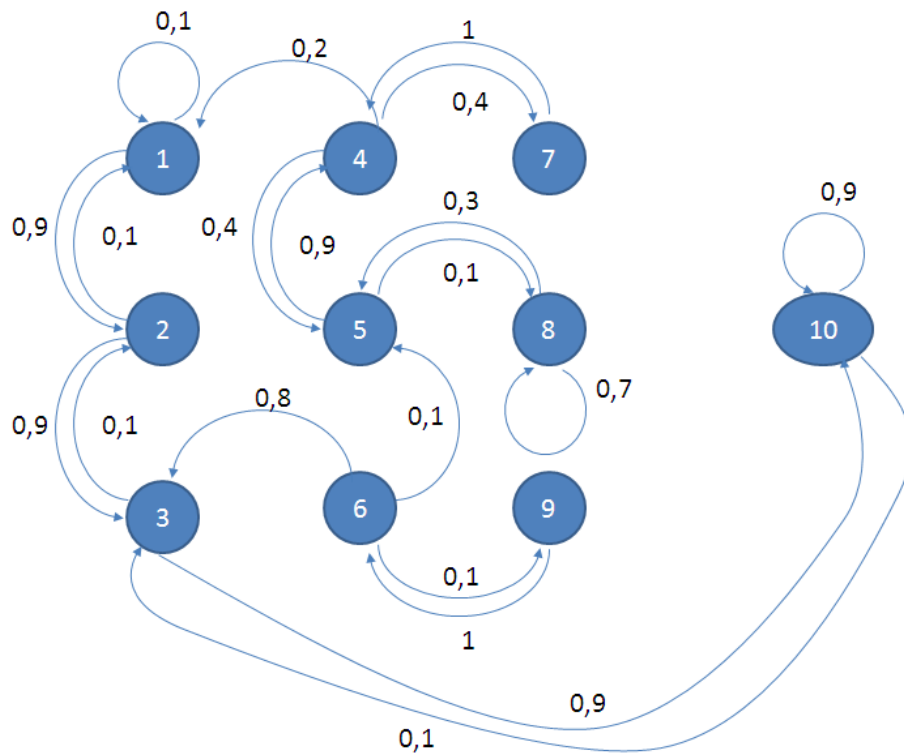


Figura 54: Diagrama de estados de la zona 1 (weibull 1)



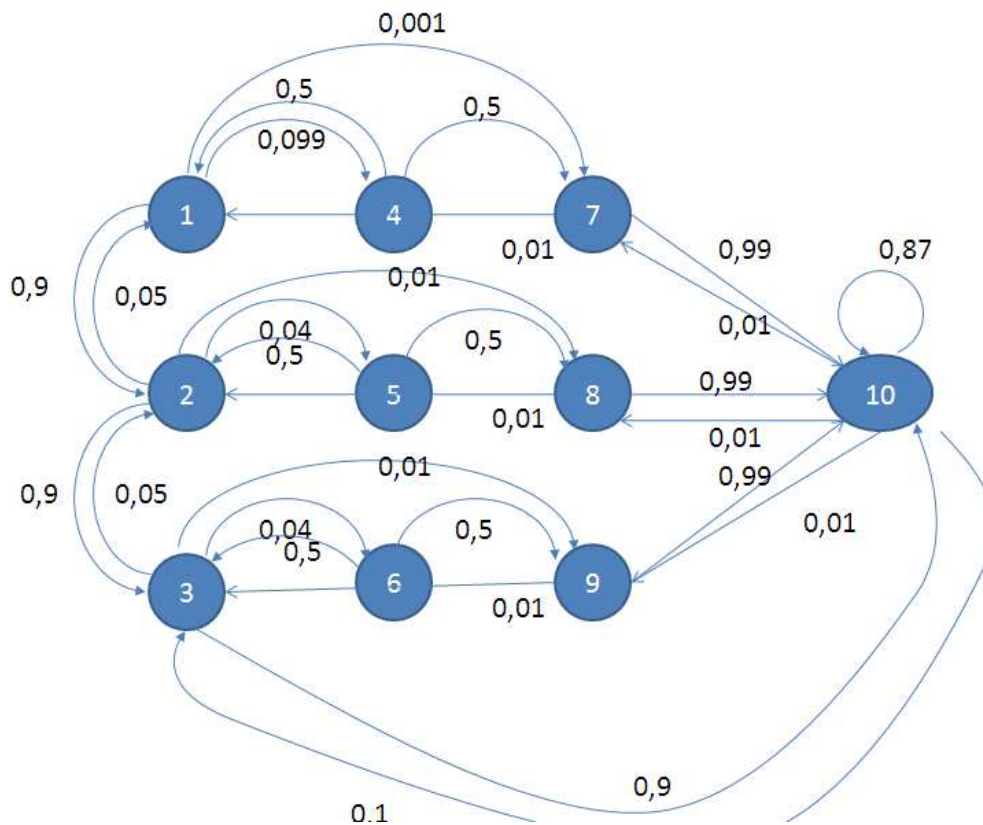


Figura 55: Diagramas de estado de la zona 2 (weibull 2)

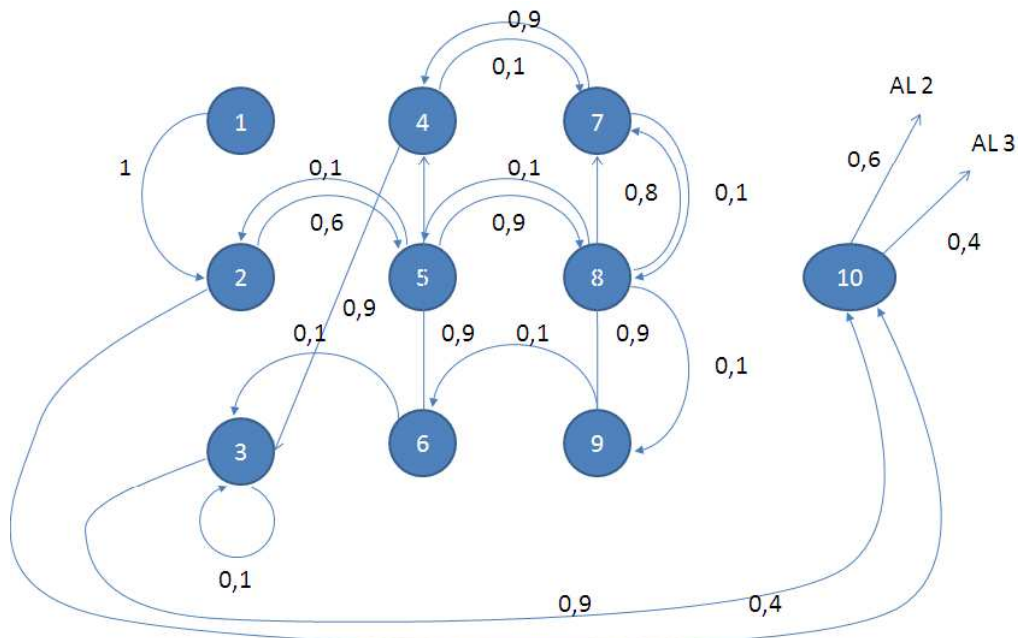


Figura 56: Diagrama de estados de la zona 3 (weibull 3)

Las que pueden ser representadas por matrices de transición de estados (una flecha significa que el punto origen de la flecha es la posición fila y

el destino de la flecha es la posición columna, y el valor de la casilla es la probabilidad de transición).

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0,9 & 0 & 0,099 & 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0 & 0,9 & 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0,01 & 0,9 \\ 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,99 \\ 0 & 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,99 \\ 0 & 0 & 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,99 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0,01 & 0,01 & 0,01 & 0,87 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,4 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0,8 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Con las matrices definidas se tiene la inmensa mayoría de los parámetros del sistema. El uso de la ecuación (30) que se transcribe aquí:

$$\vec{p}(n+1) = \vec{p}(n)M$$

Dice que el estado presente se puede “calcular” usando el estado anterior mediante el transformador de estados que es la Matriz de Transición. Con eso se puede dibujar, según la Figura 52, un gráfico de  $\lambda$  versus  $t$ .

Todavía tenemos la ecuación de normalización, pues la curva es una fdp:

$$\int_0^T \lambda(t)dt = 1$$

Lo que modificaría la curva de  $\lambda(t)$ , amplificándola o reduciéndola<sup>2</sup>. Con esto, se corroborará la hipótesis principal: que la curva  $\lambda$  versus  $t$  es una Curva de la Bañera. Para ver detalles sobre el proceso de normalización, ver el anexo 9.4.1.

Pero además es necesario aplicar las hipótesis anteriores para definir los valores de los delta  $t$ 's entre los puntos de la curva. Estos valores se basan en los tiempos de duración medios de cada estado (1, 2, 3,..., 9, 10): los llamados  $\lambda_i$  (ver anexo 9.5.3), los valores fueron medidos mediante observación de los equipos, estos se muestran en la tabla XI.

t [horas]	$\lambda_I$	$\lambda_{II}$	$\lambda_{III}$	$\lambda_{IV}$
zona 1	350,4	525,6	1051,2	175,2
zona 2	1095	1460	3285	13140
zona 3	21,9	525,6	613,2	58,4

Tabla XI: valores de  $\lambda_i$  para  $i=I, II, III, IV$  (Estados F)

Con esto tenemos todos los datos para calcular y graficar la curva  $\lambda$  versus  $t$ . El trazado de la curva se aprecia en la Figura 57.

<sup>2</sup> Según la literatura especializada [19], nada asegura que la Curva de la Bañera trazada cumpla con la Ley de Probabilidades. Es por eso que en esta investigación se opta por normalizar su integral a 1.

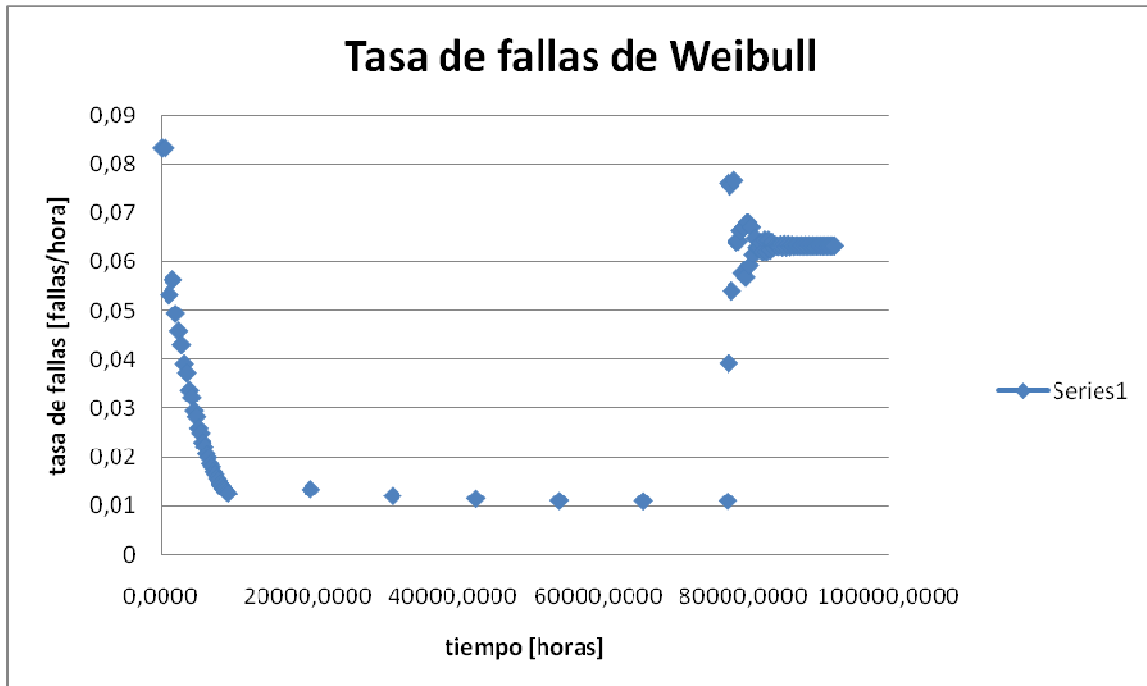


Figura 57: Resultado de gráfico lambda versus tiempo. Se distinguen claramente las 3 funciones de Weibull (con  $k < 1$ ,  $k = 1$ ,  $k > 1$ ).

Lo primero que se distingue es que la “forma de la curva” es muy similar a la de la “Curva de la Bañera” distinguiéndose claramente las 3 funciones Weibull’s concatenadas en el tiempo; es una forma sencilla de corroborar que se está en la dirección correcta. Sin embargo, hay un error: si se multiplica una zona fácil de cálculo –como lo es la zona 2- por el largo del intervalo se tendrá la integral de probabilidad en esa zona:  $0,01[\text{fallas/hora}] \times 7000[\text{horas}]$  lo que es igual a 70, este número indica que la curva está lejos de estar normalizada (ecuación (25) violada, en el anexo 9.4.1). Se necesita normalizar la curva para que su integral resulte 1.

Según anexo 9.4.1, la constante  $\alpha = 0,000516257$ . La curva normalizada se muestra en la Figura 58. Nótese la baja en la escala del valor de la tasa de fallas, el valor más bajo ahora vale  $0,000005[\text{f/h}]$ .

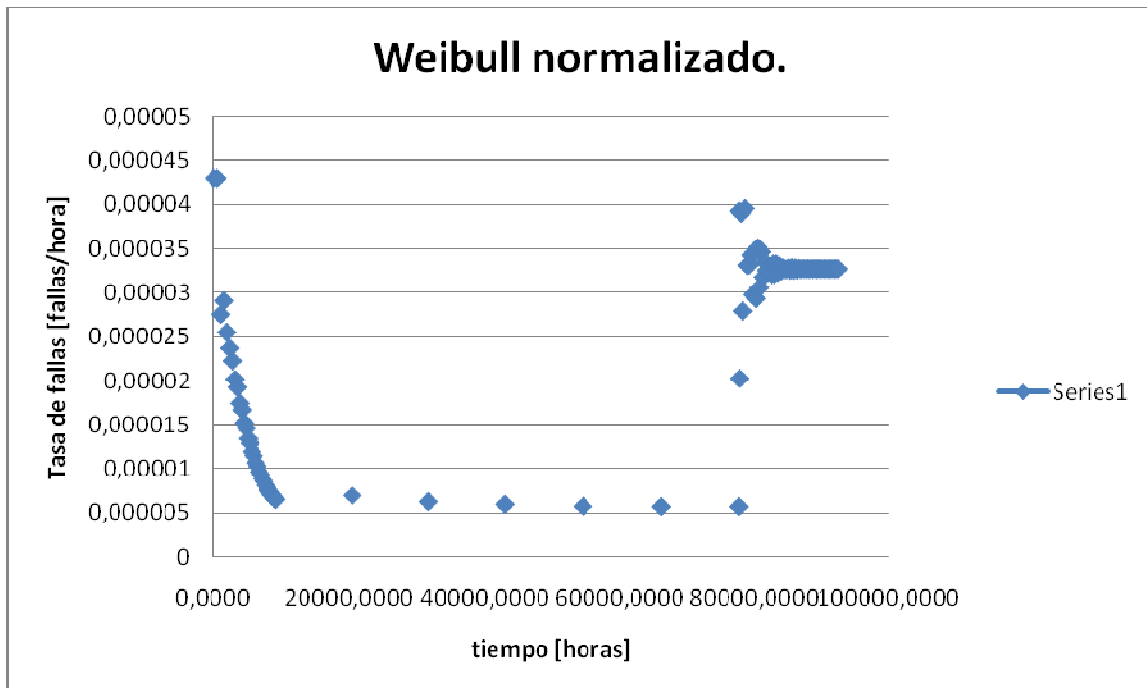


Figura 58: Resultado de gráfico lambda versus tiempo normalizado. Se distinguen claramente las 3 funciones de Weibull (con  $k < 1$ ,  $k = 1$ ,  $k > 1$ ).

## Validación

Respecto a una red con nivel de enmallamiento similar a ésta, y con interfaces actuales STM-64, el valor en “vida útil” de Disponibilidad de esta red (ver anexo 9.3 **segundo caso**) es:

$$A=99,99\%$$

según el modelo de la ETSI “adaptado” (a interfaces de 2,5 y 10Gb/s).

Será necesario integrar analíticamente la Curva de la Bañera y obtener un valor de la Disponibilidad media. Para empezar se ocupa la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = 1 - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\lambda(t) \cdot MTTR) dt$$

Esta fórmula sirve para obtener la disponibilidad promedio (A) en cualquier intervalo de tiempo. Por ejemplo, se podría obtener entre  $t=15000h - 25000h$  obteniendo una medida de disponibilidad en la zona de “vida útil”. Su deducción está en el anexo 9.4.2.

Así, para la primera Weibull se obtuvo 99,968%. Para la segunda Weibull se obtuvo 99,992%. Para la tercera Weibull se obtuvo 99,960%. Más detalles en la tabla XII.

	Tiempo de integración	Tiempo en horas	Disponibilidad del modelo
Weibull 1	6,08 meses	4380 h	99,968%
<b>Weibull 2</b>	<b>4,3 años</b>	<b>37543,9 h</b>	<b>99,992%</b>
Weibull 3	18,24 meses	13140 h	99,960%

Tabla XII: Resultados para la Disponibilidad del modelo en los 3 intervalos de Weibull.

La segunda fila indica el resultado de interés. Este es  $A_{\text{modelo}}=99,992\%$ . Esta disponibilidad es similar a la mostrada anteriormente (que es una disponibilidad en la “zona de vida útil”). Esto indica que el modelo resulta válido por método científico.

### Otros resultados proyectivos

Con el objetivo de estimar las disponibilidades según variabilidad de la MTTR es que se modificó el cálculo de esta red, partiendo por calcular la tasa de fallas con MTTR's diferentes para cada caso y aplicando la ecuación (24) y (27) con diferente MTTR a 12. Esto se hizo para MTTR's = 1,4,8,16 y 20 horas, de modo de obtener distintas Curvas de la Bañera y distintas disponibilidades en cada una de las zonas. En la tabla XIII se muestran los resultados.

MTTR	Weibull	Disponibilidad
	w1	99,9973%
1h	w2	99,9994%
	w3	99,9967%
	w1	99,9890%
4h	w2	99,9976%
	w3	99,9869%
	w1	99,9787%
8h	w2	99,9950%
	w3	99,9738%
	w1	99,9574%
16h	w2	99,9904%
	w3	99,9477%
	w1	99,9467%
20h	w2	99,9880%
	w3	99,9346%

Tabla XIII: Disponibilidades promedio del modelo de 5 nodos para diferentes MTTR's (en horas) en sus 3 diferentes zonas: w1 (mortalidad infantil), w2 (vida útil), w3 (envejecimiento).

## 6.4 Análisis y uso del modelo en redes CORE

Se procede a hacer un análisis de una red enmallada para distintos casos reales, y de interés.

### 6.4.1 Aplicaciones a redes grandes y redes nacionales

En la sección anterior se validó un modelo con parámetros de Markov que usaba hipótesis para poder obtener el valor de la Matriz de Transición, que al final enlazaba la topología con el análisis de la red. Dado que ahora es necesario hacer un análisis para una gama de redes mayores que 5 nodos, es que se hace necesario un método que extienda las ecuaciones de Markov a casi cualquier red enmallada.

Una técnica heurística bastará para variar la matriz original de Transición de forma que se adapte a cualquier red enmallada.

Para este propósito, se divide el problema en dos: redes grandes ( $n > 5$ ) y redes nacionales (redes cuyos enlaces midan más de 100Km).

#### Redes grandes

Dos tipos de problema se subdividen:

- Si la red aumenta en nodos, pero no modifica ni deforma las longitudes de sus enlaces (éstas se mantienen en  $10\text{Km} < d < 40\text{Km}$ ), entonces la red mantendrá las matrices de Transición originales.
- Si la red deforma sus enlaces en su aumento de nodos, corregirá sus matrices de Transición originales según la siguiente heurística.

Para mostrar y ejemplificar de manera adecuada el último punto, ver la red de la Figura 59

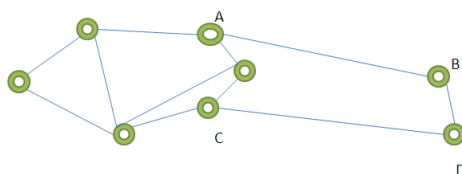


Figura 59: Red de ejemplo, en que sus enlaces A-B y C-D exceden largos normales.



La heurística consiste en que cada enlace que exceda los 40Km le será más fácil alcanzar el estado 10, luego para cada enlace que exceda esta norma aumentará la probabilidad de transición de  $M_{k,10}$  con  $k$  un índice que está relacionado con la Matriz de Transición.

Como es lógico, el resto de los enlaces disminuye su probabilidad de transición, manteniendo éstos su proporción con respecto a la diferencia entre 1 y  $M_{k,10}$  (la probabilidad negada de  $M_{k,10}$ ).

El índice  $k$  indica una fila de la Matriz de Transición (cualquiera), pero que será escogida con prioridad como la primera que tenga  $M_{k,10}$  distinto de cero, con segunda prioridad la segunda que tenga  $M_{k,10}$  distinto de cero, y así sucesivamente.

En el caso de que “se acaben” o no hubiese filas con  $M_{k,10}$  distinto de cero (es decir  $M_{k,10} = 0$ ), se elegirán en orden numérico ascendente las filas que deban ser modificadas con la regla anterior.

Para ilustrar este concepto, un ejemplo:

- Supongamos  $M_{k,10} = 0,5$
- Supongamos  $M_{k,2} = 0,3$  y  $M_{k,3} = 0,2$

Como  $1 - M_{k,10} = 0,5$  las razones que mantienen el resto de las probabilidades respectivamente son  $3/5$  y  $2/5$ . Ahora, supongamos que por efecto de una deformación:

- Varía  $M_{k,10}' = 0,7$
- $\Delta' = 1 - M_{k,10}' = 0,3$

Luego, para mantener la proporción:

$$M_{k,2}' = \frac{3}{5} 0,3 \quad \text{Y} \quad M_{k,3}' = \frac{2}{5} 0,3$$

Si llegase a suceder el caso excepcional que, los enlaces excedidos superan los 10 enlaces, entonces a partir del décimo primer enlace se repite el proceso descrito anteriormente.

La tabla que describe el aumento de  $M_{k,10}$  versus la longitud del enlace está en la tabla XIV, obtenida mediante observación de la red anillada.

	40-59,99999 [Km]	60-79,99999 [Km]	80-100 [Km]
$\Delta^*$	0,05	0,1	0,15

Tabla XIV: Incremento de  $M_{k,10}$  versus longitud deformada del enlace.

Si llegase a ocurrir que una fila  $k$  hace que  $M_{k,10} > 1$  (violación de la ley de probabilidades) entonces esa fila tendrá el resto de probabilidades igual a cero y mantendrá su  $M_{k,10} = 1$ .

## Redes nacionales

Las redes nacionales son, a diferencia de las redes metro, las que alcanzan diferentes regiones o áreas geográficas del país. Sus enlaces por lo general miden más de 100 Km.

Se divide el problema en dos casos:

- Si los enlaces tienen distancias menores a 4000 Km (todos) pero mayores a 100 Km, se hará la heurística 1
- Si los enlaces tienen alguna distancia mayor o igual a 4000 Km, se hará la heurística 2.

### Heurística 1

Los  $M_{10,k}$   $k=1,2,3,\dots,9$  varían mientras sean  $M_{10,k} \neq 0$ . Esto indica que si el largo de los enlaces es exageradamente grande respecto a una red metro, entonces será más fácil "salir" del estado 10 al siguiente momento.

Como es lógico, se debe reajustar  $M_{10,10}$  según  $M_{10,10}' = 1 - \sum_{j=1}^9 M_{10,j}'$ .

Se varían todas las Matrices de Transición de Estado excepto la Matriz de la zona de envejecimiento.

El aumento de  $M_{10,k}$  versus la longitud del enlace se tabula en la tabla XV, obtenida mediante observación de la red anillada.

	100-1000 Km	1000-2000 Km	2000-3000 Km	3000-4000 Km
$\Delta^+$	0,02	0,04	0,06	0,08

Tabla XV: Incremento de  $M_{k,10}$  versus longitud deformada del enlace.

La última regla a respetar es que si hay un grupo de enlaces en cierto intervalo de longitud y otro grupo en un intervalo de longitud totalmente diferente, entonces la variación en los  $M_{10,k}$  será aditiva o acumulativa. Por ejemplo si hay un grupo de enlaces en el intervalo 1000-2000 y otro en 2000-3000, ambos aportes a la fila 10 se sumarán, es decir, el incremento será de 0,1. Esto es equivalente a variar una segunda vez la fila 10.

## Heurística 2

Los  $M_{10,k}$   $k=1,2,3,\dots,9$  variarán mientras sean  $M_{10,k} \neq 0$ . Todos variarán en 0,1 positivo independientemente de la cantidad de enlaces sobrepasados de 4000 Km.

Como es lógico, se debe reajustar  $M_{10,10}$  según  $M_{10,10}' = 1 - \sum_{j=1}^9 M_{10,j}'$ .

Se varían todas las Matrices de Transición de Estado excepto la Matriz de la zona de envejecimiento.

### 6.4.2 Resultados proyectivos.

#### Aumento de enlaces en la red.

Se aumentaron los nodos de 5 a 7 afectando la forma de la red, con el objetivo de hacer un análisis de cuánto crece la disponibilidad en función de la cantidad de enlaces.

La red que se utilizó es la de la Figura 60

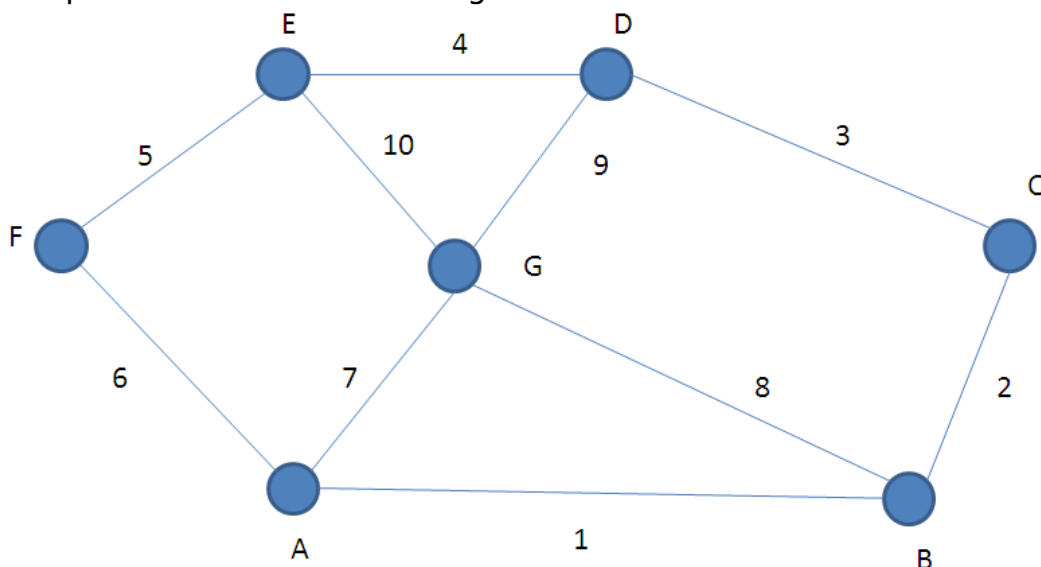


Figura 60: Red core utilizada para el cálculo de sensibilidad ante nodos.

Las longitudes de los enlaces están en la tabla XVI. Se puede apreciar que los enlaces 1, 3 y 8 exceden la media de los enlaces (10-40 Km), razón por la cual se espera que la disponibilidad cambie, ya que será más fácil "entrar" al estado de mayor fiabilidad.

enlace	Longitud [Km]
1	60
2	20
3	70
4	40
5	20
6	10
7	20
8	50
9	40
10	20

Tabla XVI: Longitudes para cada enlace de fibra óptica de la red 7 nodos.

Sobra decir que la red no cambia su disponibilidad si no deforma ninguno de sus enlaces, aunque la cantidad de nodos crezca gigantemente. Para ver el detalle de los resultados de la curva de la bañera ver el anexo 9.4.2.

Así, para la primera Weibull se obtuvo disponibilidad 99,967%. Para la segunda Weibull se obtuvo 99,992(9)%. Para la tercera Weibull se obtuvo 99,959%. Más detalles en la tabla XVII.

	Tiempo de integración	Tiempo en horas	Disponibilidad del modelo
Weibull 1	6,08 meses	4380 h	99,967%
<b>Weibull 2</b>	<b>4,3 años</b>	<b>37543,9 h</b>	<b>99,992(9)%</b>
Weibull 3	18,24 meses	13140 h	99,959%

Tabla XVII: Resultados para la Disponibilidad del modelo de 7 nodos.

La disponibilidad en la “zona de vida útil” aumentó en la cuarta cifra decimal con respecto a la red 5 nodos, mostrando un 9 en vez de un 0 en ella. Con esto se puede concluir que claramente aumenta la disponibilidad con el crecimiento de la red.

### **Red nacional con enlaces sobre 4000 Km**

La red que se utilizó es la de la Figura 61. Este es el modelo para la red nacional de telefónica en EEUU.

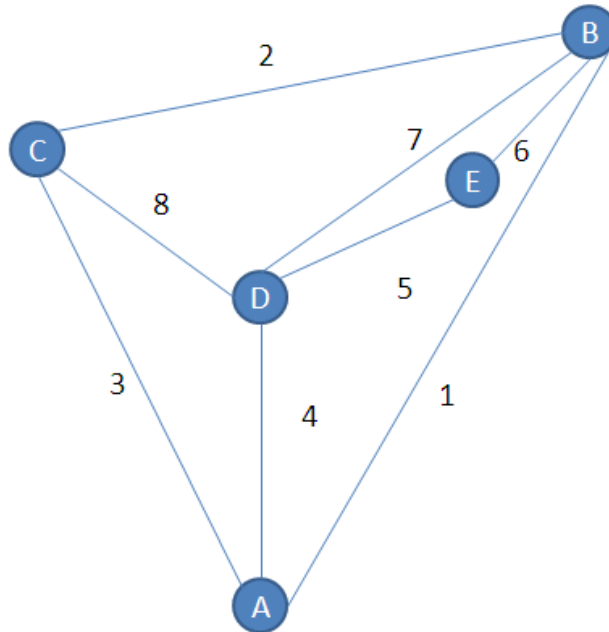


Figura 61: Red core nacional norteamericana.

Las longitudes de los enlaces están en la tabla XVIII.

enlace	longitud [Km]
1	1741
2	4171
3	4114
4	1785
5	1900
6	330
7	2200
8	2370

Tabla XVIII: Longitudes para cada enlace de fibra óptica de la red Telefónica.

Para ver el detalle de los resultados de la curva de la bañera ver el anexo 9.4.2.

Así, para la primera Weibull se obtuvo disponibilidad 99,971%. Para la segunda Weibull se obtuvo 99,990%. Para la tercera Weibull se obtuvo 99,966%. Más detalles en la tabla XIX.



Las longitudes de los enlaces están en la tabla XX.

enlace	longitud[Km]	enlace	longitud[Km]	enlace	Longitud[Km]
1	800	16	900	31	1000
2	1100	17	1000	32	800
3	950	18	1400	33	800
4	1000	19	850	34	850
5	250	20	1000	35	1300
6	800	21	950	36	1000
7	850	22	900	37	1000
8	950	23	900	38	900
9	1000	24	650	39	1200
10	1200	25	2600	40	700
11	1000	26	1300	41	300
12	1150	27	1000	42	600
13	1200	28	1100	43	900
14	1900	29	1200		

Tabla XX: Longitudes para cada enlace de fibra óptica de la red NTFS.

Para ver el detalle de los resultados de la curva de la bañera ver el anexo 9.4.2.

Así, para la primera Weibull se obtuvo disponibilidad 99,976%. Para la segunda Weibull se obtuvo 99,989%. Para la tercera Weibull se obtuvo 99,972%. Más detalles en la tabla XXI.

	Tiempo de integración	Tiempo en horas	Disponibilidad del modelo
Weibull 1	6,08 meses	4380 h	99,976%
<b>Weibull 2</b>	<b>4,3 años</b>	<b>37543,9 h</b>	<b>99,989%</b>
Weibull 3	18,24 meses	13140 h	99,972%

Tabla XXI: Resultados para la Disponibilidad de la red NTFS.

## 7 Discusiones de los resultados.

En esta memoria se tuvo la oportunidad de llegar a una función densidad de probabilidad que representó la evolución en  $t$  o temporal de las fallas del sistema, esta distribución llamada  $\lambda(t)$  tiene la interpretación de fallas por unidad de tiempo y se “descubrió” por métodos matemáticos inversos. Todo el desarrollo fue, como explicamos aquí, en base a ciertos supuestos como que la red inicialmente tiene una gran “mortalidad infantil” (piezas que fallan), luego pasa por una etapa de vida útil, finalmente por una etapa de envejecimiento; que el sistema tiene 10 estados y que cada etapa termina en una cantidad de años observada por la TELCO.

En resumen, se emplearon supuestos muy revisados por la literatura, pues se sabe que la distribución Weibull es la que rige las redes de comunicaciones y por eso no es necesario demostrar que la distribución gobernada es la distribución Weibull. El trabajo sería llegar a la fdp Weibull mediante métodos matemáticos hasta ahora no tratados (como Markov).

Lo anterior sirve de resumen del trabajo que se hizo en esta memoria para llegar a resultados, que son analizados y discutidos a continuación.

Luego de que se logró graficar toda la función que rige la red, con la ecuación de estados de Markov  $\vec{p}(n+1) = \vec{p}(n)M$  se obtuvieron resultados bastante alentadores, pues primero se comprobó la hipótesis principal (la función describe una Curva de la Bañera), haciendo válido el modelo para hacer cualquier cálculo proyectivo, salvo por ajustes que habría que hacer a la Matriz  $M$  de cada etapa.

El hecho de llegar a una distribución de Weibull (la Curva de la Bañera) sólo es la primera parte, porque representa que se ha ido en la dirección correcta. La validación fue hecha después de ocupar la ecuación que relacionaba  $A$  promedio con  $\lambda(t)$  ya que fue necesaria para verificar el modelo. Otras heurísticas fallidas (como obtener los coeficientes de la Matriz de Transición por simulación computacional y Máxima Verosimilitud; usar 3 Estados F; calcular los coeficientes con probabilidad condicional) no son recomendables para validar en futuras instancias, pues no conducen a resultados válidos.

La desventaja del modelo es el gran tamaño de las matrices (10x10) de Transición de Estados, porque no necesariamente se entenderá lo que se está haciendo. Por otro lado es una ventaja que no se tenga que modificar demasiado la matriz, porque se podrá aplicar fácilmente el



modelo para cualquier red en poco tiempo. La precisión del modelo puede ser recomendable para cálculos proyectivos aunque no hay que olvidar de que se trata de una heurística y por lo tanto, aproximada.

Es necesario destacar que el modelo propuesto no considera la distribución geográfica de repuestos lo que significa considerar que MTTR no varía. Una mejor precisión del modelo indudablemente requiere considerar la variabilidad del MTTR.

Finalmente, se hicieron unos cálculos proyectivos con la red original de 5 nodos, en los cuales se calculó la disponibilidad promedio de la red para distintos MTTR's, esto arrojó un resultado esperable: que la disponibilidad aumenta con la disminución de la MTTR, cuando el resto de las variables estén constantes. Esto es importante, porque dice que a mayor preparación en el personal que repara la red, mayor es la confiabilidad de la misma.

## **8 Conclusiones.**

En el capítulo 6 se ha mostrado como modelar un problema de disponibilidades considerando las hipótesis que provee una red de arquitectura SDH, y cumpliendo las demandas en velocidad del orden del GigaBit, modelando cada aspecto que requiere ROADM. Al llevar el modelo a la práctica (nodos ROADM y enlaces) se ha llegado a un resultado de Disponibilidad para redes de este tipo.

### **8.1 Sobre la complejidad del problema**

El objetivo de obtener un modelo siempre exige que exista equilibrio entre complejidad y fidelidad con la realidad. La realidad tiende a ser una sola (excepto en la física de probabilidades de partículas) y la observación de la misma lleva a que la fidelidad del modelo sólo puede ser planteada por una variable tiempo estocástica o mejor conocida como probabilística.

De esta forma se logró un modelo en el Capítulo 6 que lograra la sencillez y la fidelidad. Se logró que pudiera exponerse como metodología, de manera que pueda ser reproducida en otras redes.

### **8.2 Sobre los resultados del proceso.**

Las pruebas realizadas con equipos y enlaces permitieron resolver el modelo. No hay que quitarle mérito al análisis, pues el modelo es empírico-teórico.

El modelo fue validado con una red en que se hizo un cálculo teórico con una normativa (ETSI), arrojando una verificación positiva. Los resultados fueron coherentes básicamente porque la disponibilidad calculada en el modelo de 5 nodos (99,99%) es mayor que la red anillada primitiva Aring=99,86% (SDH con interfaces 1GbE). Una primera conclusión es que la solución enmallada es aquella que presenta una mejor disponibilidad.

Los resultados posteriores mostraron que a medida que la cantidad de enlaces crecen (deformando la red) ésta aumenta su disponibilidad, aunque sea ligeramente. Este resultado es de suma importancia teórica, porque avanza el estudio de las redes enmalladas como objeto de interés en la rama de Confiabilidad.

Otro resultado interesante es que en una red nacional, es decir una que cubra todo el país, provee una menor disponibilidad que una red metro, debido a la longitud de sus enlaces haciéndolos altamente inestables.

Es importante destacar que el modelo planteado en el capítulo 6 es independiente de la tecnología, esto significa que el modelo usado no depende de la interfaz que se ubique en los enlaces, sino que se puede colocar cualquier tecnología en ellos y el modelo funcionará, siempre y cuando se especifiquen el MTBF/Km de la interfaz y el MTTR.

Es posible concluir que sirvió aplicar Cadenas de Markov para resolver el problema de disponibilidad en el tiempo. En principio y como se detalló en el capítulo 7, hubieron muchas heurísticas que no se describían correctamente con las Cadenas de Markov, por ejemplo se aplicó una que usaba Máxima Verosimilitud y una sola Matriz de Transición de Estados, que no fue útil porque daba una distribución de Weibull combinada deforme. La idea de aplicar Cadenas de Markov con 3 matrices e hipótesis permitió avanzar en cuanto a disponibilidad de la red, más aún siendo un resultado no directo.

Entre los resultados más específicos de importancia para las TELCO's están los relacionados con grandes clientes que demandan una red WAN para su empresa (bancos, empresas, grandes telefónicas, etc...). Por ejemplo, si una empresa adquiriera los servicios de una TELCO con red enmallada de 5 nodos, su máxima espera ante falla según la Tabla VI sería:

52 minutos al año

La máxima espera que tendría un cliente masivo de redes WAN (WAN, Wide Area Network) son 52 minutos antes de que la red sea reparada. Esta espera claramente estaría disgregada en el año, dividida a lo largo

de 12 meses, pero se habla de espera máxima porque el peor caso sería esperar los 52 minutos enteros.

Para una red anillada la máxima espera sería ( $A_{ring}=99,86\%$ ) según la tabla VI:

3,65 días al año

Que es una espera bastante más grande que la anterior, y es probable que el cliente no la acepte.

### 8.3 Trabajo futuro.

Aunque se puede decir que la modelación teórica de la red fue satisfactoria, queda trabajo futuro. Pese al modelamiento preciso de la heurística hay componentes no-teóricas que se dan en la práctica como la posición geográfica de los enlaces y la distribución de repuestos.

Un enfoque interesante y que puede añadir información es el tipo de instalación **aérea-soterrada de la fibra**. Es claro que la fibra aérea es más vulnerable que la soterrada, por eso, se deja abierto intentar distribuir la fibra de manera soterrada en el radio de 40% de distancia del "Centro de Ancho de Banda". Se piensa que una heurística así aumentará en un nueve el valor de la disponibilidad promedio en la "zona de vida útil". A modo de ejemplo, si la fibra es frecuentemente vulnerada en la zona de instalación aérea (60% del radio más externo), es claro que la zona más interna tendrá mucha mayor disponibilidad y serán mejor aprovechados los recursos de Ancho de Banda, lo que implica que su aporte a la disponibilidad puede aumentar (en un 5to nueve). Esto último debido a que se tendrá un mayor tiempo entre fallas (MTBF) en la zona soterrada que la zona aérea.

# 9 Anexos.

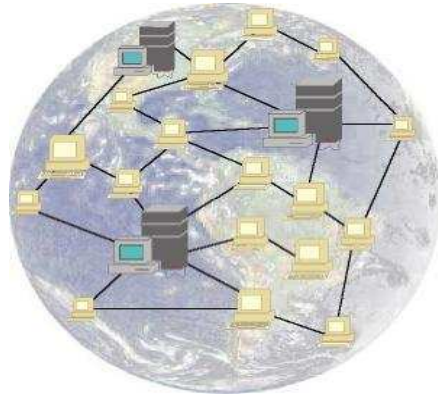
## 9.1 Componentes o corrientes que confluyen en una red convergente

### 9.1.1 Internet

Internet es un conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas, que utilizan la familia de protocolos TCP/IP, garantizando que los sistemas físicos heterogéneos que la componen funcionen como una red lógica única, de alcance mundial. Sus orígenes se remontan a 1969 cuando en EEUU se estableció la primera conexión de computadoras entre tres universidades en California y una en Utah. Esta red se conoció como ARPANET.

Uno de los servicios que más éxito ha tenido en Internet ha sido la World Wide Web (WWW, o "la Web"), hasta tal punto que es habitual la confusión entre ambos términos. La WWW es un conjunto de protocolos que permite, de forma sencilla, la consulta remota de archivos de hipertexto. Este avance se desarrolló posteriormente (1990) y utiliza Internet como medio de transmisión.

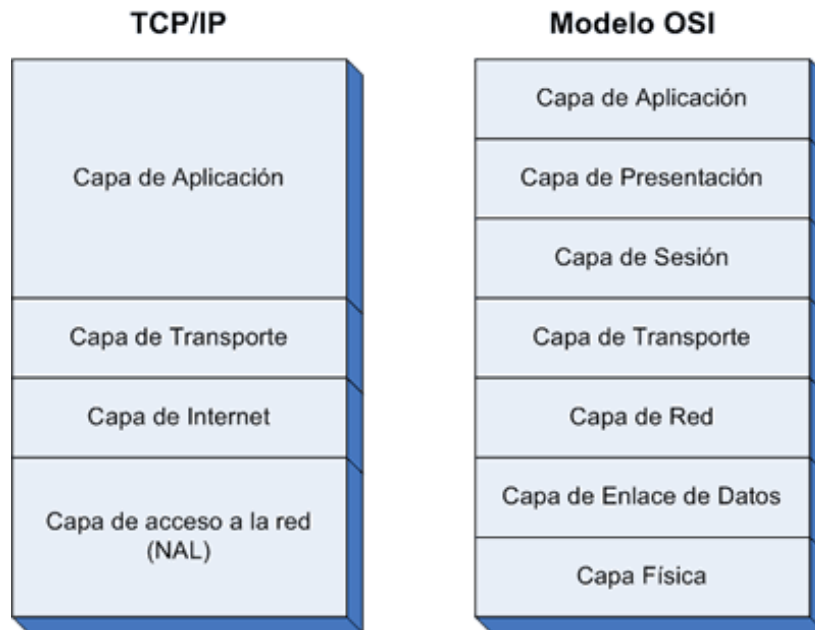
Existen, por tanto, muchos otros servicios y protocolos en Internet aparte de la Web: el envío de correo electrónico con SMTP; la transmisión de archivos con FTP, P2P; las conversaciones en línea con IRC; la mensajería instantánea; la transmisión de contenido y comunicación multimedia -telefonía (VoIP), televisión (IPTV)-; los boletines electrónicos con NNTP; el acceso remoto a otras máquinas con SSH y Telnet; o los juegos en línea.



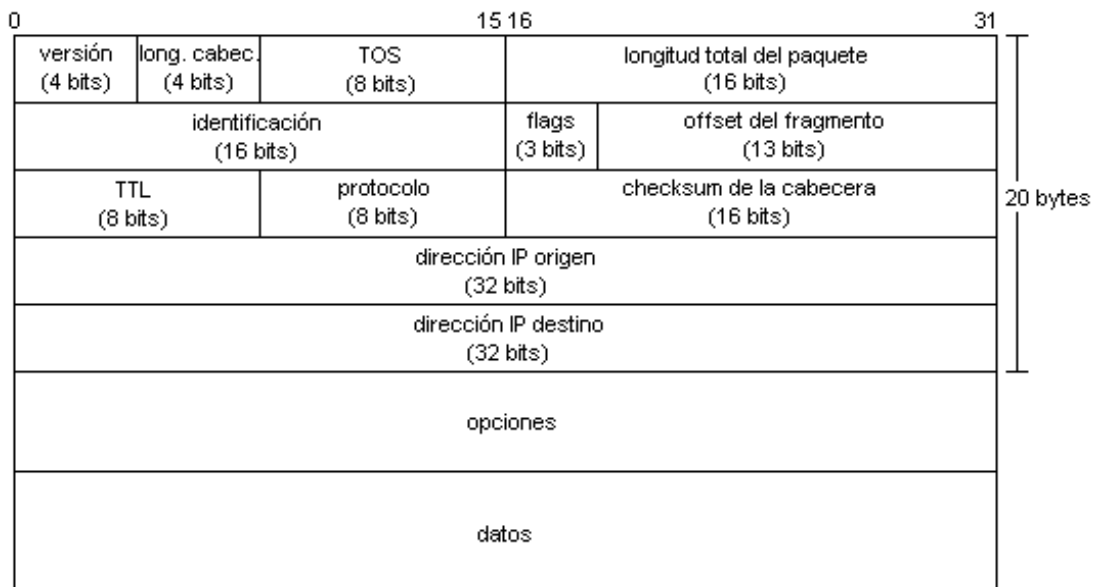
*Figura 63: Diagrama esquemático de Internet, compuesta de millones de computadores interconectados por genéricamente servidores (grandes) y administradores de la internet y dichos servidores.*

El modelo de arquitectura de estos protocolos es más simple que el modelo OSI, como resultado de la agrupación de diversas capas en una sola o bien por no usar alguna de las capas propuestas en dicho modelo de referencia. El protocolo se denomina TCP / IP y en la figura 64 se muestra su arquitectura comparada con la del modelo OSI.

Con esto se tiene la base para construir el paquete IP, el paquete estándar que viaja por Internet desde un usuario a otro usuario. Se debe recalcar que éste es el paquete que viaja por un enlace asociado al protocolo Ethernet, protocolo de Internet de capa 2 más expandido. Se tratará de resumir las funcionalidades de cada campo del paquete IP sobre Ethernet.



a)



b)

Figura 64: a) Modelo de capas OSI (referencial), b) trama TCP/IP para el protocolo Ethernet.

Con respecto a la figura 64 el paquete se transmite en el siguiente orden: de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Los valores de

más de 8 bits se transmiten con el byte/bit más significativo primero y el menos significativo el último. Nótese que este criterio es el contrario al utilizado por los microprocesadores x86 de Intel con lo cual no se puede hacer copia directa de memoria desde variables numéricas a un *array* con la trama que hay que invertir el orden de los bytes. Las direcciones IP origen/IP destino, como es habitual, se transmiten con el mismo orden con que se escriben.

El significado y codificación de los campos es el siguiente:

- **Versión:** Versión del protocolo IP usado. La extendida actualmente es la codificada con el 4.
- **Long. cabec.:** Longitud de la cabecera, en palabras de 32 bits. El mínimo es 5 (20 bytes) y el máximo queda limitado a 15 (60 bytes), dejando un espacio de 40 bytes para las opciones.
- **TOS:** *Type Of Service*. Conjunto de *flags* que indican el tipo de servicio de comunicación que se desea, en cuanto a las características deseables de la ruta: minimizar retardo, maximizar velocidad, maximizar fiabilidad y minimizar costo. Estos cuatro *bits-flags* van precedidos de tres bits no usados normalmente y seguidos de un bit que debe ser 0.
- **Longitud total del paquete:** En bytes, incluye cabecera y datos. El tamaño de este campo limita pues el datagrama IP más grande a 65.535 bytes (como máximo 65.515 de datos), pero un *host* no está obligado a aceptar paquetes de tamaño superior a 576 bytes, por lo que para mandar paquetes más largos debe tenerse la certeza de que el otro extremo permita su recepción.
- **Identificación:** Este campo lo usará IP para identificar cada datagrama que envía, incrementando normalmente su valor de uno en uno. La utilidad principal se obtiene con la fragmentación, al permitir a IP identificar los diferentes fragmentos de un mismo datagrama (todos llevarán el mismo valor en este campo). Aunque la RFC 791 sugiere que sea la capa superior la que dé este valor a la función de envío de IP, en la práctica es la propia capa IP la que suele asignar números consecutivos a este identificador.
- **Flags:** Tienen la siguiente disposición: [0][DF][MF]. El primer bit, reservado, debe dejarse a 0. DF (*Don't Fragment*) lo activa el *host* que envía el datagrama si quiere impedir que este se fragmente. Si el paquete llega a un *router* que no puede encaminar un paquete tan



grande sin fragmentarlo, este *router* devolverá un mensaje de error ICMP al *host* que lo envió. MF (*More Fragments*) se usa para identificar el último fragmento de un datagrama: Todos los fragmentos llevan este bit a 1 menos el último.

- **Offset del fragmento:** El valor de este campo, multiplicado por 8, nos da el *offset* del fragmento en el datagrama al que pertenece. Esta forma de codificación obliga a la capa IP a dividir los datagramas en fragmentos de tamaño múltiplo de 8 bytes (salvo el último fragmento).

- **TTL (*Time To Live*):** El *host* que envía el paquete IP rellena este campo con un valor inicial. Cada *router* por el que pasa debe decrementar este campo una unidad. Si un *router* recibe un paquete con un valor TTL=1 y el paquete no va destinado a él (pues el *router* puede ser un *host*), en vez de encaminarlo debe descartarlo y devolver al *host* remitente un mensaje de error ICMP. Si TTL=0 lo descartará directamente (esta situación no debería darse nunca). De esta forma se limita la "vida" de un paquete en la red, evitando que, por ejemplo por errores en tablas de *routing*, un paquete pueda dar vueltas indefinidamente, sobrecargando el tráfico en la red.

- **Protocolo:** Es un valor que identifica qué protocolo de nivel superior ha pasado los datos a IP para su transmisión. Por ejemplo, ICMP usa el valor 1 y UDP el valor 17. Estos valores se encuentran en la *RFC 1700: Assigned Numbers*.

- **Checksum de la cabecera:** Es una suma de verificación utilizada para comprobar si hay errores tanto en la cabecera como en los datos. El sistema usado puede consultarse en la *web* Checksum IP [22]

- **Dirección IP origen, dirección IP destino:** Direcciones de los *hosts* que llevan a cabo la comunicación IP, extremo a extremo.

- **Opciones:** Este campo permite añadir más información a la cabecera IP. El tamaño de esta información adicional viene determinado por el campo longitud de la cabecera pues el resto de esta es de tamaño fijo (20 bytes, dejando hasta 40 para las opciones). Las diferentes opciones (*record route, timestamp, etc.*) y su formato pueden consultarse en la *RFC 791*.

- **Datos:** Los pasados a IP por una capa superior.

## 9.1.2 ToIP

Voz sobre Protocolo de Internet, también llamado Voz sobre IP, VoziP, VoIP (por sus siglas en inglés), es un grupo de recursos que hacen posible que la señal de voz viaje a través de Internet empleando un protocolo IP (Internet Protocol). Esto significa que se envía la señal de voz en forma digital en paquetes en lugar de enviarla (en forma digital o analógica) a través de circuitos utilizables sólo para telefonía como una compañía telefónica convencional o PSTN (sigla de Public Switched Telephone Network, Red Telefónica Pública Conmutada).

Los Protocolos que son usados para llevar las señales de voz sobre la red IP son comúnmente referidos como protocolos de Voz sobre IP o protocolos IP. Pueden ser vistos como implementaciones comerciales de la "Red experimental de Protocolo de Voz" (1973), desarrollada por ARPANET.

El tráfico de Voz sobre IP puede circular por cualquier red IP, incluyendo aquellas conectadas a Internet, como por ejemplo redes de área local (LAN).

Es muy importante diferenciar entre Voz sobre IP (VoIP) y Telefonía sobre IP.

- *VoIP es el conjunto de normas, dispositivos, protocolos, en definitiva la tecnología que permite la transmisión de la voz sobre el protocolo IP.*
- *Telefonía sobre IP es el conjunto de nuevas funcionalidades de la telefonía, es decir, en lo que se convierte la telefonía tradicional debido a los servicios que finalmente se pueden llegar a ofrecer gracias a poder portar la voz sobre el protocolo IP en redes de datos. [29]*

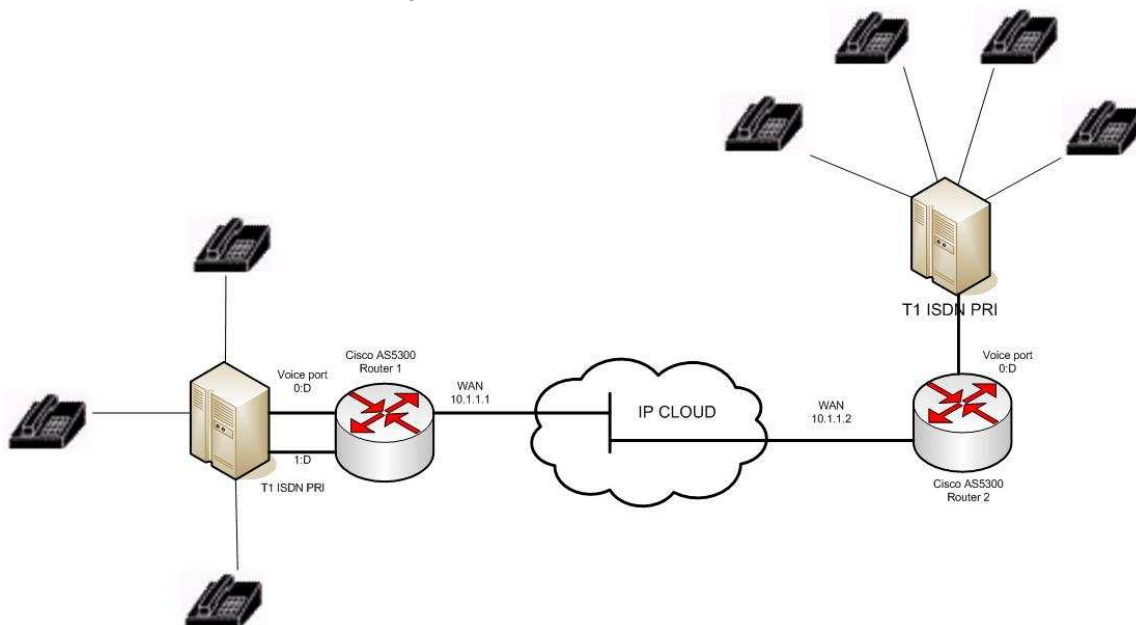
La corriente que nos interesará en esta memoria será la ToIP, por lo que las descripciones, detalles técnicos y teóricos que mostraremos acá serán los de ToIP.

Para empezar, un teléfono IP es un dispositivo que puede emitir y recibir llamadas a través de Internet y que aprovecha las capacidades de la red, normalmente tiene incrustado un microcomputador que le facilita al

usuario la interfaz dando opciones de red como agenda telefónica, identificador, rellamada, redirección, buzón de voz entre otras, y que está graficado en la Figura 65.



La unión de redes de voz y datos ha sido una idea antigua. Transmitir voz a través de la red de datos de algunas empresas no ha sido ningún misterio durante años, pero su aplicación práctica sin inconvenientes económicos ha sido la mayor dificultad.



El estándar H.323 (ver Figura 66) es la base de implantación de VoIP. H.323 es una recomendación del ITU-T (International Telecommunication Union), que define los protocolos para proveer sesiones de comunicación audiovisual sobre paquetes de red. A partir del año 2000 se encuentra implementada por varias aplicaciones de internet que funcionan en tiempo real como Microsoft Netmeeting y Ekiga (Anteriormente conocido como GnomeMeeting, el cual utiliza la implementación OpenH323). Es una parte de la serie de protocolos H.32x, los cuales también dirigen las comunicaciones sobre RDSI, RTC o SS7.

El estándar es un conjunto de normas (recomendación amplia, que recoge varias tecnologías de acceso) ITU para comunicaciones multimedia que hacen referencia a los terminales, equipos y servicios estableciendo una **señalización en redes IP**. No garantiza una calidad de servicio, y en el transporte de datos puede, o no, ser fiable; en el caso de voz o video, nunca es fiable. Además, es independiente de la topología de la red y admite pasarelas, permitiendo usar más de un canal de cada tipo (voz, vídeo, datos) al mismo tiempo.

Los equipos necesarios para implementar una red VoIP son:

- Teléfonos IP.
- Adaptadores para PC.
- Hubs Telefónicos.
- Gateways (pasarelas RTC / IP).
- Gatekeeper.
- Unidades de audioconferencia múltiple. (MCU Voz)
- Servicios de Directorio.

El Gatekeeper es un elemento opcional en la red, pero cuando está presente, todos los demás elementos que contacten dicha red deben hacer uso de aquel. Su función es la de gestión y control de los recursos de la red, de manera que no se produzcan situaciones de saturación de la misma.

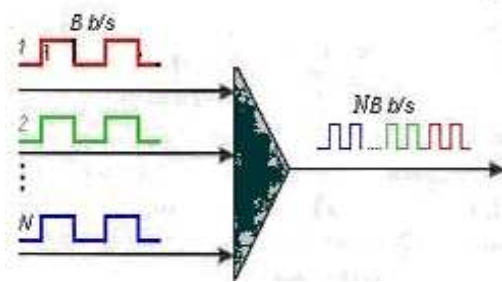
El Gateway es un elemento esencial en la mayoría de las redes pues su misión es la de enlazar la red VoIP con la red telefónica analógica o RDSI. Podemos considerar al Gateway como una caja que por un lado tiene un interfaz LAN y por el otro dispone de uno o varios de los siguientes interfaces:

- FXO. Para conexión a extensiones de centralitas ó a la red telefónica básica.
- FXS. Para conexión a enlaces de centralitas o a teléfonos analógicos.
- E&M. Para conexión específica a centralitas.
- BRI. Acceso básico RDSI (2B+D)
- PRI. Acceso primario RDSI (30B+D)
- G703/G.704. (E&M digital) Conexión específica a centralitas a 2 Mbps.

Los distintos elementos pueden residir en plataformas físicas separadas, o nos podemos encontrar con varios elementos conviviendo en la misma plataforma. De este modo es bastante habitual encontrar juntos Gatekeeper y Gateway.

### 9.1.3 TDM y telefonía digital

TDM (TDM, Time Division Multiplexing) es un sistema de transmisión en el cual un número de comunicaciones están multiplexados en una portadora al asignar a cada comunicación un espacio específico de tiempo. El proceso se lleva a cabo "intercalando" las muestras de diferentes señales para que estas se puedan transmitir en forma secuencial por el mismo canal. TDM tiene como objetivo multiplexar "n" canales PCM (PCM, Pulse Code Multiplexing). Según el estándar que se escoja (ETSI o ANSI), para lograr lo que se denomina un PCM de 1er orden (E1 o T1), como en la Figura 67.



*Figura 67: Multiplexación por codificación de pulsos para una señal de N tramas, nótese que cada trama es concatenada en una señal más grande (N·b).*

TDM es la base tanto conceptual como tecnológica de la telefonía digital. La telefonía digital es una nueva forma de hacer y recibir llamados utilizando una red digital con medios físicos de fibra óptica en vez de la red de telefonía tradicional.

Esta telefonía es completamente controlada por electrónica digital a diferencia de FDM (multiplexación por divisiones de frecuencia) con circuitos analógicos. Tiene la ventaja que las señales analógicas de la telefonía analógica se empiezan a combinar en un sólo troncal digital mediante digitalización de las mismas, ósea es retro-compatibile. El

proceso se realiza en varias etapas: 1) muestreo 2) cuantización y 3) codificación. Esto debido a que los lazos locales producen señales analógicas de donde TDM toma la responsabilidad de digitalizarlas.

Las señales analógicas se digitalizan en la oficina final con un CoDec (codificador-decodificador), con lo que se producen palabras de 7 u 8 bits, que se pueden apreciar en la Figura 68 con claridad (pilas del diagrama). El CoDec toma 8000 muestras por segundo (125useg/muestra) que de acuerdo al teorema de Nyquist, con esta velocidad de muestreo es suficiente para capturar toda la información del ancho de banda de 4kHz del canal telefónico. A una velocidad de muestreo menor, la información se perdería; a una mayor, no se ganaría información extra. En consecuencia, virtualmente, todos los intervalos de tiempo dentro del sistema telefónico son múltiplos de 125useg.

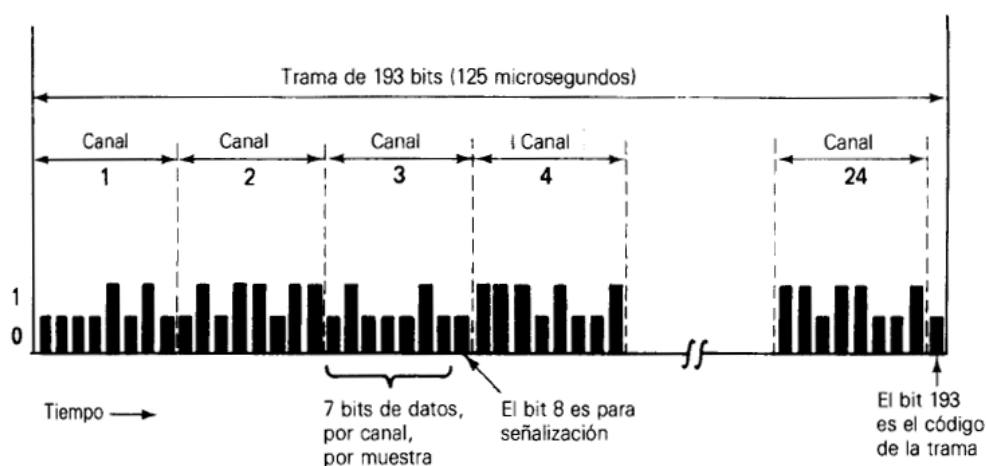


Figura 68: Trama digital de una llamada. Se uso la técnica de capa 1 TDM

### 9.1.4 TVdigital

La televisión digital se define por la tecnología que utiliza para transmitir su señal. En contraste con la televisión tradicional, que codifica los datos de manera analógica, la televisión digital codifica sus señales de forma binaria, habilitando así la posibilidad de crear vías de retorno entre consumidor y productor de contenidos, abriendo así la factibilidad de crear aplicaciones interactivas.

## Plataformas de Televisión Digital

Televisión Digital Terrestre (TDT) es la aplicación de las tecnologías del medio digital a la transmisión de contenidos a través de una antena convencional (aérea). Aplicando la tecnología digital se consiguen mayores posibilidades, como proveer de un mayor número de canales, mejor calidad de imagen o imagen en alta definición (HD o High Definition en inglés) y mejor calidad de sonido (empleando sistemas como AC3). La tecnología usada en Norteamérica es ATSC, ISDB-T en Japón, y DVB-T en Europa, Australia, África y algunos países de Suramérica. El resto del mundo aún no se ha decidido. ISDB-T es similar a DVB-T en el modo de transmisión de la señal aunque usen anchos de banda diferentes para HD.

En España en el año 2000 entró en funcionamiento la primera plataforma comercial de Televisión Digital Terrestre (TDT), Quiero TV; plataforma de pago que no alcanzó la rentabilidad esperada y cesaron sus distintas emisiones el 30 de junio de 2002.

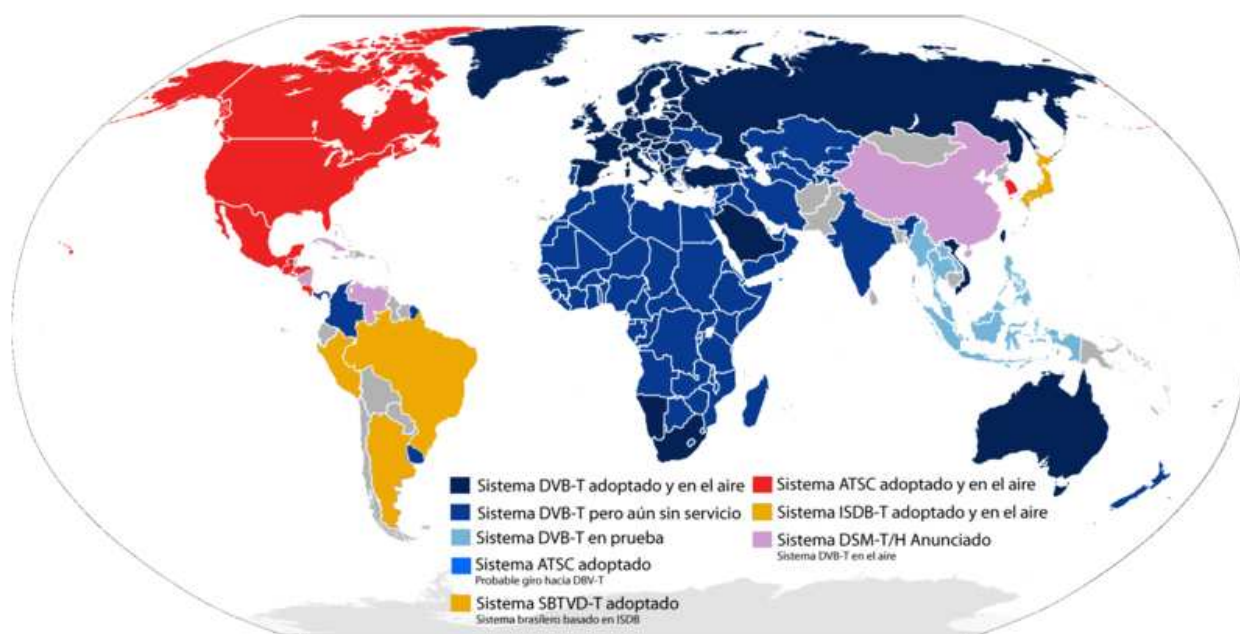


Figura 69: Mapa mundial de tecnologías de televisión digital. La complejidad y diversidad de Tvdigital está expuesta.



El 30 de noviembre de 2005 se produjo el relanzamiento del sistema al comenzar sus emisiones digitales en abierto las cadenas que hasta en ese momento emitían en analógico incorporando al mismo tiempo nuevas emisiones inauguradas ex profeso para la ocasión, así como nuevas cadenas otorgadas exclusivamente para TDT.

La TDT permite una mejora en la calidad de la recepción y amplía la oferta disponible tanto en número de canales como en versatilidad del sistema: emisión con sonido multicanal, múltiples señales de audio, teletexto, EPG (guía electrónica de programas), canales de radio, servicios interactivos, imagen panorámica, etc. A mediano plazo el sistema de televisión analógico desaparecerá completamente liberando frecuencias que permitirán aumentar la oferta de canales, su calidad y otros servicios en TDT. El sistema de radio digital DAB también comenzó sus emisiones en 1998 pero aparenta, en la práctica ser inviable y/o poco rentable su recepción al no existir en el mercado bastantes receptores.

TDC Televisión Digital por Cable se refiere a la transmisión de señales digitales a través de sistemas de televisión por cable, de tipo coaxial o telefónico.

En América Latina el principal operador de este servicio es Telmex.

En Estados Unidos el principal operador es Comcast antes conocido como Time Warner Cable.

IPTV Protocolo de Televisión IP en España, como en muchos países, la televisión por banda ancha es relativamente nueva. La empresa Telefónica lanzó un servicio llamado Imagenio ofreciendo un «paquete

de servicios» conocido en ese país como «trio» que incluye televisión digital, acceso a Internet mediante banda ancha y voz sobre protocolo IP (VoIP). En el 2006, el servicio Imagenio alcanzó la cifra de 206.572 clientes y se espera que para 2008 llegue a un millón de usuarios. Este tipo de servicios, ha hecho que el par de cobre o hilo telefónico se consolide como una alternativa válida para recibir canales temáticos de televisión, vídeo a la carta y espectáculos o películas de pago previo (Pay Per View en Inglés). Los avances tecnológicos en el sistema ADSL (que han llevado al desarrollo y expansión de la tecnología ADSL2+ en España) permiten mayor velocidad de conexión y la transmisión de centenares de canales, además de diversas posibilidades interactivas, argumentos suficientes para que las compañías de televisión por ADSL hayan apostado por un método de difusión más económico que el cable coaxial ya que se aprovecha la infraestructura telefónica existente.

TDS - Televisión Digital por Satélite se refiere a la transmisión de señales satelitales en formato Digital. Los principales operadores a nivel mundial son Sky, DirecTV y Telefónica

En España es el formato que más usuarios agrupa en la televisión por suscripción, a pesar de que ha ido descendiendo desde el año 2001. Las dos plataformas, Vía Digital y Canal Satélite Digital, debido a las pérdidas que han tenido en años anteriores, se han fusionado creando Digital+. Sus mayores ingresos los obtienen de la retransmisión en directo de eventos deportivos, especialmente el fútbol.

### *Formatos*

Todas las variantes de televisión digital pueden emitir tanto en definición estándar como en alta definición HDTV (High Definition Television).

Todos los estándares para la televisión de definición estándar son de naturaleza analógica y muchas de las estructuras de los sistemas de la televisión digital de definición estándar provienen de la necesidad de ser compatibles con la televisión analógica y en particular, el escaneado interlineado (o exploración entrelazada), que es un legado de la antigua televisión analógica.

Durante el desarrollo de la televisión digital se intentó evitar la fragmentación del mercado mundial en diferentes estándares (como puedan ser PAL, SECAM, NTSC). En cualquier caso, de nuevo no hubo acuerdos acerca de una norma única y actualmente existen tres normas mayoritarias: el sistema europeo DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial, en castellano Difusión de Video Digital - Terrestre), el estadounidense ATSC (Advanced Television System Committee), y el sistema japonés ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting o Transmisión Digital de Servicios Integrados) . En el caso de la televisión por cable coaxial, además de los estándares ATSC, se utiliza el estándar o norma SCTE para metadatos fuera de banda.

Muchos países han adoptado el DVB, pero otros tantos han seguido el ATSC (Canadá, México, Corea del Sur). Corea ha adoptado el estándar chino S-DMB para teledifusión móvil por satélite.

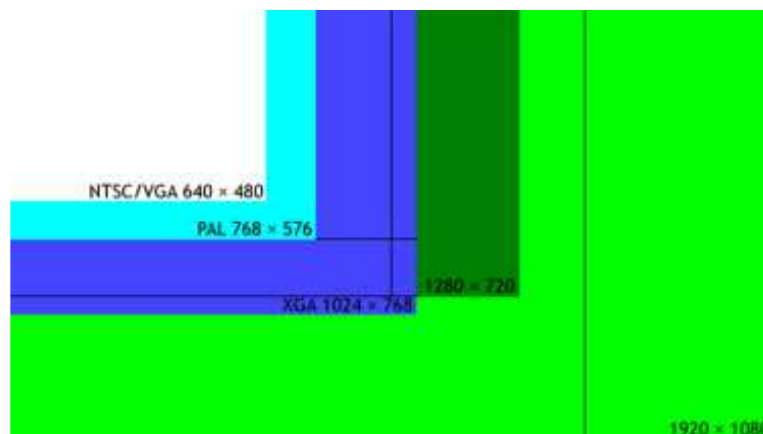
En el futuro, podría haber otros formatos de vídeo digital en alta resolución especializados para nuevas áreas de mercado. La norma Ultra High Definition Video (UHDV) es un formato propuesto por NHK en Japón que proporciona una resolución 16 veces mayor que la HDTV. (NHK es una de las cadenas de TV más conocidas de Japón).

## High-Definition TV

Corresponde al método de transmitir TV con más alta calidad de imagen disponible en DigitalTV. En los Estados Unidos, los formatos de 1080i y 720p en la razón de cuadro 16 x 9 se considera High-Definition (Alta-definición). HDTV se puede considerar como un componente de DTV. Normalmente se denota con las siglas HD.

La característica más importante es la mayor definición de imagen ofrecida por la HDTV comparada con los sistemas actuales. Si el sistema PAL utilizado en España ofrece una resolución de 768x576 píxeles, la HDTV puede utilizar dos resoluciones distintas: 1920x1080 y 1280x720 píxeles, siempre usando la proporción 16:9.

Estas resoluciones tan altas se consiguen enviando la señal comprimida mediante algún códec como MPEG-2 o H.264. El sonido se transmite con formato Dolby Digital y ofrece el popular 5.1 para aprovechar los sistemas de altavoces del Home Theater.



*Figura 70: Resoluciones en TV digital de los antiguos formatos de TV (NTSC y PAL) y el nuevo formato XGA.*

## 9.2 Una ruta con 2 respaldos (1:3).

Para calcular la indisponibilidad de la red se procede con 3 rutas (dos respaldos) entre los nodos VH, la idea es simplificar y obtener una aproximación adecuada de la verdadera indisponibilidad de la red. Se procederá con el cálculo para enlaces E1 -2Mb/s-.

Como se dijo en el capítulo 5,  $U_s$  (U del *switch*) es 1% y  $O_s$  (outages del *switch*) es 99[outages/year].

$U_A$

**Probabilidad de caminos(VH—VILCH—VLCMH) (MH con enlace en serie):**  
**aplicamos la ecuación (10) sin pensar en el switch, para enlace MH aplicamos la ecuación (8)<sup>3</sup>**

$$U_A \Rightarrow 20 \cdot (20+20+20+20) \times 10^{-8} * (20+20+20+fnTabla(13)+fnTabla(7)) \times 10^{-4}$$

=> pero considerando el switch entre cada par de nodos

$$\Rightarrow [20 \cdot (20+20+20+20) 10^{-8} + U_s] * (20+20+20+fnTabla(13)+fnTabla(7)) 10^{-4}$$

=> pero considerando el paralelo de tres enlaces como

=> el paralelo de dos enlaces con el paralelo de uno-sólo

=> para calcular "el switch"

$$= \{ [20 \cdot (20+20+20+20) + U_s] 10^{-8} * (20+20+20+40) 10^{-4} + U_s \}$$

$$= \{ [20 \cdot (3 \cdot 20+20) 10^{-8} + U_s] * [2 \cdot 20+20+40] 10^{-4} + U_s \}$$

$$= \{ (1600 + ,01) * (100) 10^{-12} + ,01 \}$$

$$= 160001 \times 10^{-12} + 0,01$$

$$\sim 0,01$$

$U_A$  es 0,01, luego la Disponibilidad se calcula como la probabilidad del complemento de la Indisponibilidad

<sup>3</sup>fnTabla refiere a la tabla sección 5.5

$$A=1-UA = 0,99 =99\%$$

Como se puede apreciar, no hay abundancia de 9s (2) en la cifra. Cabe resaltar que la Disponibilidad de las redes generalmente es cercana y límite-tendiente cuando aumenta su robustez a la cantidad de 100%, es decir, es cercana a la total disponibilidad, o a una red estable y/o fiable. La falta de nueves en la cifra por ciento es debido a que se consideraron los viejos enlaces E1 (2Mb/s) en vez de los modernos STM-16/64.

*OI*

Se procede a calcular el Outage OI para 3 caminos idénticos, por lo que se procederá con la ecuación (9)

#### **Outage intensity de tres caminos(VH-VILCH-VLCMH):<sup>4</sup>**

$$OI \Rightarrow [OI_{vh} * (3 \cdot 20+20) + OI_{vilch} * 20] * U^3 + OI_{vlcmh} * [U_s + 20 * (3 \cdot 20+20)]$$

$$\Rightarrow [OI_{vh} * (3 \cdot 20+20) + OI_{vilch} * 20] * [2 \cdot 20+20 + t_{bl}(13) + t_{bl}(7)] + OI_{vlcmh} * [U_s + 20 * (3 \cdot 20+20)]$$

=>pero considerando el switch entre cada par de nodos (todo)

$$= [OI_{vh} * (3 \cdot 20+20) + OI_{vilch} * 20 + OI_s] * [2 \cdot 20+20+40] + OI_{vlcmh} * [U_s + 20 * (3 \cdot 20+20)] + OI_s$$

$$= [25740x10^{-4} + OI_s] * 100x10^{-4} + 495 * (U_s + 1600x10^{-8}) + OI_s$$

$$= [25740x10^{-4} + OI_s] * 100x10^{-4} + 495 * (0,01 + 1600x10^{-8}) + OI_s$$

$$= 1,01 \cdot OI_s + 4,9837$$

OI es función lineal de OI del *switch* (*OIs*) que es un número mayor que cien [outages]<sup>\*</sup>, lo que es normal dentro de los intervalos típicos de fallas al año, luego el resultado es consecuente.

<sup>4</sup> Tbl refiere a la tabla Sección 5.5

\* Porque OI del switch se supone un número del orden de 100, y OI en la función está \* como mínimo por 1,01.

## 9.3 Ruta con 2 respaldos adaptado para interfaces STM-16/64.

### Primer caso: STM-16

UA

La tabla III mantiene sus valores, lo único que cambia son las indisponibilidades UA, las mismas que se calcularon antes pero elevadas a "1250" según el 4to párrafo de la sección 5.6.1. Esto es una aplicación directa de la ecuación (16).  $U_s = 0,01\%$

**Probabilidad de caminos(VH—VILCH—VLCMH) (MH con enlace en serie):**

**aplicamos la ecuación (10) sin considerar en el switch, para enlace MH aplicamos la ecuación (8), y aplica ecuación (14) para cada '20'<sup>5</sup>**

$$\begin{aligned}
 UA \Rightarrow & 20^{1250} * (20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250}) \times 10^{-8 \cdot 1250} * ( \\
 & 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + fnTabla(13)^{1250} + fnTabla(7)^{1250} ) \times 10^{-4 \cdot 1250} \\
 \Rightarrow & \text{pero considerando el switch entre cada par de nodos} \\
 \Rightarrow & [20^{1250} * (20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250}) \times 10^{-8 \cdot 1250} + U_s] * ( \\
 & 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + 2 \cdot 20^{1250} ) \times 10^{-4 \cdot 1250} \\
 \Rightarrow & \text{pero considerando el paralelo de tres enlaces como} \\
 \Rightarrow & \text{el paralelo de dos enlaces con el paralelo de uno-sólo} \\
 \Rightarrow & \text{para calcular "el switch"} \\
 = \{ & [20^{1250} * (20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250}) \times 10^{-8 \cdot 1250} + U_s] * ( \\
 & 20^{1250} + 20^{1250} + 20^{1250} + 2 \cdot 20^{1250} ) \times 10^{-4 \cdot 1250} + U_s \} \\
 = \{ & [20^{1250} * (4 \cdot 20^{1250}) \times 10^{-8 \cdot 1250} + U_s] * [5 \cdot 20^{1250}] \times 10^{-4 \cdot 1250} + U_s \} \\
 = \{ & (2 * 2 * 2^{2500} \times 10^{-7500} + 0,0001) * (5 * 2^{1250}) \times 10^{-(3 \cdot 1250)} + 0,0001 \} \\
 \approx & \{ (0 + 0,0001) * 0 + 0,0001 \} \\
 \approx & 0,0001
 \end{aligned}$$

Luego la disponibilidad según la ecuación (6) es de

<sup>5</sup> FnTabla refiere a la tabla sección 5.5

$$A = 99,99\%$$

OI

También cambian los Outage Intensity. Cada OI entre cada par de nodos cambia su número mediante el uso de la ecuación (17)

**Outage intensity de tres caminos(VH-VILCH-VLCMH):<sup>6</sup>**

$$\begin{aligned} OI &=> [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{1250}) + OI_{vilch} * 20^{1250}] * U_3 + OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{1250} * (4 \cdot 20^{1250})] \\ &=> [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{1250}) + OI_{vilch} * 20^{1250}] * [4 \cdot 20^{1250} + t_{bl}(13) + t_{bl}(7)] \\ &+ OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{1250} * (4 \cdot 20^{1250})] \\ &=> \text{pero considerando el switch entre cada par de nodos (todo)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{1250} \cdot 10^{-4 \cdot 1250}) + OI_{vilch} * 20^{1250} \cdot 10^{-4 \cdot 1250} + OI_s] * \\ &[6 \cdot 20^{1250} \cdot 10^{-4 \cdot 1250}] \\ &+ OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{1250} \cdot 10^{-4 \cdot 1250} * (4 \cdot 20^{1250} \cdot 10^{-4 \cdot 1250})] + OI_s \\ &= [0 + 0 + OI_s] * [0] + OI_{vlcmh} * (U_s + 0 * 0) + OI_s \\ &= 0 + OI_{vlcmh} * U_s + OI_s \\ &= OI_{vlcmh} * U_s + OI_s \end{aligned}$$

Olab según la ecuación (17) es (O=99)

$$OI_{lab} \approx 0 \cdot 99 \cdot 1250$$

La cual lleva un factor cero (0) por la pequeñez del término UA frente al término OI discutida en el quinto párrafo de la sección 5.6.2. Luego:

OI entre cada par de tramos  $\approx 0$ , por ende, los tramos  $OI_{vlcmh} \approx 0$

En aproximación, hemos llegado a que son sólo relevantes las caídas que proporciona el *switch*.

$$OI \approx OI_s$$

---

<sup>6</sup> Tbl refiere a la tabla sección 5.5



El *switch* WSS es el único responsable de la multiplicidad de caídas (en un año) de la red de la Figura 39 dado que no son significativos los aportes de los enlaces.

En la práctica, la disponibilidad de los *switch* es cercana a la unidad (100%) dado que poseen redundancia de la información y su fiabilidad es elevada (los fabricantes los diseñan con mucha fiabilidad en el punto de operación en que funcionan).

## Segundo caso STM-64

UA

La tabla III mantiene sus valores, lo único que cambia son las indisponibilidades UA, las mismas que se calcularon antes pero elevadas a "5000" según el 4to párrafo de la sección 5.6.1. Esto es una aplicación directa de la ecuación (16).  $U_s = 0,01\%$

**Probabilidad de caminos(VH—VILCH—VLCMH) (MH con enlace en serie):**

**aplicamos la ecuación (10) sin considerar en el *switch*, para enlace MH aplicamos la ecuación (8), y aplica ecuación (14) para cada '20'<sup>7</sup>**

$$\begin{aligned}
 UA &\Rightarrow 20^{5000} * (20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000}) \times 10^{-8 \cdot 5000} * ( \\
 &20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + fnTabla(13)^{5000} + fnTabla(7)^{5000} ) \times 10^{-4 \cdot 5000} \\
 &\Rightarrow \text{pero considerando el switch entre cada par de nodos} \\
 &\Rightarrow [20^{5000} * (20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000}) \times 10^{-8 \cdot 5000} + U_s] * ( \\
 &20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + 2 \cdot 20^{5000} ) \times 10^{-4 \cdot 5000} \\
 &\Rightarrow \text{pero considerando el paralelo de tres enlaces como} \\
 &\Rightarrow \text{el paralelo de dos enlaces con el paralelo de uno-sólo} \\
 &\Rightarrow \text{para calcular "el switch"} \\
 &= \{ [20^{5000} * (20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000}) \times 10^{-8 \cdot 5000} + U_s] * ( \\
 &20^{5000} + 20^{5000} + 20^{5000} + 2 \cdot 20^{5000} ) \times 10^{-4 \cdot 5000} + U_s \} \\
 &= \{ [20^{5000} * (4 \cdot 20^{5000}) \times 10^{-8 \cdot 5000} + U_s] * [5 \cdot 20^{5000}] \times 10^{-4 \cdot 5000} + U_s \} \\
 &= \{ (2 \cdot 2 \cdot 2^{10000} \times 10^{-30000} + 0,0001) * (5 \cdot 2^{5000}) \times 10^{-3 \cdot 5000} + 0,0001 \}
 \end{aligned}$$

<sup>7</sup> FnTabla refiere a la tabla sección 5.5

$$\approx \{ (0 + 0,0001) * 0 + 0,0001 \}$$

$$\approx 0,0001$$

Luego la disponibilidad según la ecuación (6) es de

$$A = 99,99\%$$

*OI*

También cambian los Outage Intensity. Cada OI entre cada par de nodos cambia su número mediante el uso de la ecuación (17)

**Outage intensity de tres caminos(VH-VILCH-VLCMH):<sup>8</sup>**

$$OI \Rightarrow [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{5000}) + OI_{vilch} * 20^{5000}] * U_3 + OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{5000} * (4 \cdot 20^{5000})]$$

$$\Rightarrow [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{5000}) + OI_{vilch} * 20^{5000}] * [4 \cdot 20^{5000} + t_{bl}(13) + t_{bl}(7)]$$

$$+ OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{5000} * (4 \cdot 20^{5000})]$$

$\Rightarrow$  pero considerando el switch entre cada par de nodos (todo)

$$= [OI_{vh} * (4 \cdot 20^{5000} \cdot 10^{-4 \cdot 5000}) + OI_{vilch} * 20^{5000} \cdot 10^{-4 \cdot 5000} + OI_s] * [6 \cdot 20^{5000} \cdot 10^{-4 \cdot 5000}]$$

$$+ OI_{vlcmh} * [U_s + 20^{5000} \cdot 10^{-4 \cdot 5000} * (4 \cdot 20^{5000} \cdot 10^{-4 \cdot 5000})] + OI_s$$

$$= [0 + 0 + OI_s] * [0] + OI_{vlcmh} * (U_s + 0 * 0) + OI_s$$

$$= 0 + OI_{vlcmh} * U_s + OI_s$$

$$= OI_{vlcmh} * U_s + OI_s$$

Olab según la ecuación (17) es (O=99)

$$OI_{lab} \approx 0,99 \cdot 5000$$

La cual lleva un factor cero (0) por la pequeñez del término UA frente al término OI discutida en el quinto párrafo de la sección 5.6.2. Luego:

OI entre cada par de tramos  $\approx 0$ , por ende,  
los tramos  $OI_{vlcmh} \approx 0$

En aproximación, hemos llegado a que son sólo relevantes las caídas que proporciona el *switch*.

---

<sup>8</sup> Tbl refiere a la tabla sección 5.5

$0I \approx 0I_s$

El *switch* WSS es el único responsable de la multiplicidad de caídas (en un año) de la red de la Figura 39 dado que no son significativos los aportes de los enlaces.

En la práctica, la disponibilidad de los *switch* es cercana a la unidad (100%) dado que poseen redundancia de la información y su fiabilidad es elevada (los fabricantes los diseñan con mucha fiabilidad en el punto de operación en que funcionan).

## 9.4 Heurísticas de redes

### 9.4.1 Proceso de normalización

Toda fdp  $\lambda(t)$  debe cumplir con (25)

$$\int_0^T \lambda(t) dt = 1 \quad (25)$$

Luego  $\lambda(t)$  debe ser multiplicado por una constante de normalización alfa y aplicar el nuevo  $\lambda$  a la ecuación anterior (25) con el fin de descubrir de la ecuación la constante alfa y tener la nueva función  $\lambda$  normalizada.

Esto implica ponderar la función por un número alfa e integrarla sobre todo su dominio temporal, lo que implica que es una integral sobre puntos discretos y no sobre una función continua. Por esta razón se hace uso de la siguiente fórmula de integración numérica:

$$\int_{[k,k+1]} \lambda dt = \left( \frac{\lambda_{k+1} + \lambda_k}{2} \right) \times (t_{k+1} - t_k) \quad (26)$$

Que es equivalente a la fórmula del trapecio.

Toda curva de la bañera cuya integral no sume 1 se le aplicará el proceso de normalización.

### 9.4.2 Cálculos proyectivos de las redes y curvas de Weibull.

La deducción de la fórmula que obtiene el valor medio temporal de A empieza con la ecuación (24):

$$\lambda = \frac{1-A}{MTTR}$$
$$A(t) = 1 - \lambda(t)MTTR$$

Integrando la ecuación anterior entre  $t_1$  y  $t_2$  cualquiera, y dividiendo por  $t_2 - t_1$  (largo del intervalo) se obtiene:

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = 1 - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\lambda(t) \cdot MTTR) dt \quad (27)$$

### Aumento de enlaces de la red.

La curva normalizada de la bañera se muestra en la Figura 71. A simple vista, no se notan cambios apreciables con respecto a la curva normalizada del caso de 5 nodos, sin embargo ésta curva está escalada con respecto a su original (más pequeña).

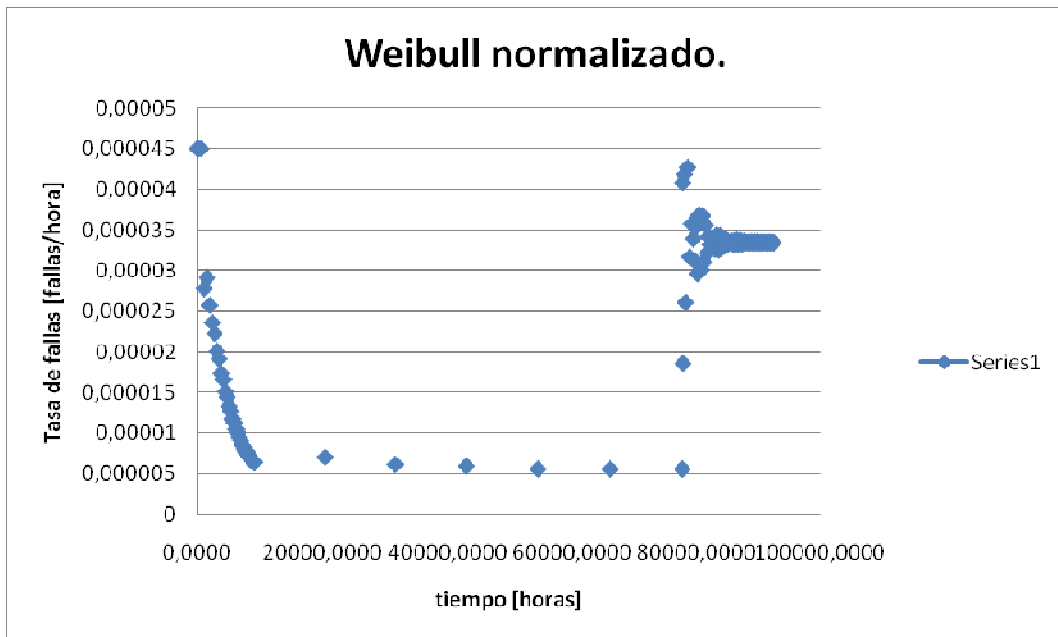


Figura 71: Resultado de gráfico lambda versus tiempo normalizado para la red de 7 nodos.

### Red nacional con enlaces por sobre 4000 Km.

La curva normalizada de la bañera se muestra en la Figura 72. Como se puede apreciar, ha cambiado dramáticamente con respecto a la curva original. El aspecto plano de la "zona de vida útil" es distinto mostrando claros contenidos de la falla de grado 2 en los primeros instantes (por el punto desviado de la media que se puede apreciar).

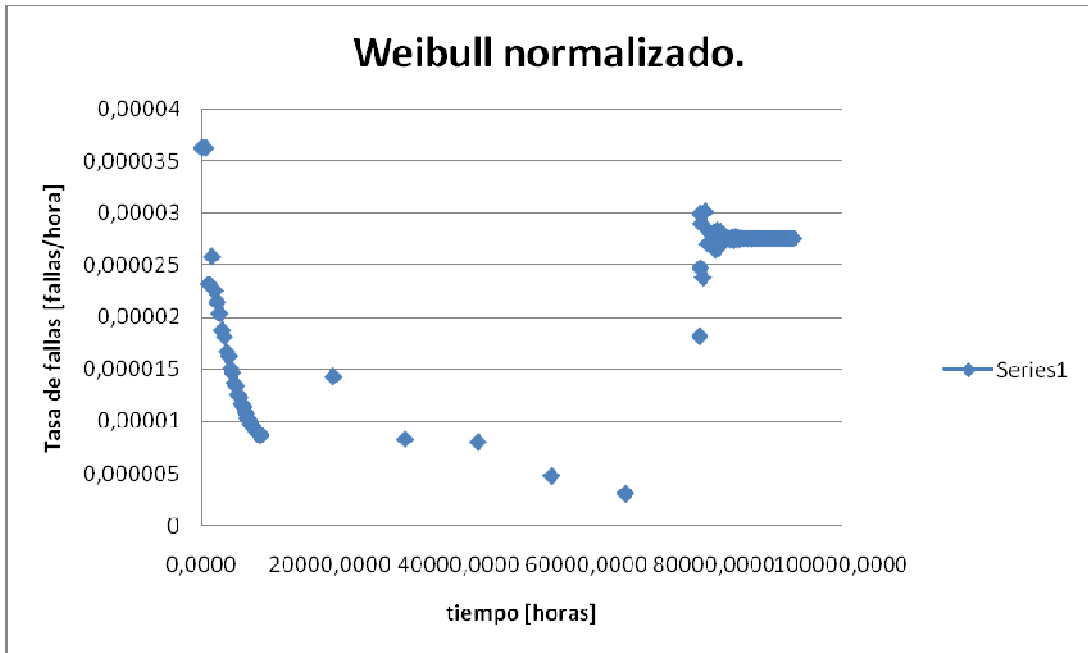


Figura 72: Resultado de gráfico lambda vs. tiempo normalizado de la red Telefónica de EEUU.

**Red nacional con enlaces bajo los 4000 Km.**

La curva normalizada de la bañera se muestra en la Figura 73. Como se puede apreciar, ha cambiado dramáticamente con respecto a la curva original. El aspecto plano de la “zona de vida útil” es distinto, mostrando claros vaivenes u oscilaciones en torno a un valor medio de tasa de fallas.

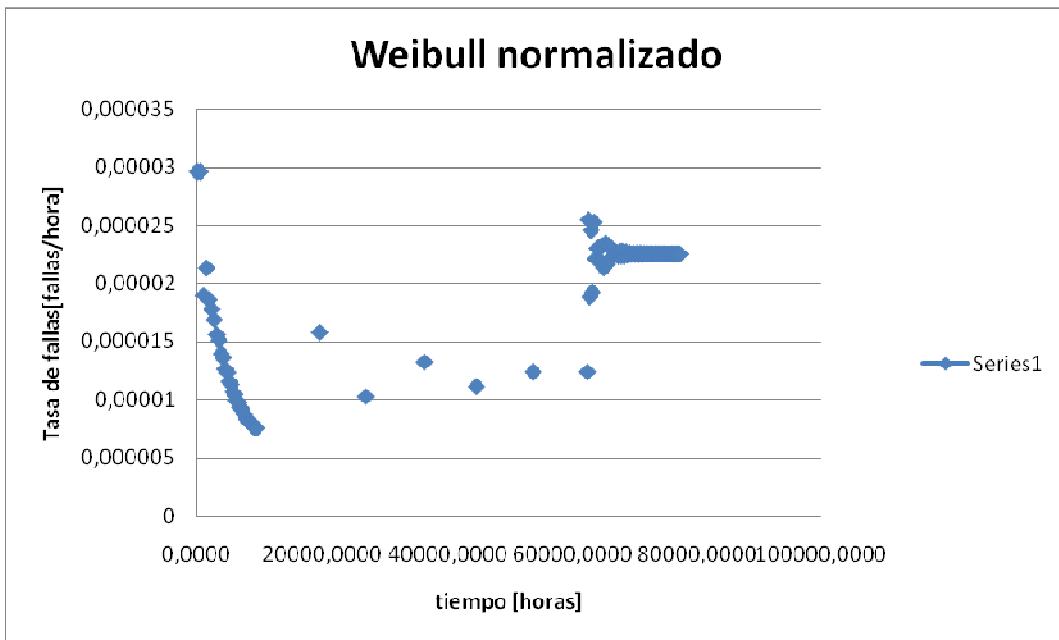


Figura 73: Resultado de gráfico lambda vs. tiempo normalizado de la red NTFS.

## 9.5 Cadenas de Markov

### 9.5.1 Definición de las cadenas de Markov

En matemáticas se define la cadena de Markov como un proceso estocástico discreto que cumple con la propiedad de Markov, es decir, si se conoce la historia del sistema hasta su instante actual, su estado presente resume toda la información relevante para describir en probabilidad su estado futuro.

Una cadena de Markov es una secuencia  $X_1, X_2, X_3, \dots$  de variables aleatorias. El intervalo de estas variables, es llamado espacio de estado, el valor de  $X_n$  es el estado del proceso en el tiempo  $n$ . Si la distribución de probabilidad condicional de  $X_{n+1}$  en estados pasados es una función de  $X_n$  por sí sola, entonces:

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} / X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_2 = x_2, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x_{n+1} / X_n = x_n)$$

Donde  $x_i$  es el estado del proceso en el instante  $i$ . La identidad mostrada es la propiedad de Markov.

### 9.5.2 Matriz de Transición

Sea un sistema que puede tomar un cierto número de estados  $E_0, E_1, \dots, E_k, \dots$ , los cambios de estado tienen lugar en tiempos determinados  $0, 1, 2, \dots, n, \dots$ . Si es  $p_k(n)$  la probabilidad de estado en el tiempo  $(n)$ , se puede representar el estado del sistema en el tiempo  $n$  mediante un vector de estado:

$$\vec{p}(n) = [p_0(n), p_1(n), p_2(n) \dots p_k(n) \dots] \quad (28)$$

Sea la probabilidad de transición de estados  $p_{ij}$  ( $E_i \rightarrow E_j$ ), luego se constatará que:

$$\vec{p}(n+1) = [p_0(n) p_1(n) \dots p_i(n) \dots] \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots & p_{0j} & \dots \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{i0} & p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{ij} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (29)$$

Donde la matriz en el producto matricial es la Matriz de Transición de Estados, e  $i$  representa el estado primero (fila) y  $j$  el estado siguiente (columna).

Ya que la matriz en cuestión se puede representar por la letra  $M$ , el vector de estado en el tiempo  $n+1$  será:

$$\vec{p}(n+1) = \vec{p}(n)M \quad (30)$$

Lo que interpreta a la matriz  $M$  como un “transformador de estados” (desde el estado primero al estado siguiente). Para calcular el vector de estado en cualquier  $n$  se usa:

$$\vec{p}(n) = \vec{p}(0)M^n \quad (31)$$

Además, para todo  $p(n)$ , se cumple por ley de probabilidades que

$$\sum_{k=0}^N p_k(n) = 1 \quad (32)$$

Y finalmente, como todas las probabilidades de transiciones de estado son probabilidades, se cumple que:

$$\sum_{j=0}^N p_{ij}(n) = 1 \quad (33)$$

Puesto que según la propiedad de Markov, son probabilidades condicionales a condición igual.

### 9.5.3 El modelo Markoviano exponencial de tiempo continuo.

Es un proceso de Markov de tiempo continuo que contempla el uso de la función de probabilidad acumulada de la mínima duración de los estados de Markov como aparece en la siguiente ecuación que plantea y demuestra Jasper Van Casteren[20]:

$$F_i(t) = \Pr(\min_{j=1}^N (D_{ij}) \leq t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (34)$$



Donde  $D_{ij}$  es la duración de los intervalos entre pasar desde el estado  $i$  al estado  $j$ .  $\lambda_i$  es **la duración media del intervalo que pasa de  $i$  a cualquier estado diferente de  $i$** [20]

$$E\{D_i\} = \lambda_i \tag{35}$$

$D_{ij}$  es una variable aleatoria con distribución exponencial y es por esa razón que aparecen las exponenciales en la ecuación (34).

Con todo, cada estado  $i$  tiene una duración  $\lambda_i$  que será el representante del tiempo entre estado  $i$  del sistema Markoviano.

Además puede ser encontrada con las hipótesis que se ven en la sección 6.3.

# 10 Referencias

## Capítulo 3

- [1] Peña Z., Paulina; “Estudio de arquitecturas para convergencias de telefonía fija-móvil” Memoria de Ingeniero, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006
- [2] Acterna; SDH Pocket guide, Vol1. Acterna
- [3] Tanenbaum S., Andrew; “Redes de computadores”. (Tercera edición) , Amsterdam: Prentice Hall, Adisson Wesley, Pearson Education
- [4] Internet; “Generalized Multiprotocol Label Switching”, Enero 2007. [online]. Disponible: [www.iec.org/online/tutorials/gmpls](http://www.iec.org/online/tutorials/gmpls)

## Capítulo 4

- [5] RAD; “Introduction to G.805”. RAD.
- [6] GMPLS, Internet, layer 2; “MPLS stack software, a mechanism for packet forwarding in network routers”. [online]. Available: <http://www.metaswitch.com/mpls/what-is-mpls.aspx>
- [7] HUAWEI, “Huawei Roadm”, HUAWEI
- [8] optical EXPO 2008, “Optical switching revival: innovations & applications”, optical EXPO 2008.
- [9] OPTIX, “10 Reconfigurable Optical Add and Drop Multiplexing Unit”, OPTIX
- [10] CIENA, “ROADMs in network architectures”, CIENA.
- [11] HUAWEI, “Entel OTN&WDM ASON Network -OptiX OSN 6800 Solution”, HUAWEI

## Capítulo 5

- [12] R. Barlow y F. Proschan, “Availability theory for multicomponent systems”, 1972
- [13] Fawzi E., Hawkes, “Availability of a series system with warm spares”, 1994.
- [14] Tanenbaum S., Andrew, “Redes de computadores”. Tercera edición, Amsterdam: Prentice Hall, Adisson Wesley, Pearson Education

- [15] Reliability, and availability, “Reliability and availability basics”. Available:  
[http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/FaultHandling/reliability\\_availability\\_basics.htm](http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/FaultHandling/reliability_availability_basics.htm)
- [16] European Standard, “Availability performance of path elements of international digital paths”, EN 300 416 v1.2.1 NA, January 1998.

## Capítulo 6

- [17] Heuristic, “Heuristic analysis –detecting unknown viruses–”, april 2009. [online] Available:  
<http://whitepapers.zdnet.com/abstract.aspx?docid=1014053>
- [18] M. To and P. Neusy, “Unavailability analysis of long haul networks”. IEEE JSAC, 12(1), January 1994.
- [19] Abernethy, Robert B. “The new Weibull handbook”. Fifth edition, Florida: Act.
- [20] Van Casteren, Jasper, “Power system reliability assessment using the Weibull-Markov model”, 2001.
- [21] European Standard, “Availability performance of path elements of international digital paths”, EN 300 416 v1.2.1 NA, January 1998.

## Anexos

- [22] Computation, internet, IP, “Checksum”, January 1990. [online]. Available: <http://www.flounder.com/checksum.htm>
- [23] Castells, M. “La Galaxia Internet - Reflexiones sobre Internet, empresa y sociedad”, Barcelona (Plaza & Janés) 2001
- [24] Echeverría, J. “Los Señores del aire: Telépolis y el Tercer Entorno”, Barcelona (Destino) 1999
- [25] Puentes, P. “Análisis del movimiento en la Red”. Mérida - Venezuela (CIDIAT) 2008
- [26] Televisión, sistemas digitales, señales, “Televisión digital”, Septiembre 2009. [online]. Disponible:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Televisi3n\\_digital](http://es.wikipedia.org/wiki/Televisi3n_digital)
- [27] Televisión, sistemas digitales, señales, “High-Definition Television” Septiembre 2009. [online]. Disponible:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/High\\_Definition\\_Televisi3n](http://es.wikipedia.org/wiki/High_Definition_Televisi3n)
- [28] Telefonía, ToIP, internet, IP, “Descripción técnica detallada sobre Voz sobre IP”, Septiembre 2009. [online]. Disponible:  
[http://www.monografias.com/trabajos11/descripip/descripip.shtml?mono\\_search](http://www.monografias.com/trabajos11/descripip/descripip.shtml?mono_search)

- [29] Telefonía, ToIP, internet, IP, “VoIP voz sobre IP” [online].  
Disponible: <http://www.voipes.info/>
- [30] Tanenbaum S., Andrew, “Redes de computadores”. Tercera edición, Amsterdam: Prentice Hall, Adisson Wesley, Pearson Education