

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



OPTIMIZACION DE LA FIBRA OPTICA NACIONAL PARA SOPORTAR ALTAS VELOCIDADES

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

JUAN FRANCISCO SALVATIERRA CHIRINOS

**PROMOCIÓN
1980- I**

**LIMA – PERÚ
2010**

**OPTIMIZACION DE LA FIBRA OPTICA NACIONAL PARA
SOPORTAR ALTAS VELOCIDADES**

A mis queridos padres, quienes gozan de la gloria de Dios; a Rosa el gran amor de mi vida y a mis adorados hijos Juan y Agatha.

SUMARIO

En el presente informe de suficiencia trata de la problemática de las redes de telecomunicaciones por fibra óptica que deben migrar a velocidades de transmisión por encima de 2.5 Gbps y que se ven limitadas por la característica de transmisión denominada Dispersión de Modo de Polarización (PMD).

Dado que en la actualidad las velocidades de transmisión de los sistemas por fibra óptica están en el rango de 10 Gbps a 40 Gbps; cobra mayor importancia el hecho que las operadoras de telecomunicaciones deseen migrar a dichas velocidades para hacer frente a la creciente demanda de sus usuarios por nuevos servicios y mayores velocidades de acceso.

En tal sentido se plantea el marco teórico de la transmisión por fibra óptica, con un enfoque especial en el estudio de la PMD; para luego poder explicar el comportamiento de la fibra óptica nacional del sur del país en el proceso de su migración de velocidad de 2.5 Gbps a 10 Gbps. Por lo que se concluye que la causa principal que limita el incremento de la velocidad es la PMD.

Seguidamente se asocia la PMD con los factores relacionados a la fabricación de la fibra óptica, a su instalación, a su operación y a su mantenimiento.

Finalmente se establecen las alternativas para resolver dicha problemática, las que están asociadas a la administración de las fibras con menor PMD, al reemplazo del cable de fibra óptica o a la inserción de equipos regeneradores.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	
1.1 Introducción	2
1.2 Sistemas de transmisión por fibra óptica	3
1.2.1 Sistema básico de transmisión	3
1.2.2 Ventajas y desventajas de un sistema de transmisión por fibra óptica	4
1.2.3 Principales aplicaciones	6
1.3 La fibra óptica	8
1.3.1 Estructura física de la fibra óptica	9
1.3.2 Propagación de luz en la fibra óptica	10
1.3.3 Tipos de fibra óptica	11
1.4 Fabricación de la fibra óptica	12
1.5 Características de transmisión	14
1.5.1 Absorción energética	15
1.5.2 Dispersión energética	15
1.5.3 Ventanas de transmisión	16
1.5.4 Dispersión temporal	18
1.5.5 Ecuaciones principales	19
1.6 El cable de fibra óptica	21
1.6.1 Especificaciones típicas	23
1.7 Dispositivos de fibra óptica	24
1.7.1 Emisores ópticos	24
1.7.2 Receptores ópticos	25
1.7.3 Amplificadores ópticos	26
1.8 Instalación de la fibra óptica	26
1.8.1 Tendido	27
1.8.2 Empalmes	27

1.8.3	Conexionado	28
1.9	Pruebas típicas de la fibra óptica	29
1.9.1	Atenuación	29
1.9.2	Retro esparcimiento	30
1.10	La multiplexación óptica	31
1.10.1	WDM	31
1.11	La dispersión de modo de polarización (PMD)	34
1.12	Regeneradores	39
1.12.1	Regeneradores electrónicos	39
1.12.2	Regeneradores ópticos	40
CAPITULO II		
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA		
2.1	Introducción	43
2.2	Descripción del problema	44
2.2.1	Aspectos a considerar	44
2.2.2	Formulación del problema	48
2.3	Objetivos del trabajo	50
2.4	Justificación	50
2.4.1	Conveniencia del informe	51
2.4.2	Aportes	51
2.5	Limitaciones del trabajo	51
2.5.1	Limitaciones geográficas	52
2.5.2	Limitaciones en equipamiento	52
2.5.3	Limitaciones operativas	52
2.5.4	Limitaciones financieras	52
2.5.5	Limitaciones de tiempo	53
2.6	Síntesis del trabajo	53
CAPITULO III		
METODOLOGIA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA		
3.1	Introducción	54
3.1.1	Precisión del problema	55
3.2	Alternativas de solución	57
3.2.1	Identificar fibras con menor coeficiente PMD	57

3.2.2	Instalación de regeneradores ópticos e incrementar los canales DWDM	58
3.2.3	Tendido de nuevo portador óptico	58
3.2.4	Instalación de equipos y regeneradores 3R con modulación QPSK	59
3.2.5	Alquiler de fibras oscuras a portador de telecomunicaciones	59
3.3	Solución al problema	59
3.3.1	Solución de corto plazo	59
3.3.2	Solución de largo plazo	61
3.4	Recursos humanos y equipamiento	62
CAPITULO IV		
ANALISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS		
4.1	Introducción	64
4.2	Análisis descriptivo y estadístico de la información relativa a las variables de estudio	64
4.3	Análisis teórico de los datos y resultados obtenidos en relación con las bases teóricas de la investigación.	65
4.4	Análisis de la asociación de variables y resumen de las apreciaciones relevantes que produce.	66
4.5	Presupuesto y tiempo de ejecución.	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		69
BIBLIOGRAFÍA		71

INTRODUCCION

El desarrollo de la sociedad de información requiere de una infraestructura de telecomunicaciones que tenga una gran capacidad de transmisión y pueda además soportar altas velocidades. En el Perú los operadores de servicios de telecomunicaciones han instalado a lo largo del país una red de fibra óptica. La instalación de esta infraestructura está dando lugar a que las ciudades, sobre todo de la zona costera, tengan mayores facilidades en el proceso de integración social y crecimiento económico. Por lo que se espera que en el mediano plazo por la red nacional de fibra óptica se puedan cursar velocidades por encima de 40 Gbps.

Si bien es cierto que la fibra óptica, como medio de transmisión, puede soportar altas velocidades; estas vienen condicionadas por la calidad de su fabricación, su instalación, su operación y del mantenimiento. Es el caso de algunos operadores de servicios de telecomunicaciones, que en su intención de atender la demanda creciente de sus usuarios por servicios de mayores velocidades denominados comúnmente de banda ancha, están teniendo problemas técnicos al momento de migrar sus sistemas de transmisión a otros de mayor velocidad.

El presente informe de suficiencia describe los diferentes factores que influyen en la velocidad de operación de los sistemas de transmisión por fibra óptica, enfocando su atención al medio de transmisión conocido también como fibra óptica nacional. En ella prestamos especial atención a la evaluación de los parámetros de transmisión de la fibra óptica, tales como el retardo de grupo o la dispersión de modo de polarización (PMD), ya que estos parámetros resultan críticos cuando se desea establecer velocidades de transmisión por encima de los 10 Gbps.

Asimismo se plantean las alternativas de solución para que la fibra óptica nacional pueda cursar velocidades por encima de los 40 Gbps. Estas pueden darse tanto en el propio medio de transmisión físico, así como en las interfaces con los equipos de transmisión y en el propio equipo de transmisión.

CAPITULO I

MARCO TEORICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

La transmisión por fibras ópticas ha revolucionado el sector de las telecomunicaciones. Desde la década de los 70s se tenía una gran preocupación en el sentido de que era muy difícil transmitir a grandes distancias con un gran ancho de banda. Las redes locales de ese entonces estaban constituidas por cables de hilos de cobre o por cables coaxiales, mientras que las redes de transporte eran a través de radio enlaces terrestres o satelitales.

Mientras tanto las empresas y usuarios en general demandaban mayor capacidad de procesamiento en sus sistemas informáticos y por supuesto la capacidad de compartir información en tiempo real. Esta situación ha presionado la necesidad de incrementar la velocidad y la capacidad de transmisión de la infraestructura de telecomunicaciones que soportan los servicios de voz, datos y video.

Es así que el desarrollo de un medio de transmisión totalmente diferente, a través de hilos de vidrio, se constituye en el foco principal y de esta manera el sector de las telecomunicaciones de un gran paso adelante.

La fibra óptica aprovecha las características de propagación de la luz, para convertirse en una portadora de señales de telecomunicaciones con una gran capacidad de información. Sin embargo también trae consigo tener en cuenta sus características de propagación como la atenuación y dispersión, que condicionan la transmisión.

Por otro lado viene consigo una tecnología para las fuentes y receptores de luz. En tal sentido se desarrollan distintos emisores como son los diodos láser y los diodos emisores de luz (LED), así mismo los receptores como son el fotodiodo tipo avalancha APD o el receptor PIN-FET.

La anterior va de la mano con el desarrollo de los sistemas de transmisión digital, de tal modo que las redes SONET, PDH, SDH, ATM, etc. se convierten en los modelos dominantes en la industria.

En la mayoría de los países, la superficie terrestre en todas direcciones de sus respectivos territorios nacionales; han dado paso a una súper carretera de la información, en la que la fibra óptica se convierte en la columna vertebral de las comunicaciones interconectando ciudades, regiones, países y continentes. Por otro lado en las propias ciudades la fibra óptica se convierte en el medio preferido para distribuir datos y video, llegando hasta el domicilio de los usuarios en un caso o acortando la longitud del “bucle” de los usuarios.

Sin embargo este medio de transmisión, al estar en la vía pública en grandes extensiones requiere del sumo cuidado para evitar interrupciones. Por lo que se desarrollan tecnologías y procedimientos especiales para su instalación y mantenimiento.

1.2 Sistemas de transmisión por fibra óptica

Los sistemas de transmisión por fibra óptica cursan informaciones a través de una portadora luminosa que opera a muy altas frecuencias. Si tomamos como referencia las ondas de radio que trabajan en la banda de 1Ghz, similares a las que transportan las redes coaxiales de video últimamente, las ondas de luz lo hacen a una frecuencia de 200 mil veces (1). Es decir las fibras ópticas cursan frecuencias del orden 2×10^{14} Hz y que corresponden al espectro visible con una longitud de onda de 1500 nm.

Esta naturaleza peculiar motiva estudiar de manera particular los sistemas de transmisión por fibra óptica y se pretende compararla con los sistemas ya conocidos.

1.2.1 Sistema básico de transmisión

Los sistemas de transmisión por fibra óptica son similares a los sistemas convencionales de telecomunicaciones. En la figura 1.1 se muestra el esquema básico unidireccional, donde se puede apreciar como:

- a) La señal eléctrica de entrada es convertida en una señal óptica a través de un convertidor electro óptico (E/O), denominado también transmisor óptico.
- b) La señal óptica viaja a través del medio de transmisión (cable de fibra óptica). En su trayecto debe empalmarse con otros tramos o secciones de cable y luego conectarse a las terminaciones.
- c) En el lado receptor la señal óptica es transformada en una señal eléctrica a través de un conversor óptico eléctrico (O/E).

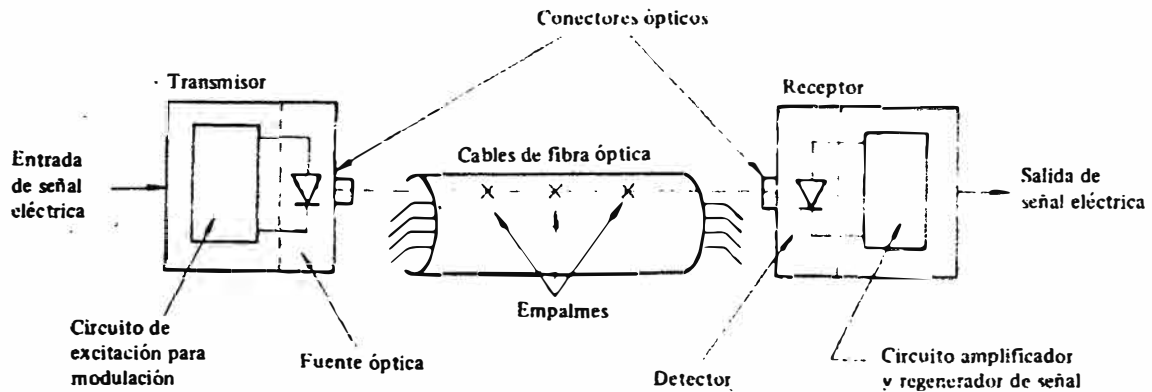


Figura 1.1 Esquema básico de un sistema de fibra óptica (2)

1.2.2 Ventajas y desventajas de un sistema de transmisión por fibra óptica

Los sistemas de transmisión por fibra óptica presentan atributos que los hacen atractivos para su implementación, respecto de los sistemas convencionales. De igual manera hay otros que hay que tenerlos en consideración, ya que generan un riesgo a tomar en cuenta (3).

a) Ventajas

a1) Mayor capacidad de información: Esta particularidad la hace atractiva para transmitir múltiples señales de voz, datos y vídeo con un gran ancho de banda o una muy alta tasa de bits (bit rate). En la actualidad los enlaces están en el orden de los 10 a 40 Gbps.

a2) Menor atenuación: Dado que trabaja a muy altas frecuencias o su equivalente a longitudes de onda muy pequeñas. En las ventanas establecidas es posible pasar señales con bajas atenuaciones por kilómetro de cable. En el caso de la tercera ventana de 1550 nm, la atenuación es de 0.25 dB/Km.

a3) Inmunidad a la interferencia: Las señales de luz no sufren alteraciones debido a las interferencias electromagnéticas de radiofrecuencia o al ruido.

a4) Excelente aislamiento eléctrico: Dado que la fibra está fabricada de un material dieléctrico como es el vidrio, este no genera conducción eléctrica en caso de contacto con una red de energía eléctrica.

a5) Mayor seguridad para la información: Al tratarse de señales luminosas es muy difícil interceptar o interferir las comunicaciones y violar el secreto de las telecomunicaciones y los datos de los usuarios.

a6) Menores costos de instalación, operación y mantenimiento: Al crecer la demanda por este tipo de infraestructura, los precios de la propia fibra óptica y equipos de transmi-

sión están bajando significativamente. De igual manera al ser una infraestructura más versátil la operación y el mantenimiento se hace más sencilla y no genera gastos mayores respecto de los sistemas de transmisión convencionales.

a7) Mayor calidad del servicio: Al tener menor atenuación, mayor ancho de banda y ser inmune al ruido, la transmisión cumple con los requisitos de calidad establecidos.

a8) Mayor confiabilidad: Al no presentarse fluctuaciones en el medio de transmisión, similares a lo que ocurre en las ondas de radio, la transmisión es estable. Por otro lado al extenderse los tramos de repetición, la disminución de equipos hace que disminuya la probabilidad de fallas.

a9) Mayor maniobrabilidad: El peso y el espesor del cable de fibra óptica facilitan su instalación, operación y mantenimiento. Un cable de 24 fibras con una longitud de 1 km pesa 155 kg, en comparación con un cable de cobre de 100 pares de la misma longitud e igual diámetro pesa 420 kg.

a10) Abundante materia prima: Al ser extraída de la superficie terrestre, la sílice se puede adquirir fácilmente y no hay motivo de escasez.

a11) Mayor flexibilidad: Los equipos de transmisión pueden migrarse por otros de mayor velocidad, sin que ello signifique necesariamente un cambio del medio de transmisión.

a12) Uso de infraestructura disponible: Puede utilizarse la red de canalización y postes existentes para las redes de cobre y coaxiales, como medio de soporte al cable de fibra óptica.

b) Desventajas

b1) Rigidez de componentes: Los elementos de los sistemas de transmisión cambian significativamente cuando se decide pasar de una longitud de onda a otra (ventana).

b2) Poca familiarización: Aún esta tecnología no ha entrado en la etapa de madurez en sus aplicaciones, existe poco personal con el conocimiento suficiente en esta tecnología.

b3) Riesgo a manipulación inadecuada: La fragilidad de los conductores o hilos de fibra hace que de manera accidental pueda curvarse demasiado y “quincearse” o romperse, interrumpiendo abruptamente la comunicación. Esto puede ocasionar grandes pérdidas a los operadores de telecomunicaciones o empresas usuarias si no tienen un circuito de respaldo.

b4) Riesgo a esfuerzos mecánicos: El cable de fibra soportado en los postes o canalizaciones pueden estar sujetos a tensiones o torsiones mecánicas que luego son transmitidas a

los propios hilos de vidrio, con lo cual pueden producirse micro curvaturas al interior de la fibra o posiblemente una deformación geométrica. Esta hace que la atenuación se incremente, así también puede influir en el retardo de grupo,

b5) Riesgo a vandalismo: El cable de fibra óptica tiene una apariencia similar al cable de pares de cobre, por lo cual despierta el interés de los ladrones de cable telefónico, quienes confunden el cable de fibra por el de cobre.

b6) Riesgo de daños por obra de otros servicios: Los cables de fibra óptica están instalados en forma paralela a las carreteras o vías principales. Cada vez que un organismo público o privado realiza obras por instalaciones de edificios o de otros servicios públicos, cortan el cable de fibra al remover tierras.

1.2.3 Principales aplicaciones

Los sistemas de transmisión por fibra óptica están clasificados dentro de las llamadas redes de transporte y redes de acceso.

a) Redes de transporte

Sirven para recolectar el tráfico de sistemas de menor capacidad y enrutarlos a otras ciudades, regiones y países. Pueden ser terrestres y submarinos. Generalmente utilizan el protocolo de Jerarquía Digital Síncrona (SDH o SONET). En la figura 1.2 se muestra una red de transporte de enlace terrestre de algunas ciudades del sur del Perú.

b) Redes de acceso

Sirven para que los usuarios accedan a los centros de conmutación o distribución de servicios. Ejemplos de ello tenemos las redes híbridas de fibra coaxial (HFC) que se utilizan para distribuir televisión por cable. En este caso la fibra óptica se utiliza para acortar la distancia del “bucle” del usuario a los nodos. Otro ejemplo de ellos son las redes ópticas pasivas (GPON) también conocidas como fibras al hogar (FTTH) el cual se viene desarrollando con el fin de que la fibra óptica llegue hasta el domicilio de los usuarios y puedan disfrutar de todos los servicios disponibles por un solo medio de transmisión. En la figura 1.3 se muestra un esquema típico de FTTH.

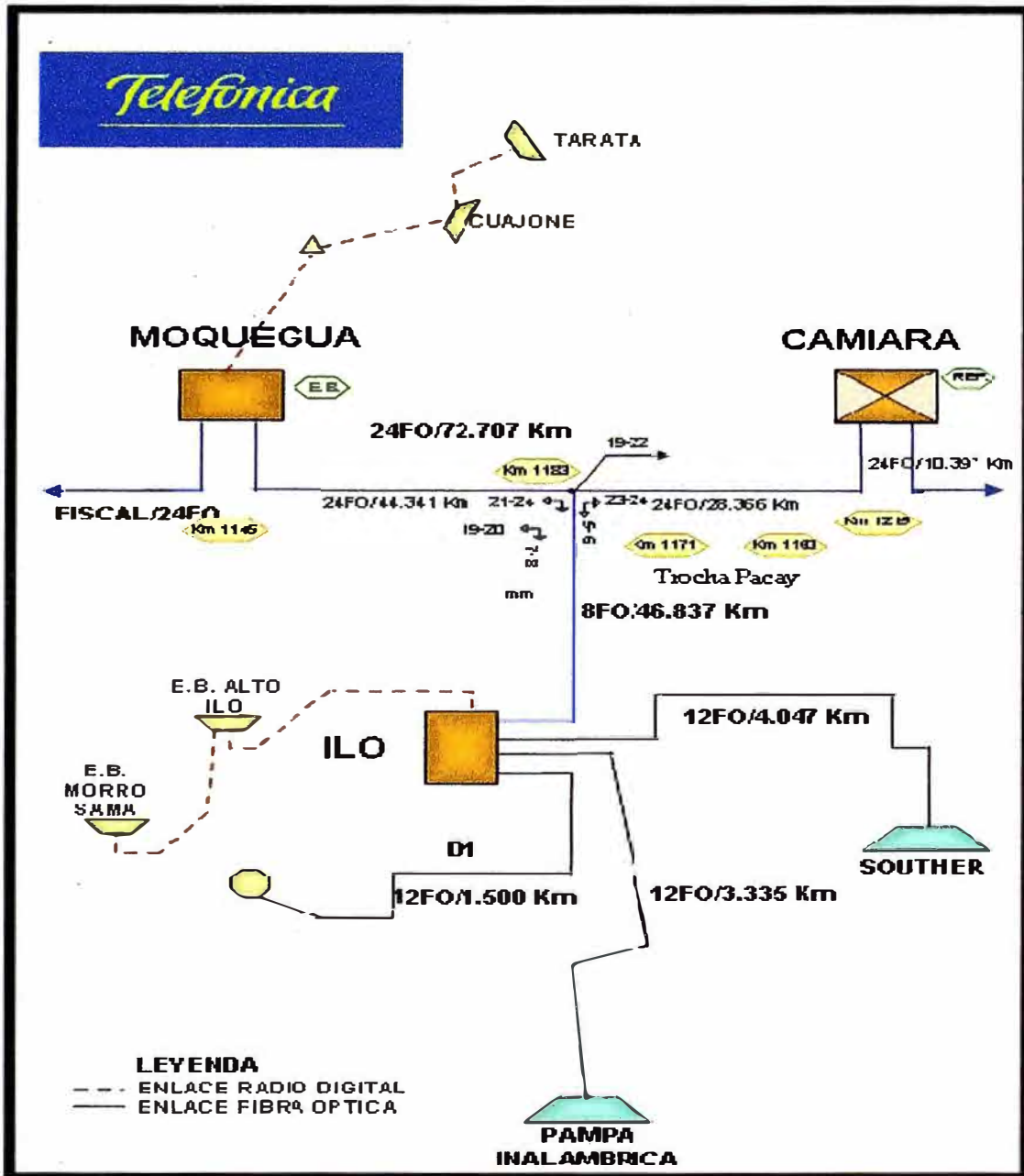


Figura 1.2: Esquema de red de transportes (4)

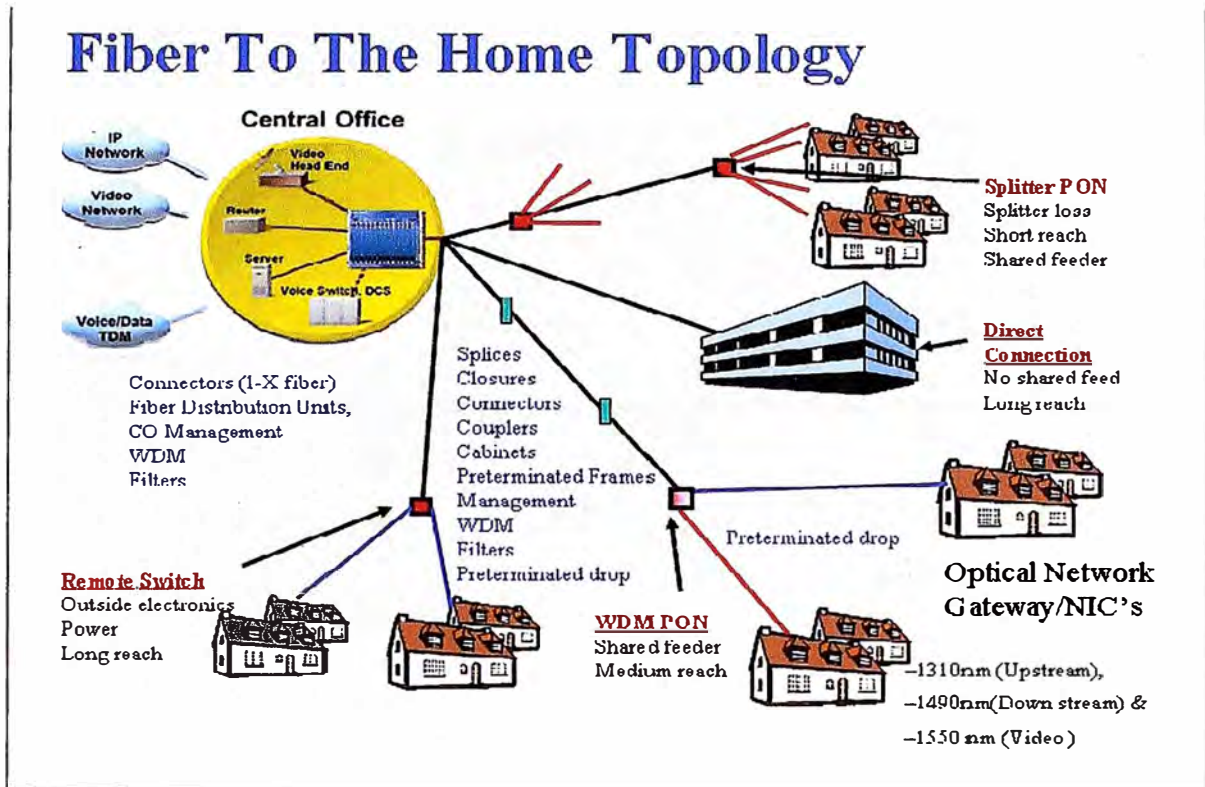


Figura 1.3: Esquema de una red FTTH (5)

1.3 La fibra óptica

La fibra óptica conocida también como portador óptico, es un medio filiforme de material de vidrio, que se comporta como una guía de onda para transportar ondas electromagnéticas luminosas, utilizando el principio óptico de reflexión total.

Para ilustrar este principio se referirá a la figura 1.4 que muestra a un rayo luminoso incidiendo desde un material a otro en la superficie de separación. Supondremos que el medio material desde donde viene el rayo incidente (I), tiene un índice de refracción (n_1) mayor al del material donde el rayo luminoso se refracta (T) o transmite (n_2). Se sabe que en este caso el rayo luminoso se desvía con un ángulo que se aleja de la recta normal a la separación de los dos medios (1). Cuando el rayo refractado (T) forma un ángulo (θ_2) de 90° con la normal, se establece la reflexión total. En este caso el ángulo de incidencia (θ_1) se denomina ángulo crítico.

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia θ_1 y de refracción θ_2 cuando el rayo I que proviene del medio con índice de refracción n_1 , incide en la superficie de separación de con otro medio de índice de refracción n_2 y se refracta en el rayo T.

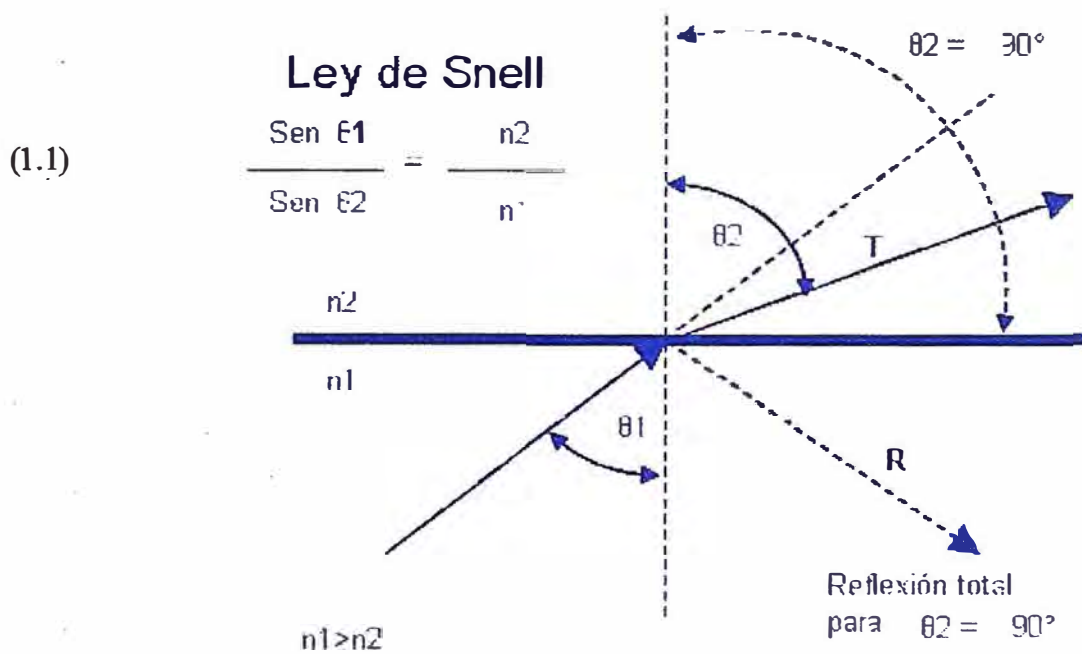


Figura 1.4: Refracción de la luz

1.3.1 Estructura física de la fibra óptica

La fibra tiene una estructura cilíndrica formada por dos regiones concéntricas, la región interior llamada núcleo y la exterior llamada revestimiento. El núcleo tiene un índice de refracción mayor al del revestimiento, por lo que la luz puede quedar confinada en el núcleo, propagándose a lo largo. La figura 1.5 muestra la estructura de una fibra óptica con su perfil de índice de refracción y los rayos luminosos confinados en el núcleo.

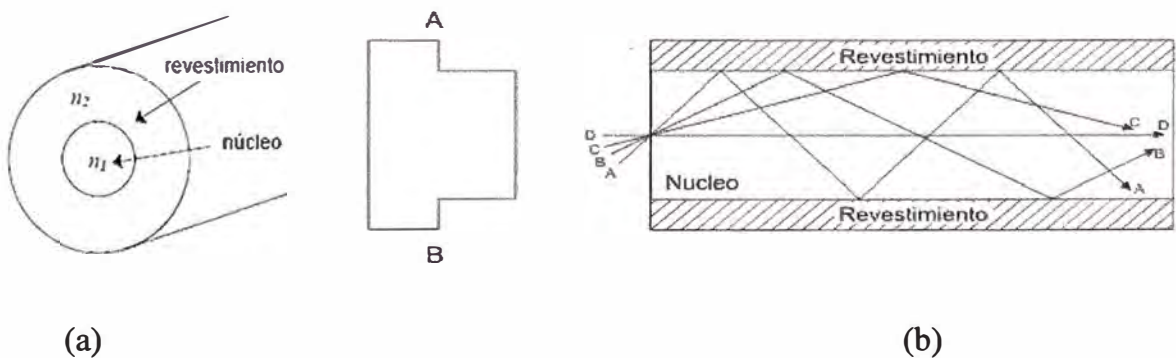


Figura 1.5: Estructura de la fibra óptica (6)

1.3.2 Propagación de luz en la fibra óptica

La figura 1.6 muestra como los rayos luminosos que inciden en la superficie de separación del núcleo con el revestimiento de la fibra óptica se refractan hacia el revestimiento y otras que mediante reflexión total quedan confinadas en el núcleo.

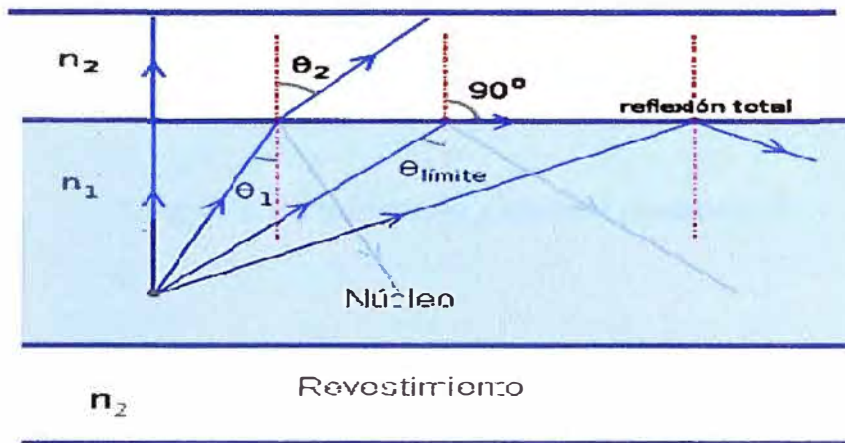


Figura 1.6: Propagación de la luz en una fibra óptica

Los haces que son confinados en el núcleo inciden en el revestimiento con un ángulo denominado ángulo límite o crítico, de tal forma que garantice que haya reflexión total. Ello da lugar a que los rayos luminosos se propaguen a lo largo de la fibra de vidrio. Cada uno de los rayos que se propagan mediante reflexión total, lo realizan con diferentes ángulos de propagación; los que se denominan “modo” de propagación.

Sin embargo para que los haces sean confinados en el núcleo, es necesario que dichos haces sean inyectados a la fibra óptica, con un ángulo respecto del eje de la fibra que se encuentre dentro del denominado cono de aceptación. El ángulo de aceptación θ_a nos muestra la capacidad de captación de energía luminosa por parte de la fibra óptica. La figura 1.7 muestra el cono generatriz del ángulo de aceptación. Al seno trigonométrico de dicho ángulo se le denomina numérica (AN), que permite que los rayos luminosos sean aceptados por la fibra.

$$AN = \text{sen} \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2)$$

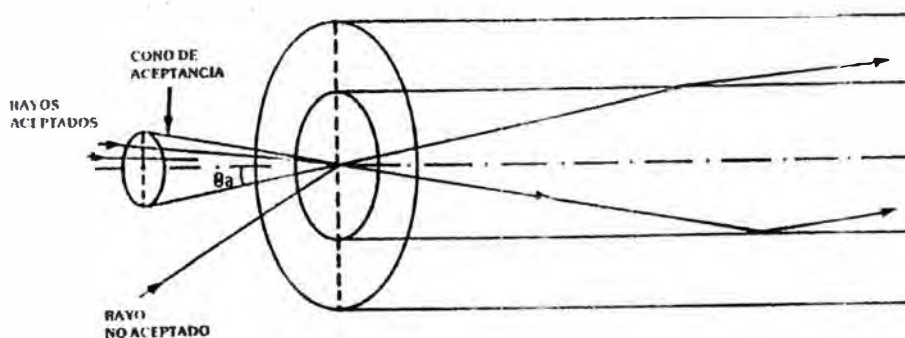


Figura 1.7: Propagación y apertura numérica (7)

1.3.3 Tipos de fibra óptica

Tal como muestra la figura 1.5 (b), al interior de la fibra pueden propagarse varios rayos de luz, o mejor dicho rayos o haces de luz con distintas posibilidades de propagación de la energía al interior de la fibra., a los cuales hemos denominado también modos de propagación. La forma del portador óptico, sus dimensiones, así como el perfil de su índice de refracción (7) configuran los modos posibles de propagación.

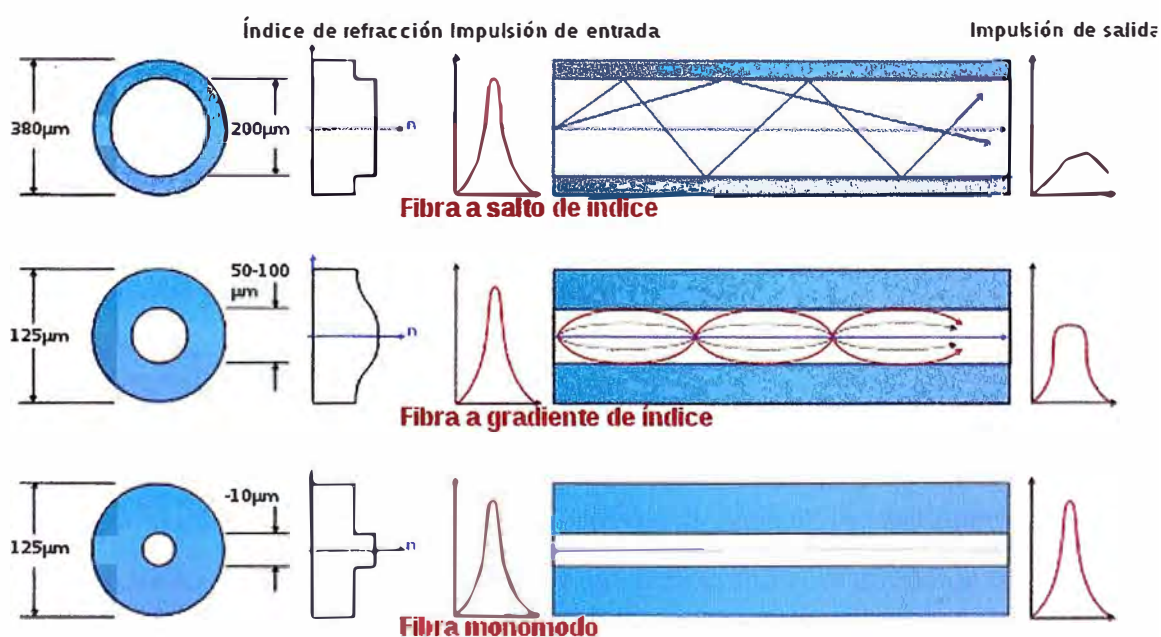


Figura 1.8: Tipos de fibra óptica (8)

De acuerdo con esta particularidad se constituye una clasificación o tipos de fibra óptica. En la figura 1.8 se muestran los tres tipos de fibra óptica conocidos, en la cual podemos apreciar los perfiles del índice de refracción, la estructura física y como se comporta un pulso a la entrada y salida de la fibra.

a) Fibras multimodo de índice escalón o salto de índice :

Aquella en la que el índice de refracción del núcleo cambia abruptamente respecto del de la corteza o revestimiento. Dada la longitud del diámetro del núcleo (100 a 200 μm), es posible que se propaguen varios rayos de luz con la posibilidad de que en el extremo receptor al combinarse la señal se distorsione. Por ello normalmente se le utiliza en sistemas de comunicaciones de distancias cortas y bajas velocidades.

b) Fibras multimodo de índice gradual o gradiente de índice:

Elaboradas para mejorar el rendimiento de las de índice escalón, las fibras de índice gradual al tener un perfil de índice de refracción que varía a lo ancho de la fibra, compensa las variaciones de velocidad de los diferentes modos, con lo cual la distorsión de la señal de información disminuye, mejorándose el ancho de banda del sistema de comunicación.

c) Fibras monomodo:

Son de índice escalón en la cual se ha reducido el diámetro del núcleo (alrededor de 10 μm), de tal forma que solo puede confinar un único modo de propagación. Es la fibra ideal para ser utilizados en sistemas de comunicaciones de distancias largas y gran ancho de banda o bit rate.

1.4 Fabricación de la fibra óptica

La fibra pasa por un proceso de fabricación que consiste en: la fabricación de la preforma, el estirado de esta y por último las pruebas y mediciones.

a) Preforma:

La preforma puede ser a través de alguno de los siguientes métodos:

a1) M.C.V.D: Deposición de vapores químicos modificado: Utiliza un tubo de cuarzo puro con una mezcla de dióxido de silicio y aditivos de dopado. A continuación el tubo es girado en un torno y calentado hasta alcanzar una temperatura comprendida entre 1.400 °C y 1.600 °C mediante un quemador de hidrógeno y oxígeno. Por un extremo del tubo se introducen los aditivos de dopado, parte fundamental del proceso, ya que de la proporción de estos aditivos dependerá el perfil final del índice de refracción del núcleo.

A2) VAD: Deposición axial de vapor: La materia prima que utiliza es la misma que el método M.C.V.D, sin embargo en el VAD se deposita el revestimiento, además del núcleo de la FO. Por esta razón debe cuidarse que en la zona de deposición axial o núcleo, se deposite más dióxido de germanio que en la periferia. A partir de una "preforma porosa" se la somete a una temperatura comprendida entre los 1.500 °C y 1.700 °C, lográndose así el reblandamiento del cuarzo. Quedando convertida la preforma porosa hueca en su interior en el cilindro macizo y transparente. Entre sus ventajas, comparado con el método anterior (M.C.V.D) permite obtener preformas con mayor diámetro y mayor longitud a la vez que precisa un menor aporte energético.

b) Estirado:

Consiste básicamente en la existencia de un horno tubular abierto, en cuyo interior se somete la preforma a una temperatura de 2.000 °C, logrando así el reblandamiento del cuarzo y quedando fijado el diámetro exterior de la FO. Este diámetro se ha de mantener constante mientras se aplica una tensión uniforme sobre la preforma.

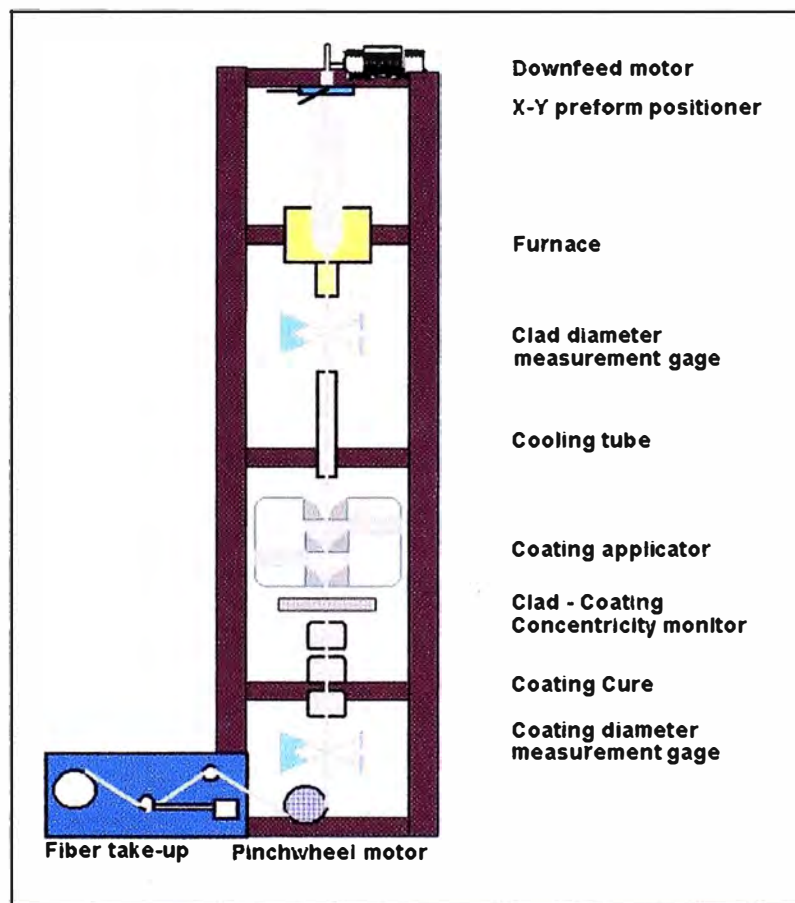


Figura 1.9: Estirado de la fibra óptica (9)

En este proceso se ha de cuidar que en la atmósfera interior del horno esté aislada de partículas provenientes del exterior para evitar que la superficie reblandecida de la FO pueda ser contaminada, o se puedan crear micro fisuras.

Posteriormente se pasa al endurecimiento de la protección antes descrita quedando así la capa definitiva de polímero elástico. Esto se realiza habitualmente mediante procesos térmicos o a través de procesos de reacciones químicas mediante el empleo de radiaciones ultravioletas. En la figura 1.9 se muestra el estirado de la fibra.

1.5 Características de transmisión

Todo sistema de comunicaciones tiene como características principales la atenuación y el ancho de banda. De ellas depende el alcance físico y su calidad. En la tabla 1.1 se muestra como se relacionan estas características con las propiedades de la fibra óptica.

Tabla 1.1: Características de transmisión de la fibra óptica (7)

Característica de transmisión	Causa general	Causa específica
Atenuación	Absorción	Intrínseca Extrínseca
	Dispersión energética	Líneal (de Rayleigh) Alineal
Ancho de banda o bit rate	Dispersión modal	
	Dispersión cromática	Material Guía de onda

a) Atenuación:

Es la reducción o pérdida de la potencia óptica a lo largo de la vía de transmisión, normalmente se especifica en dB/km. Esta característica es debida a la absorción de la luz en el medio material, las mismas que tienen su origen en la agitación térmica de las moléculas y electrones del propio material de la fibra óptica y las impurezas existentes en ella. Por otro lado interesa como la luz se dispersa cuando encuentra discontinuidades del tamaño de su longitud de onda.

b) Ancho de banda

Relacionado con el conjunto de frecuencias que se pueden transmitir por la fibra óptica hasta que la señal decae a la mitad de su potencia óptica. Viene dado por la diferencia entre la frecuencia máxima y mínima de los puntos de media potencia. Se mide en MHz o Ghz.

Sin embargo el ancho de banda está relacionado a la respuesta al impulso, por lo que es mejor medirlo de esta manera, ya que en la actualidad se cursan señales digitales por la fibra.

Dentro de este contexto conviene estudiar como el impulso de entrada se deforma, se ensancha o se dispersa al final de la vía de transmisión. Esta dispersión tiene su origen en la combinación de los haces que van por diferentes caminos dentro de la fibra (modal), o por las diferentes velocidades de estos mismos haces al tener distintas longitudes de onda (cromática).

1.5.1 Absorción energética

Son las pérdidas ópticas producto de la agitación molecular o electrónica en el material debido al paso de los haces luminosos, es decir la fibra óptica se “calienta” al paso de la luz. La absorción es un proceso de interacción luz-materia que ocurre en tres casos: tanto para la sílice o “sustrato”, así como para las impurezas añadidas (Germanio, fósforo, boro, etc.) para mejorar los índices de refracción, así como las impurezas indeseadas (iones metálicos e hidroxilo OH). En los dos primeros casos se llama absorción intrínseca y en la última extrínseca.

Tanto en la absorción intrínseca como extrínseca la agitación térmica ocurre a nivel molecular como a nivel electrónico. Es decir la estructura reticular cristalina empieza a vibrar cuando es estimulada por la luz, lo cual ocurre mayormente en el lado infrarrojo del espectro. Por otro lado los electrones saltan de una órbita a otra alcanzando mayores niveles de energía, lo cual ocurre mayormente en el lado ultravioleta del espectro.

De lo que se desprende que el fenómeno de absorción dependerá mucho de las técnicas de fabricación, donde sea posible controlar el nivel de impurezas. Por lo que se conseguirán atenuaciones que dependerán de la longitud de onda. Con ello surge el concepto de ventanas de transmisión.

1.5.2 Dispersión energética

Distinguimos la dispersión energética lineal y alineal.

a) Dispersión energética lineal:

Aquella que es debido a la transferencia de energía de unos modos a otros ante la presencia de discontinuidades o irregularidades que son comparables a la longitud de onda de los rayos luminosos. El efecto es que esta transferencia de energía hace que la luz se disperse y

salga fuera del núcleo. A este fenómeno se la llama también esparcimiento o difusión. Dentro de ellas se distinguen:

a1) Dispersión de Rayleigh: Aquella que ocurre cuando la luz penetra en el sustrato y se encuentra con la sílice y sus impurezas. Asimismo debido a variaciones de la densidad y del índice de refracción. Los rayos luminosos se dispersan dependiendo de manera inversamente proporcional a la potencia cuarta de la longitud de onda, es decir habrá mayor dispersión en la región ultravioleta (menor longitud de onda) y menor dispersión en el infrarrojo (mayor longitud de onda).

a2) Dispersión por irregularidades periódicas: Aquella que ocurre por desviaciones puntuales en el índice de refracción o en el diámetro del núcleo.

a3) Atenuación por micro curvaturas: Se trata de las pérdidas que ocurren cuando el eje de la fibra se desvía a lo largo de su trayectoria. Los rayos luminosos pueden escapar fácilmente al revestimiento. Se controla en el proceso de fabricación y protegiéndola en el cable para que no esté sujeto a tensión mecánica.

a4) Atenuación por curvado: Ocurre cuando durante el proceso de instalación el eje de la fibra se curva por debajo de un valor mínimo, de tal forma que el frente de las ondas luminosas se modifican y traen como consecuencia de que la luz escape del núcleo hacia el revestimiento.

b) Dispersión energética alineal:

La fibra óptica tiene un comportamiento alineal cuando la potencia óptica inyectada es tan intensa, que se produce un efecto de dispersión estimulada, en la cual es posible que se generen longitudes de onda diferentes a las de entrada (efecto Raman y Brillouin). Este fenómeno ocurre cuando se inyecta un nivel de potencia que sobrepasa un umbral.

1.5.3 Ventanas de transmisión

La figura 1.10 muestra la característica de atenuación de la fibra óptica con respecto a la longitud de onda. Vemos que esta tiende a disminuir con el incremento de la longitud de onda, pero que en determinadas zonas del espectro hay un incremento abrupto de la atenuación que son debidos a la absorción de las impurezas, sobre todo de los iones hidroxilos OH. Estos picos terminan en unos valles o “ventanas” donde la atenuación se hace menor en dentro de una región espectral. Los primeros portadores ópticos tenían esta curva desplazada hacia arriba con mayores niveles de atenuación, la que se ha disminuido

gracias a los nuevos métodos de fabricación. Asimismo notamos que la dispersión de Rayleigh, llamada también esparcimiento o difusión, es más notoria a menores longitudes de onda hacia la zona alejada del infrarrojo. En la tabla 1.2 se muestran valores típicos de atenuación:

Tabla 1.2: Atenuaciones típicas en la fibra óptica

Ventana	Longitud de onda (μm)	Atenuación (dB/km)
Primera	0.8 a 0.9	3.2
Segunda	1.30 a 1.35	0.8
Tercera	1.5 a 1.6	0.25

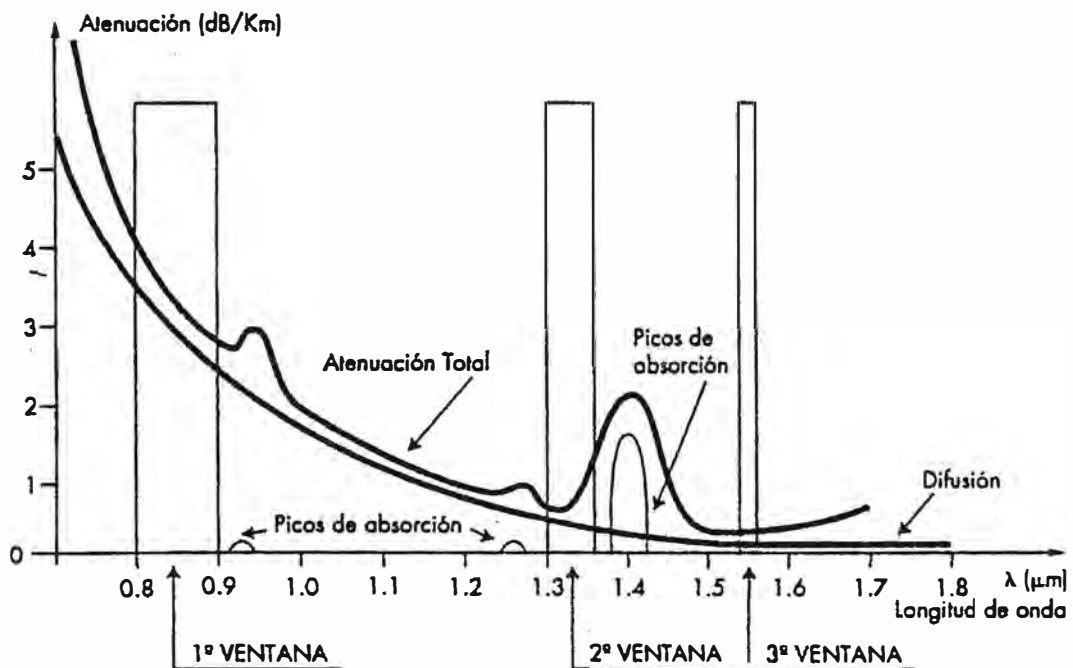


Fig. 1.10: Ventanas de transmisión (9)

1.5.4 Dispersión temporal

Cuando se inyecta un impulso a la entrada de la fibra, este sufre una atenuación y a su vez un ensanchamiento, producto del fenómeno de la dispersión, tal como se muestra en la figura 1.11.



Fig. 1.11: Dispersión temporal

Este fenómeno se debe a ciertas características que tienen que ver con los diferentes modos de propagación, al comportamiento de la fibra cuando viajan dentro de ella diferentes longitudes de onda y al efecto de la fibra como guía de onda

a) Dispersión modal:

Cuando dentro del núcleo viajan haces con diferentes modos de transmisión, estos recorren distancias diferentes, ya que viajan en trayectorias con diferentes ángulos de propagación, por lo que muchos llegarán retrazados. Al llegar todos los rayos luminosos (figura 1.12) al extremo receptor se combinan ensanchando el pulso. Esta es una característica de las fibras multimodo de índice escalón.

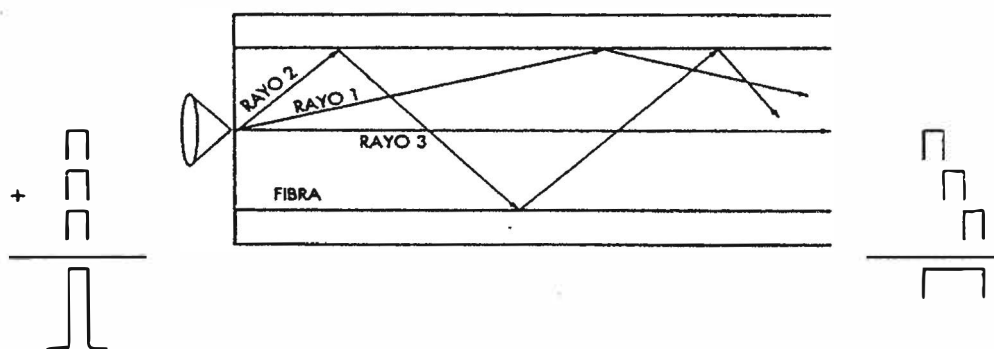


Fig. 1.12: Dispersión modal

b) Dispersión cromática efecto material:

Cuando dentro del núcleo viajan haces con diferentes longitudes de onda, producto de ser inyectados desde un emisor óptico con un ancho espectral significativo, o cuando el índice

ce de refracción no es constante a lo largo del radio del núcleo, las velocidades de propagación de los diferentes haces, son diferentes. Esto implica que al final del camino los diferentes rayos llegan en tiempos diferentes, que al combinarse provocan un ensanchamiento del pulso.

c) Dispersión cromática efecto guía de onda:

La fibra óptica se comporta como una cavidad donde se propagan las ondas electromagnéticas, en el cual para una determinada longitud de onda, dada su geometría de sección circular con un determinado diámetro; hacen que las ondas se distribuyan en el núcleo y una parte en el revestimiento con diferentes velocidades. Su efecto es contrario a la dispersión material. Por lo que a la longitud de onda de 1.3 μm (segunda ventana) llega a ser cero.

c1) Fibra de dispersión desplazada: La dispersión cromática total (material y guía de onda) es significativa para la tercera ventana. Por ello las fibras ópticas se fabrican de tal forma que la curva de dispersión guía de onda se desplace de tal forma que se compense con la dispersión material a 1.55 μm . En la figura 1.13 (a) y 1.13 (b) se muestra este comportamiento.

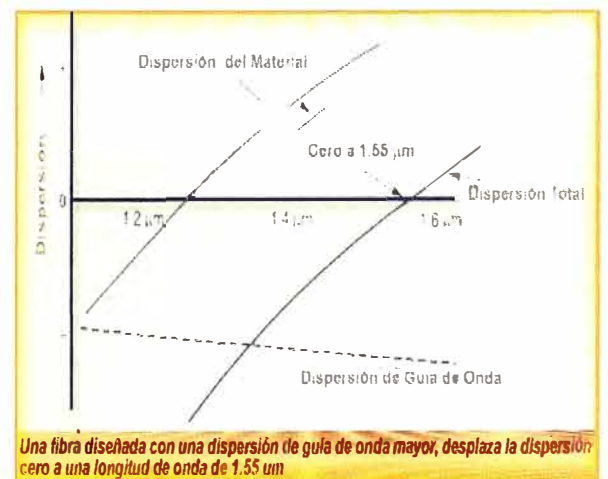
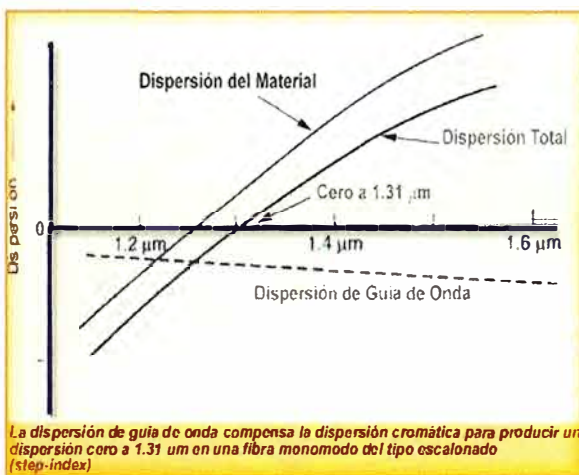


Fig. 1.13: Dispersión material y guía de onda (10)

1.5.5 Ecuaciones principales

Para proyectar un enlace de comunicaciones es necesario formular las ecuaciones matemáticas principales que resolverán los requerimientos del sistema.

a) Atenuación:

$$A = L\alpha \quad (1.3)$$

Variable	Descripción	Unidad
A	Atenuación	dB
L	Longitud del tramo	Km
α	Coefficiente de atenuación	dB/Km
Pi	Potencia de entrada	dBm
Po	Potencia de salida	dBm

$$A = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (1.4)$$

b) Ancho de banda correspondiente a la dispersión modal:

$$B_1 = \frac{0.187}{\sigma_M} \quad (1.5)$$

Variable	Descripción	Unidad
B ₁	Ancho de banda a 1 km	GHz.km
σ_M	Dispersión modal	nS/km

c) Ancho de banda correspondiente a la dispersión total:

$$B_L = \frac{0.187}{\sigma_L} \quad (1.6)$$

$$\sigma_L^2 = \sigma_M^2 + (\sigma_{MAT}^2 + \sigma_{GO}^2) \quad (1.7)$$

$$\sigma_L^2 = \left(\frac{0.187}{B_1} L' \right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda L}{2.35} \right)^2 [M(\lambda) - G(\lambda)]^2 \quad (1.8)$$

Variable	Descripción	Unidad
B _L	Ancho de banda a L km	GHz
σ_L	Dispersión total a L km	ns/km
σ_M	Dispersión modal	ns/km
σ_{MAT}	Dispersión cromática material	ns/km
σ_{GO}	Dispersión cromática guía de onda	ns/km
L	Longitud del enlace de fibra	km
γ	Coefficiente dispersión modal	
$\Delta\lambda$	Ancho espectral emisor óptico	nm
M(λ)	Coefficiente dispersión cromática mat.	ns/nm.km
G(λ)	Coefficiente dispersión cromática g.o.	ns/nm.km

1.6 El cable de fibra óptica

Los portadores ópticos para ser utilizados como parte de una infraestructura de comunicaciones requieren, aparte de sus bondades en la transmisión, ser lo suficiente robustos de tal forma que soporten las variaciones de presión, temperatura y esfuerzos mecánicos. Dado que el portador óptico está hecho de vidrio, este es muy frágil y no resiste cargas mecánicas. Por lo que se le debe proteger en una estructura similar a la de los cables de pares metálicos, con las diferencias específicas que corresponden a esta tecnología.

Dentro de este contexto el cable de fibra óptica (monofibra o multifibra) está constituido por la agrupación de una o más fibras en una estructura compacta.

El cable monofibra es un cordón llamado también “pigtail”, el cual se le utiliza para conectar el cable multifibra con los equipos de transmisión. En la figura 1.14 se muestra el cordón monofibra el cual en sus extremos tiene los conectores con los cuales se enlazan al equipo de transmisión y al panel de cable multifibra.



Fig. 1.14: Cable monofibra

En el caso del cable multifibra puede notarse un elemento central de refuerzo, las fibras ópticas y las cubiertas (11). En la figura 1.15 se muestra una estructura clásica para un cable multifibra utilizado en la planta exterior de un sistema de comunicaciones.

a) Elemento central:

Hecho de un hilo trenzado de acero o de kevlar recubierto con polietileno, el cual le da consistencia y rigidez al cable. Asimismo sirva para absorber la tensión mecánica durante la instalación o retiro del cable.

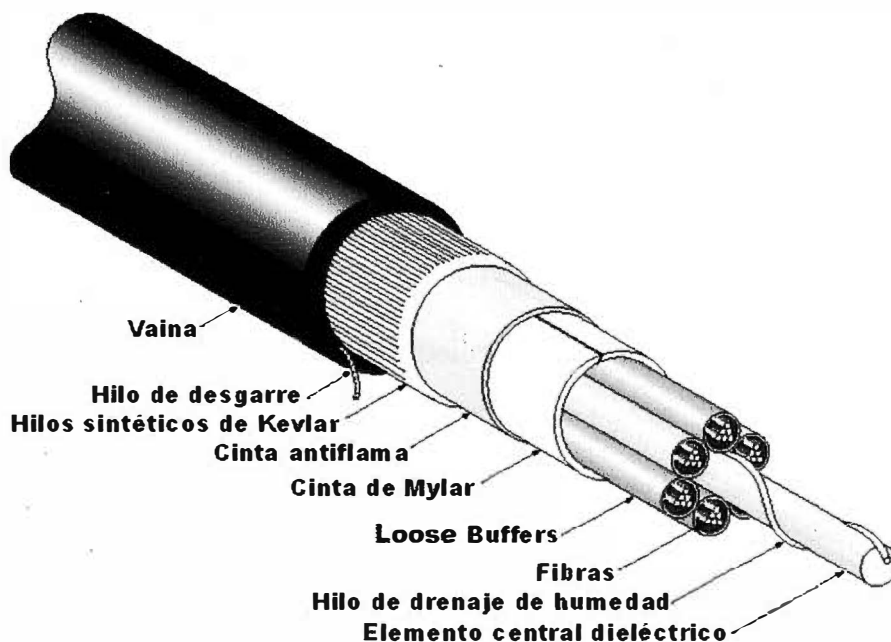


Fig. 1.15: Estructura de un cable de fibra óptica

b) Fibras ópticas:

A fin de dotarlas de mayor resistencia mecánica se le da una protección primaria consistente en un recubrimiento de acrilato. Asimismo se le da una protección secundaria que puede ser de dos formas: la protección ajustada o la protección holgada (denominada buffer). Cada buffer puede tener hasta 8 fibras coloreadas para identificar su cuenta dentro del tubo. En la figura 1.16 se muestran los dos tipos de protección secundaria.

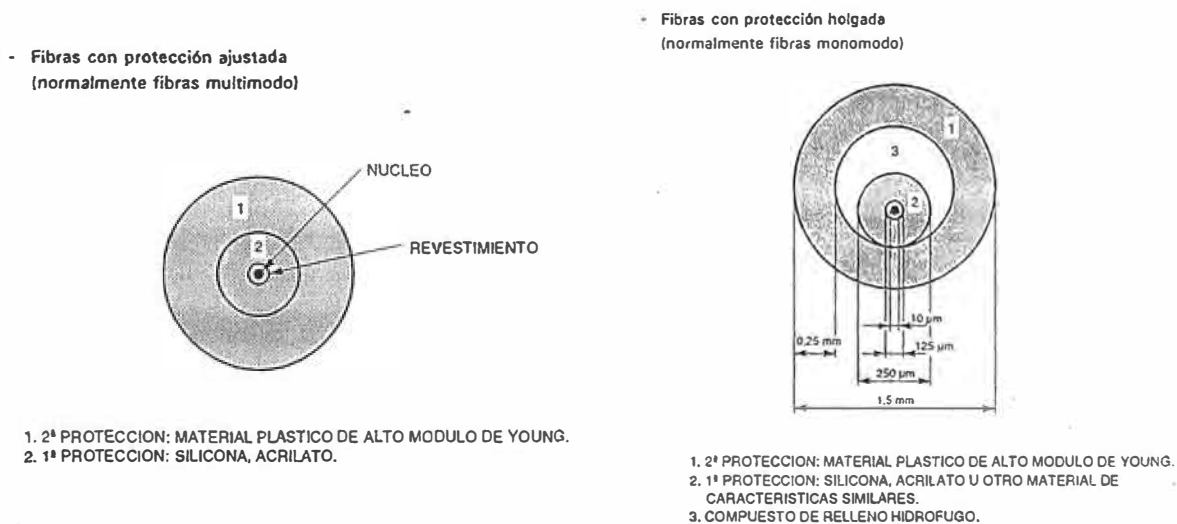


Fig. 1.16: Protección secundaria de una fibra óptica

Los buffers están a su vez coloreados para identificar su cuenta en el cable y ordenados en capas concéntricas. Pueden conseguirse cables desde 8 fibras hasta 256 fibras o más.

c) Cubiertas:

La configuración de tubos y fibras están protegidos por un conjunto de cubiertas que pueden ser de los siguientes tipos:

PEAP: (polietileno, estanco, aluminio, polietileno).

PKP: (polietileno, fibras de aramida, polietileno)

PESP: (polietileno, estanco, acero, polietileno)

1.6.1 Especificaciones típicas

Los fabricantes de cable de fibra óptica, en sus catálogos, hacen referencia al cumplimiento de las recomendaciones de UIT, ejemplo ITU-T G.652 “Características de los medios de transmisión, cables de fibra óptica”. En dicho documento se especifica los valores recomendados, tal como se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Recomendación ITU-T G.652.C

Cuadro 3/G.652 - Atributos G.652.C		
Atributos de la fibra		
Atributo	Dato	Valor
Diámetro del campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8.6 - 9.5 μ m
	Tolerancia	+/- 0.6 μ m
Diámetro del revestimiento	Nominal	125.0 μ m
	Tolerancia	+/- 1 μ m
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0.6 μ m
No circularidad del revestimiento	Máximo	1.0%
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1625 nm	0.1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0.69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	λ_{0min}	1300 nm
	λ_{0max}	1324 nm
	S_{0min}	0.092 ps/nm ² x km
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo de 1310 nm a 1625 nm (Nota 2)	0.4 dB/km
	Máximo de 1383 nm +/- 3 nm	(Nota 3)
	Máximo a 1550 nm	0.3 dB/km
Coeficiente PMD	M	20 cables
	Q	0.0001
	PMD _Q máximo	0.5 ps / \sqrt km
NOTA 1 – De conformidad con 6.2, se especifica un valor máximo del parámetro PMD Q para la fibra no cableada, con el fin de soportar el requisito primario impuesto al cable PMD Q.		
NOTA 2 – Esta región de longitud de onda puede ampliarse hasta 1260 nm añadiendo 0.07 dB/km de pérdida por dispersión de Rayleigh inducida al valor de atenuación a 1310 nm. En este caso, la longitud de onda de corte del cable no deberá sobrepasar 1250 nm.		
NOTA 3 – La atenuación media detectada en muestras a esta longitud de onda debe ser menor o igual al valor especificado para el intervalo 1310 nm a 1625 nm, después del proceso de envejecimiento del		

1.7 Dispositivos de fibra óptica

Los sistemas de comunicaciones ópticas requieren en una fuente de luz en el extremo transmisor y conforme la señal se atenúa es necesario amplificar su potencia para que llegue con un nivel adecuado en el extremo receptor. Dentro de este contexto se revisan los principios de funcionamiento de los emisores de luz, los detectores de luz y los amplificadores ópticos (6).

1.7.1 Emisores ópticos

Son de dos tipos, los diodos LED y los diodos LASER. Están compuestos por un substrato de silicio dopado con Arseniuro de Galio, Arseniuro de Galio Aluminio o Fósforo-Indio. La emisión de la luz se controla mediante el espesor de las multicapas dopadas.

a) Diodos LED:

Son semiconductores de unión p-n que emiten una luz no coherente cuando se le polariza directamente. La energía luminosa emitida es proporcional al nivel de corriente de la polarización del diodo. Existen dos tipos de LED: los LED de superficie que emite la luz a través de la superficie de la zona activa y el LED de perfil que emite a través de la sección transversal (este tipo es mas direccional). La figura 1.17 muestra el circuito de excitación y su función de transferencia.

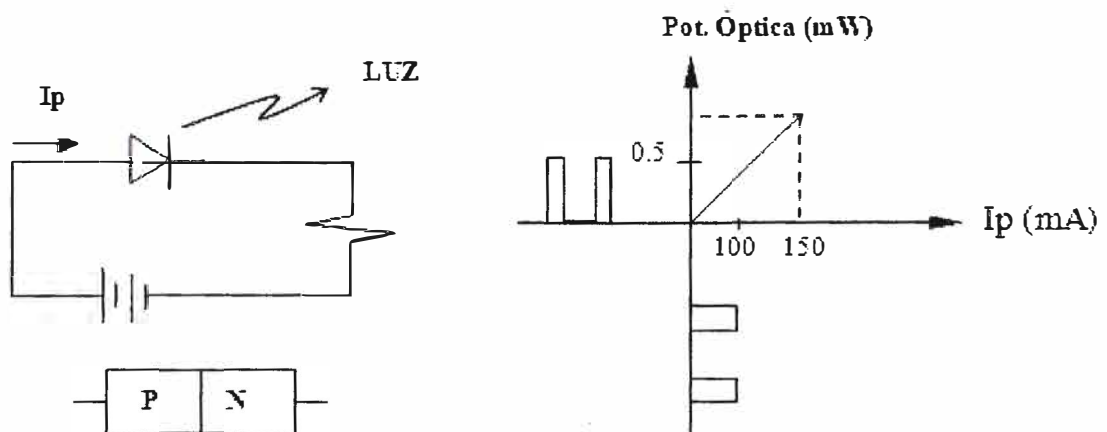


Fig. 1.17: Características de los LED

a) Diodos LASER (LD):

Consiste en una cavidad resonante donde se genera una luz coherente por emisión estimulada. La emisión del LD requiere de una corriente umbral, y a niveles de corriente menores al umbral el LD emite luz incoherente como un LED. La figura 1.18 muestra una

comparación de los espectros emitidos por un LED y un LD donde se puede notar que la luz emitida por un LD tiene un ancho espectral mucho menor que el LED. El ancho espectral de la fuente de luz ayuda en disminuir la dispersión cromática.

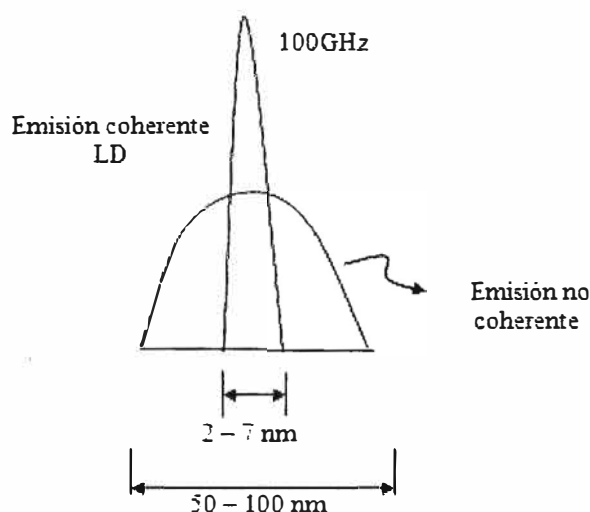


Fig. 1.18: Ancho espectral del LED y LD

1.7.2 Receptores ópticos

Llamados también foto detectores cuya función es extraer la información contenida en una portadora óptica que incide en dicho dispositivo. Para ello convierte la potencia óptica incidente en corriente eléctrica. Sus características principales son:

- Sensibilidad alta a la longitud de onda de operación
- Contribución mínima al ruido total del receptor
- Ancho de banda grande (respuesta rápida)

Existen dos tipos de foto detectores:

a) Foto detectores PIN:

Son uniones p-n polarizadas inversamente en la cual se genera un campo eléctrico en la zona de juntura, llamada también zona desierta de portadores. Cuando incide un fotón en la zona desértica con mayor energía o igual a la del material semiconductor, puede perder su energía y excitar a un electrón que se encuentra en la banda de valencia para que pase a la banda de conducción. Este proceso genera pares electrón – hueco que se les llama foto portadores. Se genera un solo par electrón-hueco por fotón absorbido.

b) Foto detectores de Avalancha APD:

Cuando al foto detector se le aumenta el voltaje de polarización, llega un momento en que la corriente crece por el fenómeno de avalancha; por lo que se genera más de un par electrón-hueco.

Cuando se aplican altos voltajes de polarización, los portadores de carga libres se desplazan rápidamente, con mayor energía y liberan nuevos portadores secundarios, los cuales también son capaces de producir nuevos portadores. Este efecto se llama multiplicación por avalancha

1.7.3 Amplificadores ópticos

Son aquellos dispositivos que amplifican la potencia óptica sin necesidad de convertirla previamente en una señal eléctrica. Los amplificadores de fibra se fabrican con tramos de fibra al que se la ha dopado con otras sustancias. Luego de ello se bombea la fibra dopada con una luz láser continua de menor longitud de onda. El más conocido es el amplificador de fibra dopada con Erblio, en el cual se incorporan iones de Erblio al núcleo de una fibra especial. Se obtiene una gran amplificación que puede alcanzar hasta 600 km sin regeneración con un ancho de banda útil (con respuesta plana): 1530-1560nm: 30 nm, que permite sólo un limitado número de canales. La figura 1.19 muestra el esquema del EDFA y su respuesta en frecuencia.

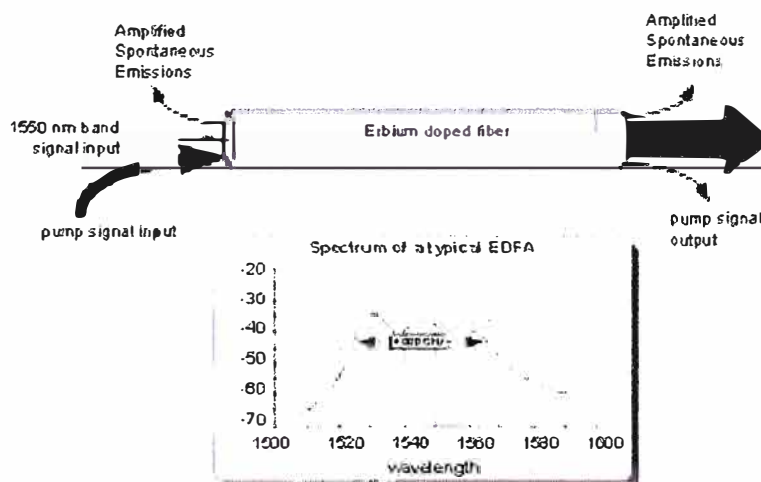


Fig. 1.19: EDFA (13)

1.8 Instalación de la fibra óptica

La instalación de un cable de fibra óptica implica el tendido del cable en la ruta proyectada, el empalme de los tramos individuales y el conexionado en los repartidores ópticos.

1.8.1 Tendido

El tendido de los cables de fibra óptica tiene una tecnología similar a la de la instalación de los cables multipares de cobre, con ciertas particularidades propias del cable de fibra óptica. Respecto al tipo de tendido, en la tabla 1.4 se muestran las diferentes disposiciones subterráneas y aéreas.

Tabla 1.4: Tipos de tendido del cable de fibra óptica

Tendido	Modalidad	Longitud de tramo (km)	Distancia entre empalmes (Km)	Zona
Subterráneo	canalizado	0.25	1	urbana
	en subconducto enterrado	0.5	3	rural
	enterrado directamente	0.5	3	rural
Aéreo	autosoportado	0.05	1	urbano/rural
	devanado	0.05	1	urbano/rural
	soportado	0.5	3	Red alta tensión

Las consideraciones especiales para el tendido de fibra óptica son:

- Controlar cuidadosamente que la tracción del cable esté dentro de los límites especificado por el fabricante (240 kg).
- Controlar cuidadosamente que en las bifurcaciones el curvado del cable se realice con un radio de curvatura mínimo de 10 veces su radio.
- Evitar cualquier tipo de aplastamiento del cable durante el tendido.
- Si es necesario desenrollar el cable desde el carrete, deberá hacerse formando una figura de ocho, para evitar quinceos.
- Dejar reserva de 50 m en cámara de empalme por cada extremo a empalmar. En caso de poste la reserva por empalme será de 20 m.

1.8.2 Empalmes

Los empalmes se realizan de dos maneras: mediante conectores y por fusión. En el primer caso el uso de conectores está recomendado para enlaces de bajas velocidades o para realizar trabajos provisionales previos al empalme por fusión. En el segundo caso, el empalme por fusión es el más recomendado ya que las fibras de ambos extremos se sueldan mediante un arco eléctrico, logrando bajos niveles de atenuación.

El proceso de empalmes de fibras es una técnica muy especializada en la cual primero se preparan las cubiertas de los extremos de los cables a empalmar, luego de identificar las fibras mediante su código de colores o mediante un haz de luz, se preparan las fibras, limpiándolas y cortándolas en un ángulo perfectamente de 90° respecto de su eje, para luego fusionarlas. Seguidamente las fibras soldadas se protegen y se acomodan en una bandeja de empalme. En la figura 1.20 se muestra un kit de empalme de fibras ópticas por conectores y otro por fusión.

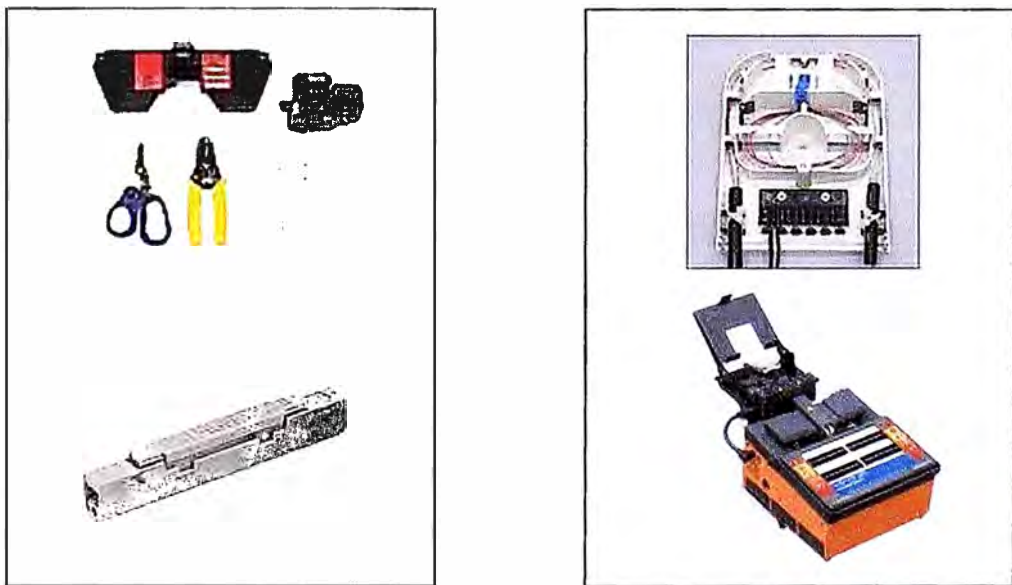


Figura 1.20 Kit de empalme por conectores y por fusión

1.8.3 Conexionado

Consiste en unir el cable, tendido y empalmado, en sus extremos inicial y final a los repartidores ópticos (ODF); desde donde se realizarán los enlaces a los equipos de transmisión. El repartidor óptico es un gabinete en donde se ubican las bandejas de empalmes y las bandejas de conectores. Las primeras alojan los empalmes de las fibras del cable exterior

con las fibras unifilares que terminan en la bandeja de conectores. Esta última es el punto de terminación del enlace. Desde este punto se realizan las conexiones a los equipos y se realizan las pruebas de transmisión. En la figura 1.21 se muestra un ODF con la bandeja de conectores en la parte superior y la bandeja de empalmes en la parte inferior.



Figura 1.21 Repartidor óptico (ODF)

1.9 Pruebas típicas de la fibra óptica

Una vez culminado el proceso de instalación del cable de fibra óptica hasta el ODF, se realizan las pruebas de transmisión. Las que comúnmente se realizan son las de atenuación y las de retro esparcimiento.

1.9.1 Atenuación

La medida de la atenuación tiene como objeto medir la pérdida de potencia de extremo a extremo en un cable de fibra óptica. Esta medición cubre las pérdidas en la propia fibra óptica, en los empalmes y en los conectores que están en los repartidores ópticos.

Para medir la atenuación se inserta una fuente de luz en un extremo y se coloca el medidor de potencia en el extremo distante. Ambos equipos se conectan a la fibra a través de los repartidores ópticos por medio de un cordón monofibra “Jumper”. Las mediciones se

realizan normalmente en segunda como en tercera ventana. La figura 1.22 muestra la configuración de los equipos de medición y la fibra bajo prueba.

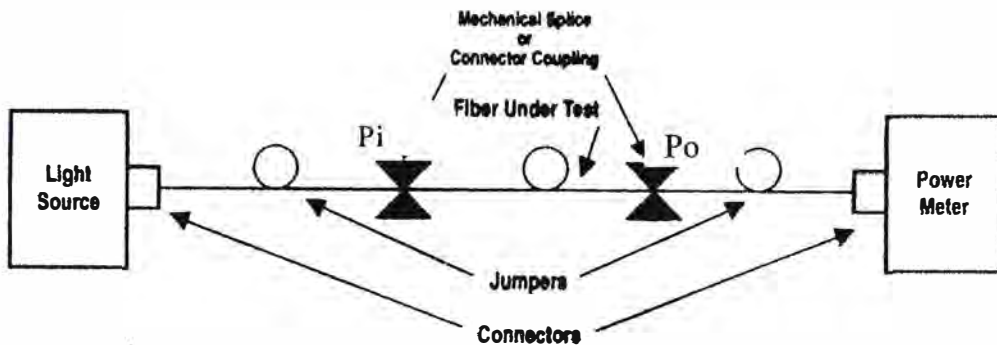


Figura 1.22 Medición de atenuación

$$At(dB) = P_i(dB) - P_o(dB) \quad (1.9)$$

1.9.2 Retro esparcimiento

Se refiere a las mediciones que se realiza con un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR). Más que mediciones lo que realiza el OTDR es una caracterización de toda la extensión de la fibra, desde un extremo a otro. En ella gráficamente puede notarse la atenuación del cable en toda la vía, así como identifica y localiza y las discontinuidades o pérdidas en los empalmes y conectores.

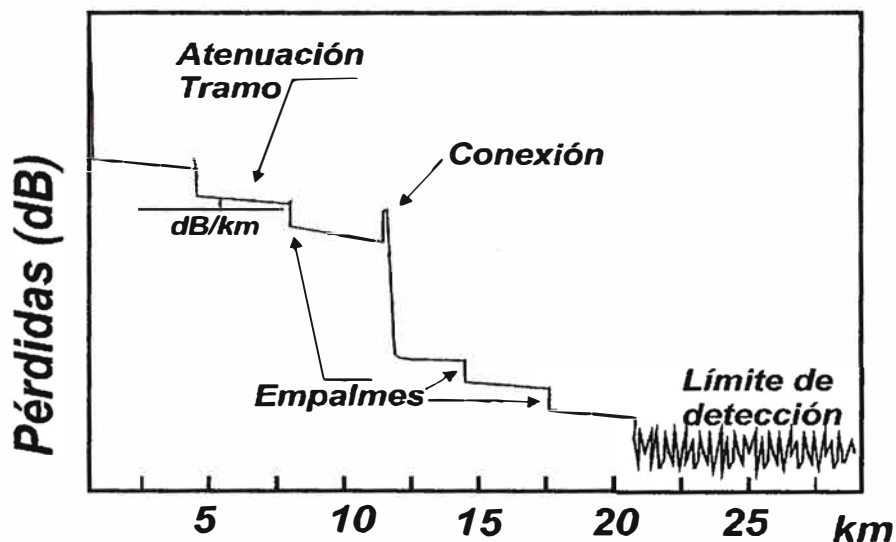


Figura 1.23 Gráfico de un OTDR

En la figura 1.23 se muestra una gráfica típica de un OTFR donde se nota el pico inicial que corresponde al repartidor óptico, así como las caídas en los empalmes. Al final de la traza se observan variaciones erráticas que tiene que ver con el límite de detección del equipo, llamado también como rango dinámico. El OTDR es un instrumento muy valioso para el mantenimiento porque puede identificar y localizar los cortes de la fibra en la planta exterior.

1.10 La multiplexación óptica

La demanda creciente de servicios de comunicaciones con un mayor contenido de información o mayor ancho de banda ha motivado el crecimiento de la infraestructura y la introducción de nuevas tecnologías. Dentro de este contexto se tiene la alternativa de ampliar la capacidad de los cables de fibra óptica o incrementar la capacidad de transmisión de las fibras que en están instaladas en dichos cables. De manera similar a los sistemas de comunicaciones por radio, en donde es posible que a través de dicho medio de transmisión pasar varias señales en ciertas ventanas de frecuencia; en las fibras ópticas es posible transmitir varias señales de distintas longitudes de onda en un solo portador óptico.

1.10.1 WDM

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una modalidad de transmisión, que consiste en enviar varias señales ópticas de diferente longitud de onda a través de una sola fibra. Con ello es posible incrementar la capacidad de transmisión enviando simultáneamente señales de diferentes sistemas analógicos y digitales; así como señales en ambos sentidos de transmisión. La figura 1.24 muestra el esquema del WDM.

WDM requiere un multiplexor o acoplador óptico en el lado transmisor que pueda combinar señales y un demultiplexor o filtro que pueda separar las señales en el lado receptor. El principio de funcionamiento de estos acopladores o filtros se basa en la interferometría y la refracción. En la figura 1.25 se muestra un demultiplexado a través de un prisma, el cual refracta el rayo luminoso compuesto en diferentes rayos que son luego enfocados a diferentes fibras (14). El mismo principio puede usarse para la multiplexación.

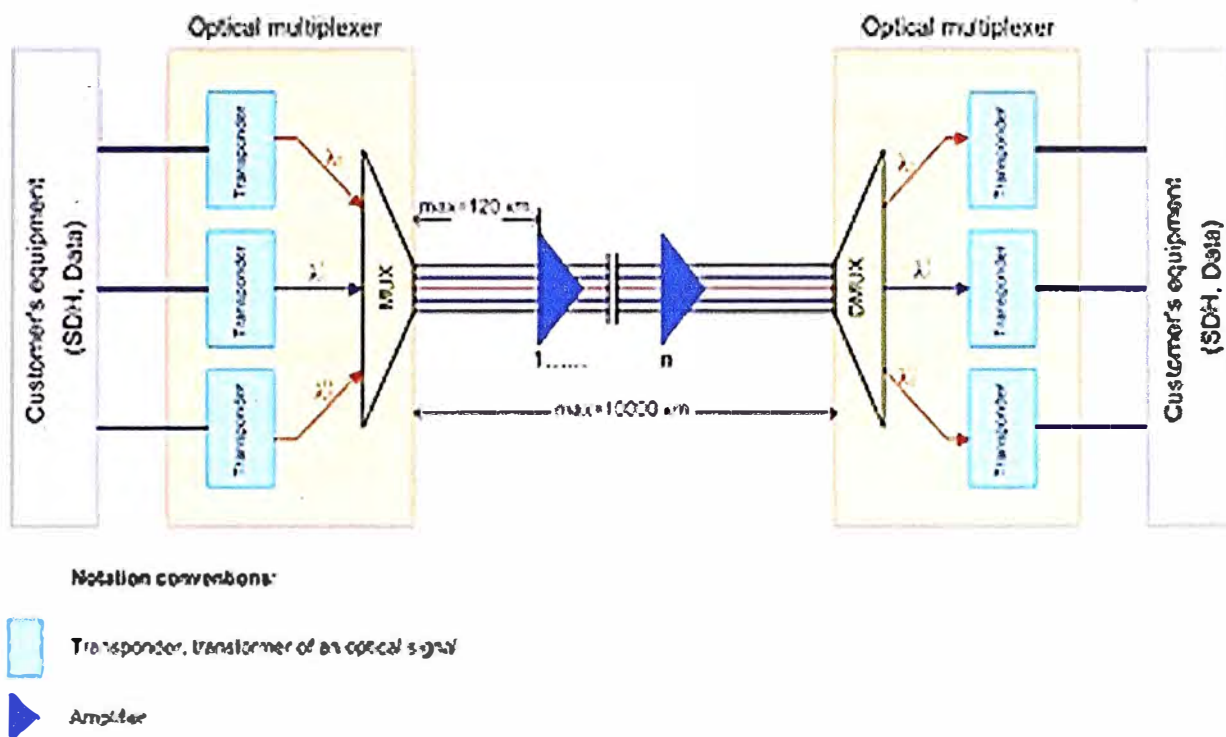


Figura 1.24 Esquema WDM

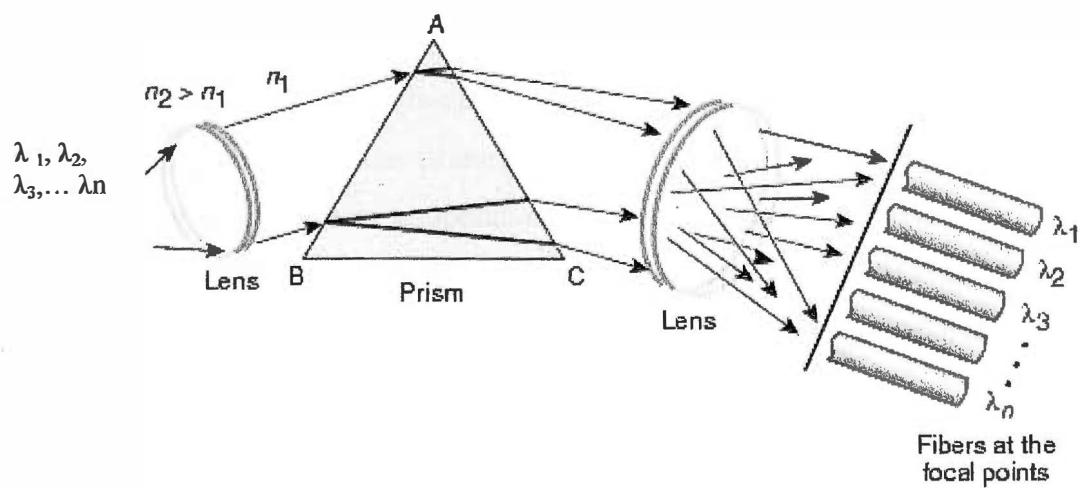


Figura 1.25 Demultiplexor óptico

Se presentan los siguientes tipos de DWM

a) CWDM:

La multiplexación por división aproximada de longitudes de onda se utiliza para transportar señal de video (CATV) en conductores de fibra multimodo. Tiene la recomendación: ITU-T G.694.2 .

Sus características principales son:

- Espaciamiento de frecuencias de 2.500 GHz (20nm), dando cabida a láseres de gran anchura espectral.
- 18 longitudes de onda, en el intervalo de 1270 a 1610 nm
- Los CWDM actuales tienen su límite en 2,5 Gbps.
- En cuanto a las distancias que cubren llegan hasta unos 80 km.
- Utilizan láser DBF (láseres de realimentación distribuidos) sin peltier ni termistor.
- Usa filtros ópticos de banda ancha, multiplexores y demultiplexores basados en TFF (tecnología de película delgada)
- Mayor espaciamiento de longitudes de onda, lo que indica que si hay una variación en la onda central debido a imperfecciones de los láseres producidos por procesos de fabricación menos críticos esta onda se mantendrá en banda.
- Mayor espectro óptico, esto nos permite tener un número de canales para utilizar sin que estos sean disminuidos a causa de la separación entre ellos

b) DWDM:

La Multiplexación por división densa de longitud de onda, ordena señales ópticas dentro de la tercera ventana de 1550 nm con una separación de 0.8 nm (cerca de 100 GHz).

Los sistemas DWDM tiene un mayor requisito de estabilidad de la longitud de onda, ya que entre cada una de ellas existe poco espacio dentro del espectro. Por lo que se requiere un control preciso de la temperatura de operación de los diodos láser. Debido a que DWDM proporciona una gran capacidad de información, se le utiliza en redes de mayor jerarquía que CWDM, por ejemplo en los backbone donde cursan grandes tasas de bits.

Las recientes innovaciones en los sistemas de transporte con DWDM módulos transceptores capaces de operar sobre 40 u 80 canales. Esto reduce dramáticamente la necesidad de usar módulos separados, ya que un solo módulo puede operar un gran rango de longitudes de onda. Hoy existen sistemas con separación de 50 Ghz y 25 Ghz que implican un espaciado de hasta 160 canales.

Se muestran a continuación algunos sistemas DWDM (13):

b1) 10.2 Tbps hasta 100 Km (Alcatel):

- Fibra Teralight
- 256 canales x 40 Gbps
- Amplificadores Erblio/Raman

b2) 3 Tbps hasta 7300 km (Alcatel):

- 300 canales (bandas C y L) x 10 Gbps
- Amplificadores EDFA

b3) 10.9 Tbps hasta 117 km (NEC)

- 273 canales (incluye bandas L, C, y S) x 40 Gbps
- Año 2004

b3) 40 Gbps hasta 1000km (Ciena) sobre 1 λ única

1.11 La dispersión de modo de polarización (PMD)

A la vez que los operadores de telecomunicaciones requieren de anchos de banda cada vez mayores, un nuevo fenómeno de dispersión impide la transmisión a tasas elevadas (por encima de 2.5 Gbps), ya que la afecta ensanchando el pulso. Esto implica el incremento de la tasa de errores y por lo tanto una limitación del ancho de banda, creando distorsión en las señales o limitando el número de canales.

La dispersión por modo de polarización (PMD) es un tiempo de retardo diferencial de grupo (DGD, differential group delay) entre dos modos ortogonalmente polarizados, que causa la dispersión de los impulsos en los sistemas digitales y distorsiones en los sistemas analógicos (15). La PMD es un fenómeno aleatorio causado por cambios locales o distribuidos de índice de refracción a lo largo y ancho de la fibra.

Este nuevo tipo de distorsión PMD se basa en que el campo electromagnético de la luz puede ser descompuesto en dos ejes ortogonales que se definen como modos de polarización o estados principales de polarización (PSP), que viajan independientemente a lo largo de la fibra y que dependiendo de las propiedades físicas de la fibra óptica pueden viajar a velocidades diferentes (modo rápido y modo lento), como muestra la figura 1.26. Este fenómeno llamado también birrefringencia (doble refracción), está relacionado a la dependencia del índice de refracción respecto a sus coordenadas cartesianas x, y z. Siendo

una fibra isotrópica cuando el índice de refracción es igual en todas las direcciones y anisotrópica cuando no lo es.

Ya que la birrefringencia afecta la velocidad de los modos de polarización, a su vez permite un intercambio de energía o acoplamiento entre los modos de polarización. Lo que trae como consecuencia el ensanchamiento del pulso, con lo cual se limita el incremento de la velocidad de modulación de la señal digital.

La PMD es una característica relacionada con el proceso de fabricación de la fibra, fabricación de cables, la instalación y su mantenimiento; así también con la temperatura. En cualquiera de estos procesos puede haber micro curvaturas, micro fisuras, alargamientos, aplastamientos, puntos de tensión mecánica, deformación del núcleo o del revestimiento; que varían las propiedades del portador óptico.

Las polarizaciones viajan a velocidades diferentes

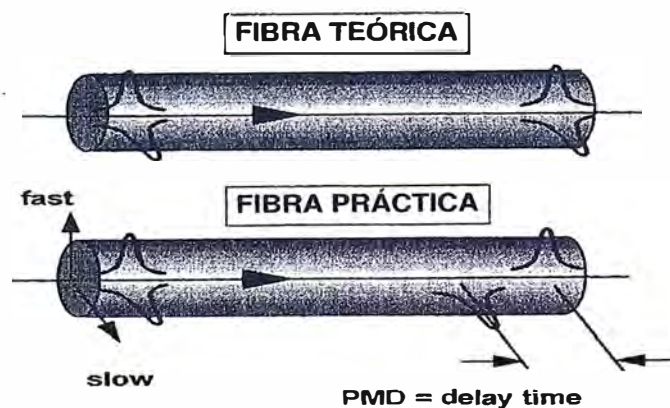


Fig. 1.26: Dispersión material y guía de onda (16)

Al igual que la atenuación es afectada por los esfuerzos mecánicos o excesivos radios de curvatura, estos factores también influyen en el PMD. Esta dispersión no debe considerarse como un retardo de la señal, sino como una distribución estadística de los retardos diferenciales de grupo (DGD) (16).

El retardo de grupo diferencial (DGD), conocido también como ($\Delta\tau$) medido en picosegundos, es la diferencia de tiempo en los retardos de grupo de los dos estados de polarización principal (PSP). Este retardo varía de manera aleatoria de acuerdo con la longitud de onda y factores ambientales, pudiendo haber una variación de hasta dos o tres veces el valor mínimo. Esta varianza hace que la PMD se incremente.

c) Medida del PMD:

La PMD se expresa normalmente en pico segundos para fibras de un largo conocido. La PMD viene a ser el promedio o la raíz cuadrática media del retardo de grupo diferencial (DGD), que es a su vez la diferencia de los retardos de grupo de los dos modos de polarización principal PSP (rápido y lento).

$$PMD = \text{Average}(DGD) \quad (1.10)$$

$$PMD = \text{RMS}(DGD)$$

La PMD también se puede expresar como coeficiente PMD, el cual es un valor normalizado para una particular longitud medida (L) y se expresa en ps/Km si el acoplamiento es débil. Para acoplamientos fuertes el coeficiente PMD se expresa en ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Un enlace de varias secciones de fibra tendrá coeficientes PMD diferentes al coeficiente de todo el enlace. La tabla 1.5 muestra la recomendación ITU T G.691.

Tabla 1.5. Recomendaciones PMD

Velocidad de transmisión (Gbps)	PMD máxima (ps)	Coficiente de PMD para 400 km de fibra (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
2.5	40	≤ 2.0
10	10	≤ 0.5
20	5	≤ 0.25
40	2.5	≤ 0.125

$$COEF_{PMD} = PMD / \sqrt{L} \quad (1.11)$$

d) PMD del enlace

La ITU-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones) recomienda que el retardo diferencial de grupo (DGD) máximo en un enlace de fibra óptica no debe superar el 30% del ancho o duración de un bit (TB), con el fin de no superar una penalidad de potencia de 1 dB producto de la distorsión provocada por la PMD. Considerando que la DGD tiene un comportamiento aleatorio y distribución Maxwelliana, la PMD debiera encontrarse en un rango menor a $DGD_{\text{máx}}/3$. Dado que $DGD_{\text{máx}}$ correspondería al 30% de TB. En otras palabras, el $PMD_{\text{máx}}$ permitido sería la décima parte del ancho del bit para una determinada velocidad de enlace, tal como se muestra en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Recomendaciones PMD

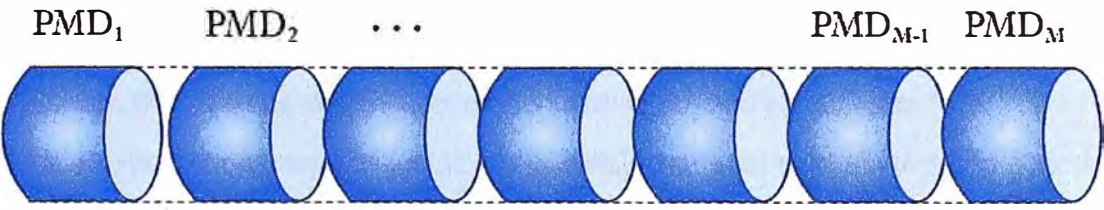
Velocidad de transmisión (Gbps)	TB (ps)	PMD máxima (ps)
2.5	400	40
10	100	10
20	50	5
40	25	2.5

En la tabla 1.7 se muestra como la ITU-T, en sus recomendaciones sobre cables de fibra óptica G.652 a G.656, realiza la especificación sobre el coeficiente PMD. En ella se establece que si se instala un enlace de fibra óptica con un determinado cable suministrado por cierto fabricante y que dicho enlace se despliega con 20 tramos o secciones iguales de cable empalmados; el enlace de 20 secciones tendrá un coeficiente PMD menor a 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Sólo habrá una probabilidad de 0.01 % de que el coeficiente PMD sea mayor al especificado.

Tabla 1.7 Especificación G.652.C

Coeficiente de PMD	M	20 cables
	Q	0.01%
	PMD _Q máximo	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Para un enlace que tiene M secciones de cable, se puede decir que cada sección tiene un coeficiente PMD que también tiene un comportamiento aleatorio, en el cual cada sección contribuye al coeficiente PMD total. En consecuencia el coeficiente PMD del enlace puede calcularse de la manera mostrada en la figura 1.27.



$$PMD_{LINK}(M) = \frac{1}{M^{1/2}} \times [PMD_1^2 + PMD_2^2 + \dots + PMD_M^2]^{1/2}$$

Fig. 1.27: Cálculo del coeficiente PMD de un enlace (17)

e) **Métodos de medida del PMD:**

La recomendación ITU T G.650.2 establece los siguientes métodos de medida: Interferométrico, Barrido de las longitudes de onda y Análisis de las matrices de Jones. En la tabla 1.8 se muestran los atributos de cada uno.

Tabla 1.8: Métodos de medida del PMD

	Interferométrico	Barrido de las longitudes de onda	Análisis de las matrices de Jones
Ventajas	Poco costoso	Rápido	Mejor cuando Δt está entre los estados de polarización
	Cálculo directo de la PMD promedio	Multi instrumento	Detalla cada estado
	Más rápido		Estadísticas detalladas sobre la PMD
	Insensible a las vibraciones en la fibra		Menor retraso
	No requiere comunicación extremo a extremo		
	Rango de hasta 100 ps		
	Rango dinámico relativamente amplio		
Desventajas	Resolución limitada por el ancho espectral de la fuente	Indirecto	Lento
	Polarización fija	Sensible a las vibraciones en la fibra	Sensible a las vibraciones en la fibra
	Un solo instrumento dedicado	Comunicación extremo a extremo	Comunicación extremo a extremo
		Costoso	Muy costoso
		Compromiso entre el rango dinámico (amplio rango espectral) y un valor elevado (estrecho rango espectral)	
	Un solo estado de polarización fijo		

1.12 Regeneradores

La señal que viaja a través de la fibra óptica sufre distorsiones debido a la atenuación de la potencia óptica, a los retardos asociados a la dispersión cromática y a la dispersión de modo de polarización PMD; así también como a las no linealidades en la fibra. Esos factores hacen que los pulsos se deformen en el lado receptor. Por lo que es necesario que un regenerador restablezca las señales recibidas a sus niveles originales.

Existen tres tipos de regeneradores (18) que se ilustran en la figura 1.28:

- 1R Regeneration: Amplificación de la señal, que a su vez añade ruido y no compensa las dispersiones temporales.
- 2R Regeneration / Reshaping: En la que se amplifica y se recupera la forma de la señal.
- 3R: Regeneration / Reshaping / Reclocking: En la que además de amplificar la señal, recupera su forma y la resincroniza, con lo cual se compensa los efectos de las dispersiones temporales y no linealidades de la fibra.

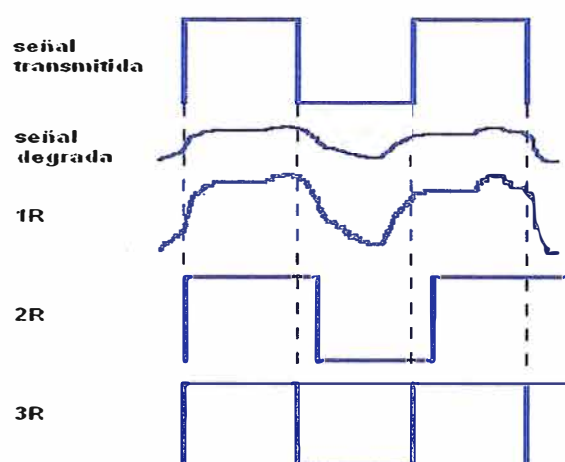


Fig. 1.28: Tipos de regeneradores (18)

1.12.1 Regeneradores electrónicos

Realizan la conversión de la señal óptica al dominio eléctrico, amplifica la señal eléctrica, la re sincroniza, recupera su forma y la vuelven a convertir al dominio óptico. Esto se realiza fotodetectando la señal como paso previo a la regeneración y posterior modulación de la portadora óptica con un nuevo transmisor.

Los regeneradores electrónicos forman parte de los sistemas de transmisión SONET- SDH, PDH, etc; en la que se requiere un regenerador cuando la distancia que separa a dos multiplexores terminales es muy grande y la señal óptica que se recibe es muy baja. El reloj del regenerador se apaga cuando se recibe la señal y a su vez el regenerador reemplaza parte de la cabecera de la trama de la señal antes de volver a retransmitirla. La información de tráfico que se encuentra en la trama no se ve alterada.

Algunos fabricantes añaden algún tipo de procesamiento de la señal con lo cual se puede lograr una compensación de la dispersión temporal. Para el caso de la PMD existen regeneradores del fabricante Huawei que pueden soportar una PMD de hasta 18 ps para un enlace de 10 Gbps, es decir 8 ps adicionales sobre la recomendación ITU-T de 10 ps.

1.12.2 Regeneradores ópticos

Como se ha mencionado las señales ópticas se distorsionan en su trayecto de transmisión. Estas degradaciones son más importantes conforme aumenta la longitud del enlace, la velocidad o el número de canales.

La tecnología de regeneración óptica permite un menor consumo de potencia y un tamaño de dispositivo más compacto, a la vez que puede proporcionar transparencia de protocolo y formato de señal. Las tecnologías se están enfocando en el tipo de regeneración 3R. Existen en proceso de comercialización e investigación dos esquemas:

a) Regeneradores 3R convencional

La regeneración 1R se realiza mediante un amplificador óptico EDFA. La regeneración 2R para poder suprimir el ruido y la diafonía requiere emplear un circuito de decisión o puerta óptica controlada por umbral. La regeneración 2R puede realizarse con estructuras interferométricas tipo SOA-MZI (Interferómetro Mach Zehnder y amplificador óptico semiconductor), la que es transparente a la tasa de bit hasta el límite de velocidad impuesto por la puerta óptica. En este caso, los canales WDM deben regenerarse individualmente.

Sin embargo la regeneración 3R requiere una señal de reloj óptica que es la parte esencial de la función de conformación (re-shaping). En la figura 1.29 se muestra un esquema de recuperación de reloj.

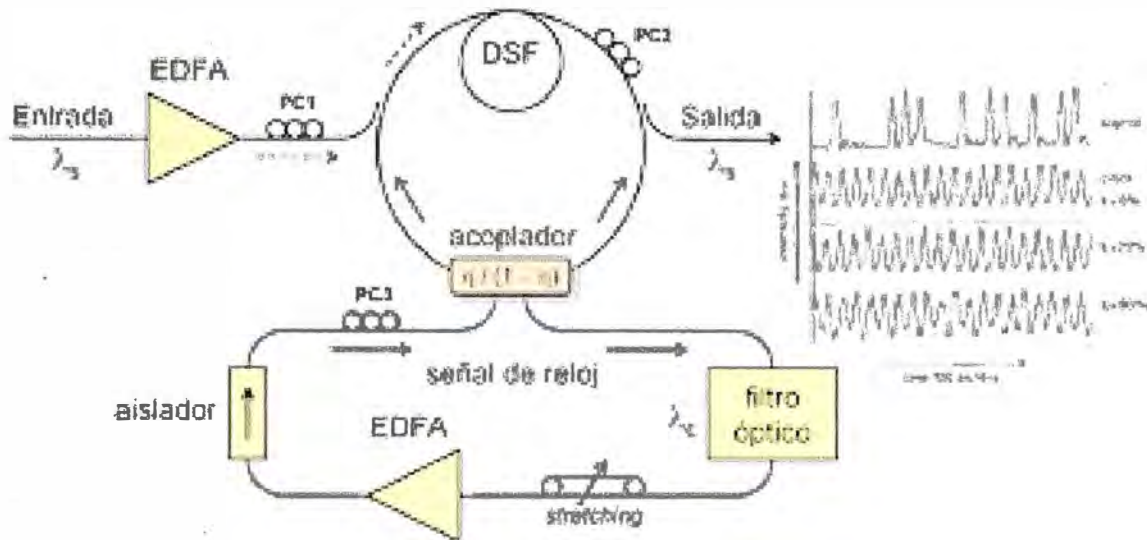


Fig. 1.29: Recuperación de reloj en regenerador 3R (19)

En figura 1.29 se aprecia la configuración formada por un EDFA, un filtro óptico centrado a la longitud de onda de la señal de reloj, un aislador y un modulador compuesto por unos 10 km de fibra de dispersión desplazada (DSF). Este tipo de modulador permite controlar el proceso de modulación ajustando el factor de acoplo del divisor de entrada. La señal de entrada se aplica a dicho modulador por medio de un acoplador 80/20. Ajustando la potencia de pico de dicha señal de entrada se puede conseguir una modulación de intensidad de baja desviación de frecuencia (chirp). Por otra parte, la señal de salida regenerada se extrae por medio de otro acoplador.

Existen sistemas que pueden cursar hasta 40 Gbps y en proceso de investigación sistemas de 100 Gbps.

b) Regeneradores 3R con QPSK

La transmisión óptica se ha realizado tradicionalmente mediante una modulación directa de la intensidad de la fuente de luz, así como de una foto detección directa de dicha intensidad, que está relacionada con la amplitud del campo eléctrico en el interior de la fibra. Sin embargo una detección de la amplitud y la fase del campo eléctrico permite compensar la dispersión cromática y la dispersión de modo de polarización (PMD) de manera significativa; con lo cual se pueden implementar enlaces de fibra óptica de 40, 100 y 160 Gbps.

El esquema de principio se muestra en la figura 1.30 donde la señal de banda base o tributaria después de haber pasado por un proceso de corrección de errores se divide en 4 señales para modular en fase y cuadratura un haz de laser.

Así en el otro extremo las señales son recuperadas y luego de un procesamiento de la señal con el dispositivo “Aguila Engine” se compensa la dispersión cromática y PMD.

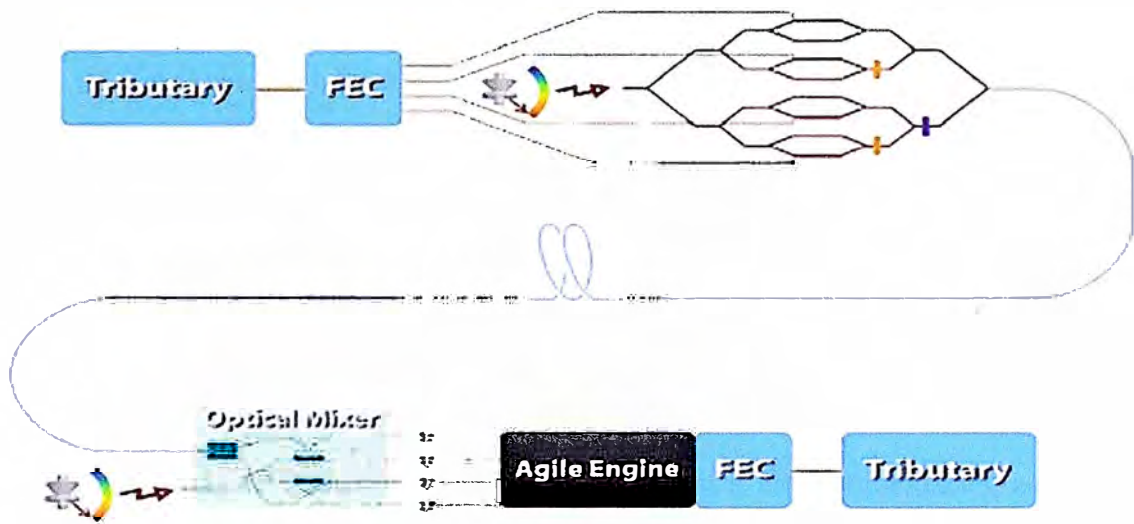


Fig. 1.30: Recuperación de reloj en regenerador 3R (20)

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

2.1 Introducción

El presente informe de suficiencia describe los problemas que tiene la fibra óptica nacional de Telefónica del Perú S.A.A. (Telefónica), empresa donde labora el autor del presente informe de suficiencia; para poder transmitir señales con velocidades por encima de los 2.5 Gbps. Telefónica es una empresa operadora de telecomunicaciones que mediante contrato de concesión con el estado peruano, presta servicios portadores, servicios de telefonía local y servicios de larga distancia nacional e internacional (21); con servicios concedidos de telefonía fija, telefonía pública, transmisión de datos, acceso a Internet y televisión por cable.

Los sistemas de comunicaciones que transmiten a altas velocidades, están condicionadas por los equipos de transmisión y por el portador óptico. A su vez cada uno de estos subsistemas tiene diferentes factores que limitan la velocidad. En el caso del portador óptico, se ha enunciado las limitaciones de las fibras multimodo y monomodo asociados a la dispersión modal, la dispersión cromática material y dispersión cromática guía de onda. Asimismo se ha tomado atención en la dispersión de modo de polarización (PMD).

El presente informe enfoca los problemas de velocidad de transmisión relacionados al PMD en fibras ópticas monomodo sin dispersión desplazada.

Para plantear el problema, se toma como guía los conceptos y procedimientos de la metodología de la investigación (22). Dentro de este contexto se establecen inicialmente alcances exploratorios en la medida de que los estudios relacionados con la dispersión de modo de polarización (PMD) no son abundantes. Seguidamente se trata de darle un alcance descriptivo buscando especificar las características principales del comportamiento del portador óptico con una PMD que se encuentra al margen de las recomendaciones ITU T. Posteriormente se trata de darle un alcance correlacional, tratando de encontrar asociaciones cualitativas entre la PMD y algunos factores como el proceso de fabricación de la fibra, su instalación, su operación y mantenimiento.

En tal sentido es que se describe como se está comportando la fibra óptica nacional en base a sus parámetros de transmisión, para luego establecer los objetivos generales y específicos del presente informe. Esto debe llevar a formularse algunas preguntas de investigación que servirán para enfocar la solución del problema de ingeniería. Asimismo la rigurosidad del trabajo exige sustentar o justificar el porqué se realiza el presente estudio, estableciendo los aportes que realiza el autor del presente informe en la creación de conocimiento o en la difusión de las mejores prácticas de operación y mantenimiento de fibra óptica. También se establece las limitaciones en cuanto a personas, recursos materiales, recursos financieros, equipos e instrumentos, etc., que impactan en la factibilidad o viabilidad del presente estudio.

2.2 Descripción del problema

2.2.1 Aspectos a considerar

En la formulación del problema se consideran los siguientes aspectos:

a) Aspectos acerca de la fabricación del cable de fibra óptica:

La fibra óptica nacional de Telefónica entró en operación en el año 1995. Se trata de un cable de fibra de 24 fibras monomodo sin dispersión desplazada, operando en la tercera ventana de 1550 nm. El fabricante es la compañía Alcatel, quien también provee equipos de transmisión. El cable tiene la especificación PKP para ser usado en conductos y PESP para ser usado directamente enterrado.

Los carretes de cable en su mayoría fueron de 5 km de longitud y cumplían las especificaciones de la norma ITU-T G.652 (03/93), en la que no se especificaba aun el coeficiente de dispersión de modo de polarización (23).

b) Aspectos acerca de la instalación del cable de fibra óptica:

La instalación del cable de fibra óptica en las rutas Lima-Trujillo, Lima-Arequipa, Trujillo-Tumbes, Arequipa-Tacna y Arequipa-Tumbes, demandó 2 años. La ruta tiene derivaciones intermedias o “entronques” que enlazan a las ciudades que no se encuentran en el camino de la ruta principal. La figura 2.1 muestra la red nacional de fibra óptica (24). Cada 50 a 100 km se encuentran los repetidores o regeneradores de fibra óptica que mantienen los niveles de potencia a lo largo de la vía.

El proceso de instalación a lo largo y ancho del país demandó el esfuerzo de muchas personas y grandes recursos de material, equipamiento y financieros. El mayor esfuerzo estuvo en la construcción de la canalización y zanja, ya que se ha tenido que luchar contra la naturaleza agreste y rocosa. Luego se ha realizado el tendido del cable de fibra óptica en conductos o directamente enterrado.



Figura 2.1: Fibra óptica nacional

Los primeros sistemas de transmisión soportados por fibra óptica fueron los denominados de jerarquía digital plesiócrona (PDH), operando en velocidades de 40, 140 y 565

Mbps. El incremento de velocidades en estos sistemas se realizó en muy breve tiempo, sobre todo en la ruta principal.

Con la demanda de nuevos servicios de telecomunicaciones se instalaron sistemas de transmisión con jerarquía digital síncrona (SDH o SONET), operando a velocidades de 2.5 Gbps. A la par del incremento de velocidades se ampliaron nuevos sistemas de transmisión utilizando otros portadores ópticos dentro del mismo cable de 24 fibras. La ocupación de nuevas fibras genera la saturación del estado de ocupación del cable, por lo que se adopta el uso del DWDM.

c) Aspectos acerca de la operación y mantenimiento del cable de fibra óptica:

La red nacional de fibra óptica se encuentra en la vía pública o al filo de las carreteras ya sea en zonas urbanas o rurales. El hecho de estar en el ámbito exterior al equipo de transmisión o de conmutación, denominado también planta exterior, lleva consigo a que el cable esté expuesto a una serie de riesgos de corte, rotura, robo o hurto.

Las entidades del gobierno central, gobierno regional, municipalidades, empresas de otros servicios públicos y personal naturales o jurídicas, continuamente están realizando ya sea obras de ampliación o mantenimiento de carreteras, remodelación de calles, pistas y veredas, ampliación de redes de agua o alcantarillado, etc. Aun cuando se establecen los niveles de coordinación para controlar las interferencias, los cables de fibra óptica son cortados o rotos.

Mención especial merece el caso de los robos o hurtos de cable de fibra óptica, cuyo acto generalmente se realiza cuando se le confunde con cables multipares de cobre, ya que este último es atractivo en el mercado informal de chatarra de cobre debido al incremento del precio internacional del cobre. Al cable de fibra óptica robado no se le conoce aun un beneficio que incentive dicha actividad delictiva.

Finalmente tenemos los riesgos debido a los desastres naturales. Las precipitaciones pluviales intensas, como las ocurridas durante el fenómeno El Niño en los años 1997-1998, generan grandes deslizamientos de tierra y agua que arrasan todo lo encuentran a su paso, rompiendo el cable de fibra óptica. En el caso del terremoto de Pisco del año 2007, la onda sísmica hizo que la superficie terrestre se deformara abruptamente, rompiendo el cable de fibra. En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran algunos daños a la fibra óptica nacional por intento de robo y debido a precipitaciones pluviales intensas.



Figura 2.2: daños a la fibra óptica por intento de robo

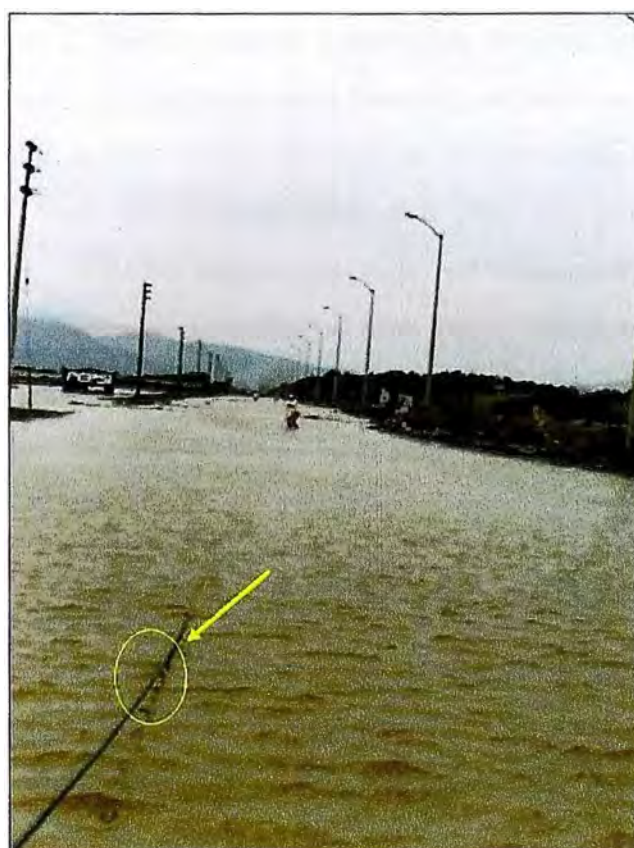


Figura 2.3: daños a la fibra óptica por precipitaciones pluviales intensas

En la figura 2.4 se muestra la incidencia de cortes en la fibra óptica nacional en 8 meses de dos años consecutivos teniendo una media de alrededor de 40 cortes en cada período.

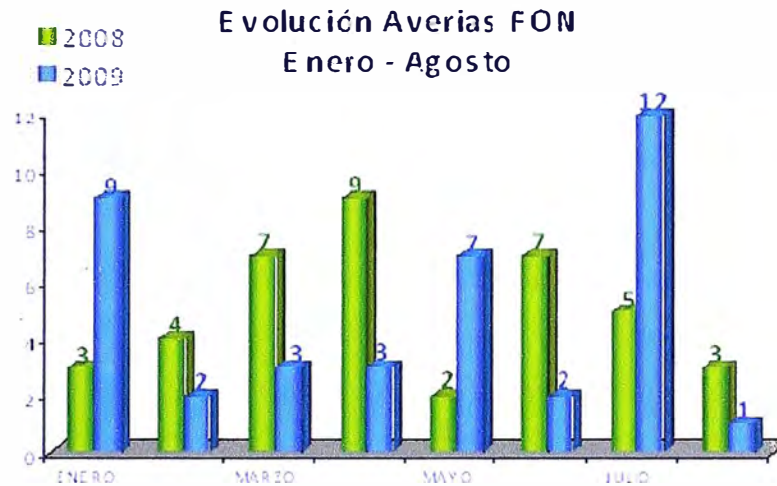


Figura 2.4: Cortes en fibra óptica nacional (24)

En la coyuntura actual los sistemas de transmisión de fibra óptica operan a una velocidad de 10 Gbps. Debido a la explosión de la demanda de servicios móviles y de acceso a Internet, se requiere que la fibra óptica nacional de un gran salto a la velocidad de 40 Gbps y usando DWDM. Para ello se desea saber si la fibra está preparada para soportar establemente los 10 Gbps y si podrá migrar a mayores velocidades. Por los conocimientos y conceptos establecidos en el marco teórico, se sabe que la dispersión temporal es la característica principal relacionada con la velocidad de transmisión. Sin embargo dentro de ellas la dispersión de modo de polarización (PMD) es la que tendrá gran impacto en la decisión de migrar a mayores velocidades.

2.2.2 Formulación del problema

Los enunciados establecidos en este capítulo respecto del tipo de fibra, relacionado con su proceso de fabricación, el proceso de su instalación y su comportamiento durante 15 años de operación; nos inducen a establecer que estos factores están relacionados con la capacidad de una red de fibra óptica de soportar altas velocidades.

Por otro lado los sistemas de comunicaciones DWDM que están compuestos por el equipo de transmisión, la fibra óptica y los módulos de supervisión del enlace; deben esta-

blecer enlaces a 10 Gbps. Para ello dentro del sistema (ejemplo Lima-Arequipa) se establecen enlaces con regeneradores (en Ica y Atico).

En cada enlace de regeneración se tiene un retardo diferencial de grupo (DGD), que no debe exceder las especificaciones del equipo de transmisión del fabricante, el cual es de 18 ps. Si bien es cierto que la ITU-T especifica una dispersión de modo de polarización (PMD), el cual es el promedio del DGD, de 10 ps para 10 Gbps; el fabricante del equipo excede esta especificación debido a sus sistemas de modulación propietario en el equipo DWDM suministrado.

En el caso específico del enlace de regeneración Ica-Atico, el DGD en la fibra de bajada era de 19.73 ps y en el de subida de 20.91 ps. Por lo que establecer un enlace de 10 Gbps no es posible en toda la ruta sur tal como se ilustra en la figura 2.5.

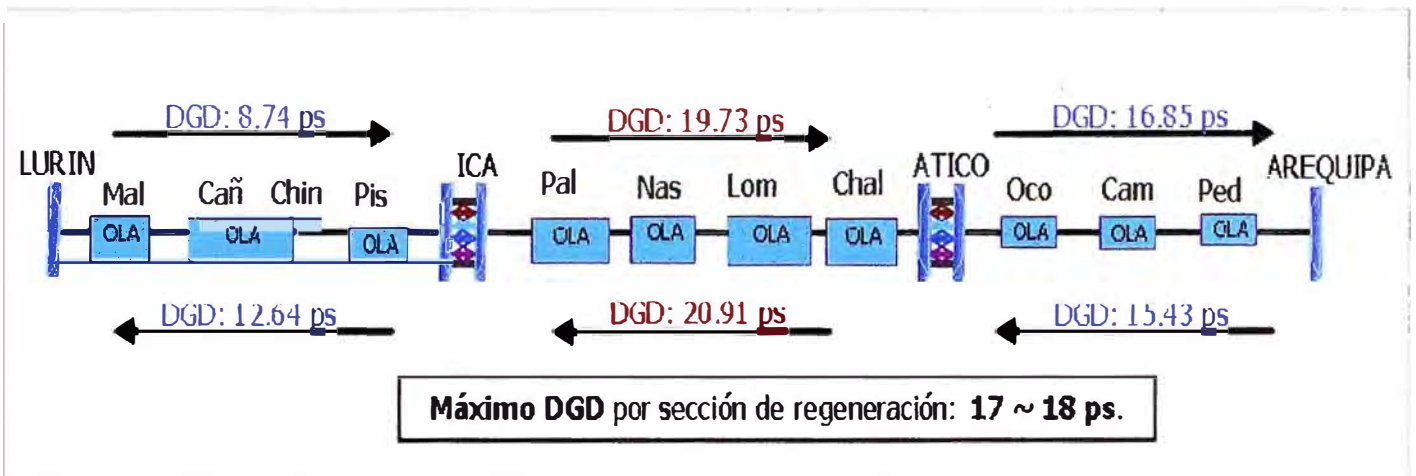


Figura 2.5: Enlaces de regeneración DWDM 10 Gbps (25)

De acuerdo con lo anterior En la tabla 2.1 se muestran las mediciones de PMD en el tramo Ica - Atico, donde se han encontrado fibras con el coeficiente PMD mayores a 0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$, que no cumplen la recomendación ITU-T descritas en la tabla 1.4 para una velocidad de 10 Gbps. Así mismo vemos la cantidad de empalmes y cortes de la fibra, que nos da una idea de cómo ha sido su comportamiento en los últimos 15 años.

Tabla 2.1: Medidas PMD en tramo Ica – Atico (24)

Tramo	Distancia (Km)	Atenuación (dB)	Cantidad de empalmes	Cantidad de cortes	Coef PMD		DGD		DGD diseño (ps)
					Min (ps/√km)	Max (ps/√km)	Min (ps)	Max (ps)	
Ica Palpa	93.0	21.5	15	9	0.82	1.69	7.88	16.30	4.82
Palpa Nazca	52.5	11.2	13	5	0.36	1.46	2.50	10.49	3.62
Nasca Lomas	94.6	20.8	18	7	0.75	1.84	7.32	17.88	4.86
Lomas Chala	90.9	19.1	14	7	1.36	1.42	12.94	13.52	4.77
Chala Atico	92.8	19.5	17	4	0.94	2.31	9.09	22.27	4.82

Por lo que el problema de ingeniería se plantea de la siguiente manera: **La fibra óptica nacional presenta limitaciones en ciertos tramos de la ruta sur para cursar velocidades de 10 Gbps y mayores a este, debido a que tanto el retardo diferencial de grupo de los enlaces de regeneración como el coeficiente de dispersión de polarización (PMD) de los tramos de fibra óptica, están por encima de las recomendaciones de la ITU-T.**

Esta identificación del problema nos lleva a formular las siguientes preguntas de investigación:

El proceso de fabricación, de la instalación y de la operación y mantenimiento del cable de fibra óptica, influyen en la limitación de la transmisión a altas velocidades?

Qué atributos de estos factores juegan un papel importante en la limitación de la transmisión a altas velocidades?

2.3 Objetivos del trabajo

El presente informe de suficiencia tiene los siguientes objetivos:

Plantear alternativas para que la fibra óptica nacional pueda soportar velocidades de transmisión mayor o igual a 10 Gbps.

Encontrar una asociación cualitativa entre los factores de fabricación, de instalación y de operación y mantenimiento con el PMD.

Resaltar la importancia de la PMD en la transmisión a altas velocidades.

Establecer, dentro del plan de mediciones de la fibra óptica, la medición del PMD como una actividad permanente que contribuirá en asegurar el tiempo de vida del cable.

2.4 Justificación

2.4.1 Conveniencia del informe

El presente informe de suficiencia, se realiza porque al identificar el problema que tiene la fibra óptica nacional para transmitir a altas velocidades, plantea un problema real en la infraestructura de muchas operadoras de telecomunicaciones; que limita su utilización en toda su capacidad y por lo tanto puede acortar su período de vida.

Asimismo el presente informe se realiza para formular alternativas de solución, cuando los valores fuera de rango de la PMD condicionan la capacidad de la fibra para soportar altas velocidades.

Por otro lado las alternativas propuestas, al permitir que la fibra óptica curse altas velocidades, hace viable que la operadores de telecomunicaciones puedan ampliar la capacidad de información de sus sistemas de transmisión; con lo cual se tornan aptas para absorber la demanda de nuevos servicios de voz, datos, acceso a Internet, televisión por cable, etc. Con ello se benefician los clientes al tener mayor facilidad para compartir información, realizar sus transacciones comerciales y de negocios, así como soportar la ampliación de la cobertura de las redes de acceso. Todo ello conlleva al desarrollo de la sociedad de información, al desarrollo socioeconómico del país y a la posibilidad de que la población tenga igualdad de oportunidades.

2.4.2 Aportes

Al desarrollar este trabajo, el autor del presente informe intenta aportar al estado del arte de la operación y mantenimiento de los sistemas de comunicaciones, la difusión de la problemática a la que se enfrentan los operadores de telecomunicaciones respecto a las limitaciones de la infraestructura óptica debido a la PMD.

Asimismo aportar a las mejores prácticas de operación y mantenimiento, en la identificación y solución de problemas relacionados a la PMD en las fibras ópticas.

Por otro lado contribuir al conocimiento práctico, en la necesidad de hacer un seguimiento al PMD para asegurar el ciclo de vida de la infraestructura de fibra óptica.

Finalmente contribuir en el desarrollo del conocimiento en aspectos del PMD, del cual no hay mucha difusión en el medio local.

2.5 Limitaciones del trabajo

Para desarrollar este trabajo, deben realizarse mediciones a la infraestructura de fibra óptica, luego de ello analizar los datos obtenidos, para identificar los problemas. Se-

guidamente formular una solución e implementarla. La complejidad de este proceso se complementa con ciertos factores que intervienen en su viabilidad.

2.5.1 Limitaciones geográficas

En tal sentido la fibra óptica nacional debe medirse en toda su extensión de 3,800 km. Debido a la gran longitud de la infraestructura debe acotarse a tramos o rutas donde se tienen datos preliminares con valores de la PMD fuera de rango. En el presente caso se enfocará en la ruta sur.

2.5.2 Limitaciones en equipamiento

Por otro lado para medir la PMD deben utilizarse instrumentos de medición que sean de última generación, que sean portátiles, que tengan gran autonomía para ser utilizados sin alimentación AC. Es decir los equipos deben tener capacidad para interconectarse con otros equipos de medida a través de interfases apropiadas y sobre todo a un ordenador (PC). Asimismo el equipo de medición debe transportarse en vehículos para llegar a los locales de los repartidores ópticos y tener la facilidad para realizar las conexiones en espacios limitados, por lo que importa el peso y el tamaño del equipo. Debido a que en muchos casos deben utilizarse en el terreno, en medio de la ruta, el equipo debe tener baterías con suficiente carga.

2.5.3 Limitaciones operativas

Al medir la PMD de los cables de fibra óptica, deben hacerse las pruebas en todas las fibras, ya sea estén en operación o estén libres. Para medir las fibras ocupadas debe cortarse el servicio temporalmente, lo que implica que se afectará el servicio que se brinda a los clientes. Por ello es primordial que las interrupciones sean programadas y en horas de menor tráfico, normalmente a partir de la 01:00 horas en la madrugada.

2.5.4 Limitaciones financieras

Al ser los equipos de medición de la PMD de última generación, el costo de los mismos es muy elevado, el cual requiere de una sustentación especial en las gestiones de aprobación de compra y adquisición.

Por otro lado el trabajo nocturno y el desplazamiento por toda la ruta de la fibra óptica nacional implica gastos adicionales en mano de obra, uso de combustible, viáticos y

otros gastos de viaje; que también requieren una sustentación especial al controlador de gastos de operación.

2.5.5 Limitaciones de tiempo

Las restricciones geográficas, de equipamiento y operativas pueden dar lugar a que un programa de mediciones de la PMD dure alrededor de 6 meses. A ello hay que agregarle el tiempo de identificación de problemas, formular las alternativas de solución e implementarlas. Esto dará lugar a que nuevamente se tengan que salvar restricciones financieras para el reemplazo de tramos de cable de fibra óptica o para insertar equipos de transmisión en la ruta con problemas.

2.6 Síntesis del trabajo

El presente informe de suficiencia elabora alternativas para corregir las desviaciones de la DGD de los enlaces de regeneración. Asimismo para corregir las desviaciones de la PMD de las rutas de cable en una red nacional de fibra óptica, de tal forma que le permita al medio de transmisión ofrecer una mayor capacidad para soportar velocidades de transmisión mayor o igual a 10 Gbps.

Lo anterior es apoyado por un conjunto de mediciones programadas para identificar tramos o rutas con valores de la PMD desviadas del marco normativo de la ITU-T. De acuerdo con ello se elaboran las alternativas de solución y se proyecta su implementación.

Asimismo se establece como práctica rutinaria del mantenimiento, el monitoreo de la PMD en los diferentes tramos y rutas del fibra óptica nacional.

CAPITULO III

METODOLOGIA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 Introducción

El problema planteado en el sentido de que el sistema de comunicaciones por la fibra óptica nacional en la ruta sur tiene limitaciones en ciertos enlaces y tramos de la ruta sur para cursar velocidades de transmisión de 10 Gbps y mayores a este, debido a que el DGD de los enlaces y el coeficiente de dispersión de polarización (PMD) están por encima de las recomendaciones ITU-T; implica que se deben identificar qué enlaces y tramos presentan limitaciones en toda la extensión de la fibra óptica nacional.

De esta manera se acota el problema para profundizar en las causas que lo originan y de esa manera formular las alternativas de solución. Por lo que el procedimiento a seguir será de acuerdo con metodología para identificación y solución de problemas. En la figura 3.1 se muestra la metodología para la solución del problema planteado.



Fig. 3.1 Metodología para la solución del problema

3.1.1 Precisión del problema

Para acotar la magnitud del problema se realizan mediciones en toda la ruta sur desde Lima hasta Tacna, en una longitud total de 1503 km tal como muestra la tabla 3.1. Para ello se ha tenido que desplazar personal desde Lima hacia las diferentes repetidoras de fibra óptica con los equipos de medición correspondientes.

Tabla 3.1 Ruta sur de fibra óptica nacional

Item	Enlace	Velocidad	Tramo	Km	Total
1			Lurín-Mala	54	
2			Mala-Cañete	63.5	
3	Lurín - Ica	10 Gbps	Cañete-Chincha	57.2	298.8
4			Chincha-Pisco	42.8	
5			Pisco-Ica	81.3	
6			Ica-Palpa	91.8	
7	Ica - Atico	10 Gbps	Palpa-Nazca	51.9	420.8
8			Nazca-Lomas	93.3	
9			Lomas-Chala	90.2	
10			Chala-Atico	93.6	
11	Atico - Arequipa	10 Gbps	Atico-Ocoña	85.2	329.4
12			Ocoña-Camaná	59.6	
13			Camaná-Pedregal	80.6	
14			Pedregal-Arequipa	104	
15	Arequipa - Tacna	2.5 Gbps	Arequipa-San José	53.3	454
16			San José-Mollendo	75.9	
17			Mollendo-Fiscal	52.6	
18			Fiscal-Moquegua	109.8	
19			Moquegua-Camiara	72.7	
20			Camiara-Tacna	89.7	
Total				1503	1503

a) Mediciones de la ruta sur:

Las mediciones consisten en pruebas reflectométricas y de la PMD. Las primeras sirven para explorar gráficamente discontinuidades en la fibra, mientras que con la segunda se mide directamente el retardo de grupo diferencial (DGD), el cual servirá para calcular la PMD y el coeficiente PMD. En la tabla 3.2 se dan los resultados de los tramos.

Para realizar las mediciones de PMD se ha utilizado el equipo FTB 5700 que puede medir adicionalmente la dispersión cromática, que para el presente caso no tiene relevancia dado que la fibra óptica tiene compensadores de dispersión cromática en los equipos de transmisión. Las mediciones de DGD, PMD y coeficiente PMD se han realizado en cada tramo de repetición, denominado también “spam”. Con los valores de cada tramo es posible determinar los valores de DGD del enlace (entre regeneradores).

El equipo FTB 5700 toma lecturas directas de la longitud del tramo de repetición y mediciones consecutivas de la DGD para cada fibra a medir, para luego sacar un promedio (PMD). El coeficiente PMD de cada tramo se calcula con la formula 1.11:

$$COEF_{PMD} = PMD / \sqrt{L}$$

El DGD del enlace se obtiene sumando las contribuciones elevadas al cuadrado del DGD de cada tramo y a dicho resultado se le saca la raíz cuadrada:

$$DGD_{enlace} = \sqrt{(DGD_1^2 + DGD_2^2 + \dots + DGD_n^2)} \quad (3.1)$$

Tabla 3.2 Resumen mediciones PMD ruta sur

Enlace	Tramo	Distancia (Km)	Cantidad fibras FON	Cantidad fibras con Coef PMD menor a 0.5 (ps/·km)	% fibras con Coef PMD > 0.5 (ps/·km)	Coef PMD		DGD (ps)	DGD Max (ps)	DGD de diseño (ps)	DGD enlace Min 1 (ps)
						Min (ps/·km)	Max (ps/·km)				
Lurín - Ica	Lurín - Mala	55.6	18	3	83%	0.12	2.42	0.89	18.05	3.73	7.6
	Mala - Cañete	63.7	18	1	94%	0.49	0.89	3.87	7.07	3.99	
	Cañete - Chinchá	58.0	18	0	100%	0.64	2.11	4.87	16.07	3.81	
	Chinchá - Pisco	45.1	18	0	100%	0.52	3.26	3.49	21.88	3.36	
	Pisco - Ica	83.6	18	8	56%	0.27	2.81	2.47	25.69	4.57	
Ica - Atico	Ica - Palpa	93.0	18	0	100%	0.72	2.27	6.94	21.89	4.82	14.3
	Palpa - Nazca	52.5	18	1	94%	0.48	4.22	3.48	30.58	3.62	
	Nasca - Lomas	94.6	18	0	100%	0.67	4.36	6.52	42.41	4.86	
	Lomas - Chala	90.9	18	0	100%	0.60	2.28	5.72	21.74	4.77	
Atico - Arequipa	Chala - Atico	92.8	18	0	100%	0.86	2.70	8.28	26.01	4.82	14.9
	Atico - Ocoña	85.2	18	0	100%	0.55	3.39	5.08	31.29	4.62	
	Ocoña - Camana	59.6	18	0	100%	0.87	3.72	6.72	28.73	3.86	
	Camana - Pedregal	80.6	18	0	100%	0.75	3.44	6.73	30.89	4.49	
Arequipa - Tacna	Pedregal - Arequipa	103.0	18	0	100%	1.02	3.27	10.35	33.19	5.07	10.9
	Arequipa - San José	52.4	18	2	89%	0.41	3.13	2.97	22.65	3.62	
	San José - Mollendo	76.0	18	0	100%	0.56	2.45	4.88	21.35	4.38	
	Mollendo - Fiscal	52.6	18	8	56%	0.33	2.35	2.39	17.05	3.63	
	Fiscal - Moquegua	110.1	18	0	100%	0.64	2.28	6.72	23.92	5.25	
	Moquegua - Camiara	74.2	18	2	89%	0.27	2.01	2.33	17.31	4.31	
Camiara - Tacna	90.7	18	0	100%	0.57	2.37	5.43	22.57	4.76		

b) Análisis de resultados:

De acuerdo con la tabla 3.2 se observa hay muy pocas fibras ópticas en cada tramo cuyo coeficiente PMD es menor a 0.5 ps/√km, es decir la generalidad es que las fibras ópticas en cada tramo de regeneración por si mismas no soportarían una velocidad de transmisión de 10 Gbps, si es que los enlaces regeneradores tuvieran un DGD máximo de 10 ps. Sin embargo debido a que los regeneradores suministrados por el fabricante pueden

aceptar valores de DGD de 18 ps, se puede observar que la fibra óptica en la ruta sur si soporta velocidades de 10 Gbps.

Asimismo se puede observar que los enlaces que están más críticos son los de Ica – Atico y el de Atico – Arequipa.

3.2 Alternativas de solución

La solución de ingeniería al problema planteado implica dar una visión completa al sistema de comunicaciones por fibra óptica, es decir dentro del ámbito de la transmisión y dentro del ámbito del cable portador óptico. Asimismo debe plantearse soluciones de corto y mediano plazo así como definitivas o de largo plazo. Dentro de este contexto la tabla 3.3 muestra dichas alternativas de solución.

Tabla 3.3: Alternativas de solución

Solución	Velocidad	Cable óptico	Equipo de Transmisión
Corto a mediano plazo	10 a 40 Gbps	Identificar fibras con menor coeficiente PMD	Instalación de regeneradores ópticos e incremento de canales DWDM
Largo plazo	100 Gps a más	Tendido de nuevo portador óptico	Instalación de equipos con modulación óptica QPSK
		Alquiler de fibras oscuras a portador de telecomunicaciones	Instalación de equipos con modulación óptica QPSK

3.2.1 Identificar fibras con menor coeficiente PMD

De acuerdo con las mediciones reflectométricas y de PMD en cada tramo de repetición, se determinan aquellas que tienen menor coeficiente PMD y por lo tanto que contribuyen en menor medida al DGD del enlace correspondiente.

Con estas fibras que por ser de distinta numeración o mejor dicho que ocupan cualquiera de las posiciones dentro del repartidor óptico y que por lo tanto que ya no tienen una distribución ordenada, se establece un circuito para el enlace principal del equipo DWDM. Asimismo se determinan las fibras siguientes que tienen menor coeficiente PMD para construir circuitos de respaldo para el equipo de transmisión.

Estas fibras principales y de respaldo deben ser registradas y comunicadas al personal de mantenimiento, de tal forma que cuando se desee reemplazar fibras averiadas, las hagan con las fibras de respaldo.

3.2.2 Instalación de regeneradores ópticos e incrementar los canales DWDM

Los enlaces Ica-Atico y Atico-Arequipa tienen DGDs de 14.3 ps y 14.9 ps respectivamente. Si hubiera algún deterioro posterior del cable óptico, estos valores podrían exceder los límites de 18 ps que tienen los transpondedores de los equipos suministrados por el fabricante. En consecuencia conviene insertar un regenerador en cada uno de estos enlaces. Uno sería en el repetidor (amplificador óptico) de Chala y el otro en el repetidor de Pedregal.

El fabricante especifica que si el DGD del enlace está por debajo de los 18 ps, se garantizan las velocidades de 10 Gbps para cada uno de los canales DWDM. Con lo cual es posible soportar la demanda de tráfico y velocidad de los usuarios del operador de telecomunicaciones.

Asimismo el fabricante está ofreciendo equipos con modulación óptica en las cuales con un DGD de enlace de 18 ps, puede cursarse velocidades de 40 Gbps.

3.2.3 Tendido de nuevo portador óptico

La fibra óptica instalada en el año 1995 no tiene una especificación para el PMD, ya que la recomendación de ese entonces ITU-T G.652 de 1993 no establecía recomendaciones al respecto. En consecuencia es necesario renovar el sistema de transmisión con un cable de fibra óptica que cumpla la mejor especificación respecto al PMD y demás características. Por lo que se plantea el uso de un cable de fibra óptica que cumpla con la recomendación ITU-T G.655 para cables de fibra óptica mono modo con dispersión desplazada no nula y cuyos valores máximos de PMD están en el orden de $0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Con este portador óptico se pueden soportar fácilmente velocidades de 40 Gbps en enlaces de 400 km. Asimismo ofrece una gran estabilidad para sistemas DWDM. El cable óptico actual servirá para dar respaldo a usuarios específicos específicos como bancos y empresas, así también para dar soporte a los sistemas de menor velocidad.

3.2.4 Instalación de equipos y regeneradores 3R con modulación QPSK

En la actualidad los fabricantes están suministrando equipos de transmisión con modulación óptica y procesamiento de señales que permiten cubrir distancias muy largas y

con velocidades de transmisión de 160 Gbps. Estos equipos denominados también super DWDM tendrán la capacidad para soportar el incremento sostenido de los usuarios que cada día requieren mayores servicios y mayores velocidades.

3.2.5 Alquiler de fibras oscuras a portador de telecomunicaciones

La opción de construir una red de fibra óptica requiere un fuerte gasto de capital, cuya fuente de financiamiento generalmente no se encuentra disponible, por lo que últimamente la opción de alquilar fibras oscuras a un portador de servicios de telecomunicaciones sigue siendo válida. Muchos operadores de telecomunicaciones alquilan fibras ópticas a empresas portadoras. El operador que alquila las fibras está obligado a poner el equipo de transmisión.

3.3 Solución al problema

Se ha planteado la solución del problema en dos escenarios, en el corto y largo plazo. En el corto plazo la solución pasa por identificar las fibras ópticas que tienen menor coeficiente PMD para que puedan soportar las velocidades de 10 Gbps. Asimismo debe complementarse con la instalación de dos regeneradores, uno en Chala y el otro en Pedregal.

Para el largo plazo se presentan varias alternativas: entre tender un nuevo portador óptico o alquilar fibras oscuras a un portador de servicios de telecomunicaciones. Asimismo competir con la opción de instalar nuevos equipos de transmisión.

3.3.1 Solución de corto plazo

En la figura 3.2 se muestra la configuración de sistemas con regeneradores intermedios en Chala y Pedregal.

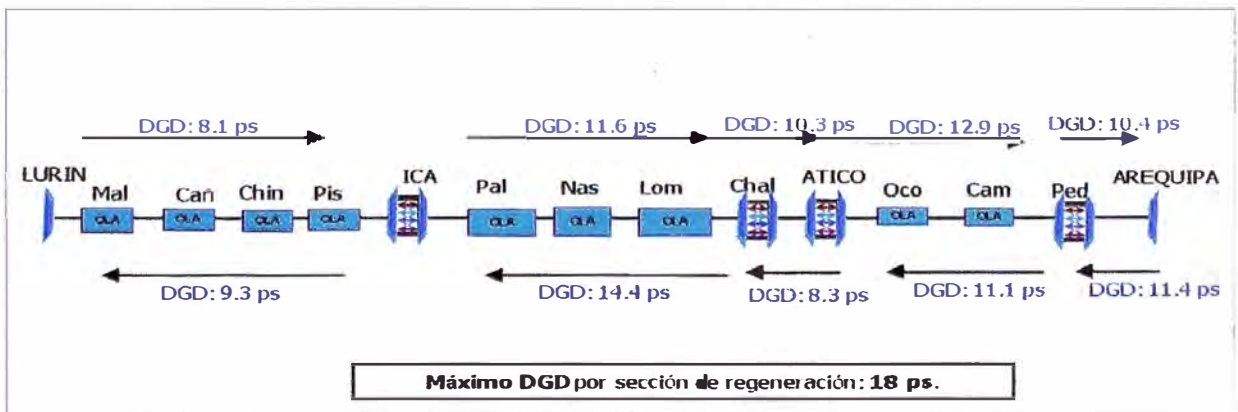


Figura 3.2: Sistema con regeneradores intermedios en Chala y Pedregal

En la tabla 3.4 se muestran 4 fibras de cada tramo de repetición que serán conectadas al equipo de transmisión DWDM. Dos de ellas serán para el circuito principal y las otras como respaldo. Se han identificado aquellas que tienen menor aporte al PMD.

Tabla 3.4: Fibras con menor aporte al PMD

Enlace	Tramo	Longitud FO. (Km)	Fibra N°	Coef PMD (ps/√Km)	DGD (ps)
Lurín - Ica	Cañete - Chincha	58.9	4	0.64	4.91
		58.9	8	0.81	6.22
		58.9	5	0.83	6.37
		58.9	15	0.87	6.68
	Chincha - Pisco	45.1	17	0.52	3.49
		45.1	6	0.74	4.97
		45.1	14	0.77	5.17
		45.1	10	0.85	5.71
	Pisco - Ica	83.6	3	0.27	2.47
		83.6	11	0.29	2.65
		83.6	10	0.41	3.75
		83.6	18	0.42	3.84
Ica - Atico	Ica - Palpa	94.0	6	0.72	6.98
		94.0	5	0.89	8.63
		94.0	1	1.02	9.89
		94.0	18	1.12	10.86
	Palpa - Nazca	52.6	15	0.48	3.48
		52.6	17	0.63	4.57
		52.6	14	0.80	5.80
		52.6	7	0.81	5.87
	Nazca - Lomas	94.7	3	0.67	6.52
		94.7	14	0.83	8.07
		94.7	15	1.00	9.73
		94.7	5	1.09	10.60
	Lomas - Chala	90.9	17	0.60	5.72
		90.9	4	0.72	6.86
		90.9	15	0.73	6.96
		90.9	1	0.94	8.96
	Chala - Atico	93.7	16	0.86	8.32
		93.7	9	1.07	10.36
		93.7	18	1.22	11.81
		93.7	7	1.27	12.29
Atico - Arequipa	Atico - Ocoña	85.2	9	0.55	5.08
		85.2	14	0.62	5.72
		85.2	4	0.70	6.46
		85.2	5	0.95	8.77
	Ocoña - Camaná	59.6	5	0.87	6.72
		59.6	21	0.87	6.72
		59.6	12	1.09	8.42
		59.6	1	1.10	8.49
	Camaná - Pedregal	80.7	20	0.75	6.74
		80.7	1	1.09	9.79
		80.7	8	1.14	10.24
		80.7	3	1.15	10.33
	Pedregal - Arequipa	104.4	4	1.02	10.42
		104.4	8	1.12	11.44
		104.4	12	1.14	11.65
		104.4	10	1.25	12.77

3.3.2 Solución de largo plazo

a) Criterios para la decisión

En la tabla 3.5 se muestran los criterios para decidir entre una y otra alternativa las que se explican a continuación:

Tabla 3.5: Criterios para decidir la solución definitiva

Criterios de decisión	Tendido de nuevo portador óptico (750 km)	Alquiler de fibras oscuras a portador de telecomunicaciones	Instalación de equipos con modulación óptica QPSK entre Lurin y Arequipa
Costo inicial (MM S/.)	75	1.5	9
Costo recurrente anual (MM S/.)	1.5	1.5	0,5
Costo de renovación de equipos cada 5 años (MM S/.)			27
Costo total en 20 años (MM S/.)	105	30	46
Posibilidad de crecimiento en tráfico	alto	bajo	alto
Imagen de marca	alto	bajo	medio

Costo inicial:

Para el caso de la instalación de un cable de fibra óptica se refiere a la inversión para ejecutar obras civiles, tendido de cable, empalme y conexas. El costo es de S/. 100 Mil soles por cada kilómetro.

Para el caso del alquiler de fibras oscuras, es el costo de instalar un cable de fibra óptica dividido entre 10 años de recuperación de la inversión y dividido por un factor de 5 que está relacionado al factor de ocupación de las fibras.

Para el caso del sistema de transmisión es la inversión de instalar equipos terminales y regeneradores en 15 estaciones de la zona sur.

Costo recurrente anual:

Son los gastos de mantenimiento de la fibra óptica y equipo de transmisión, así del alquiler anual de las fibras oscuras.

Costo de renovación de equipos:

Los equipos de transmisión tienen un período de vida útil de 5 años ya que cambian de tecnología continuamente.

Costo total en 20 años:

El tiempo de vida útil del cable de fibra óptica se estima en 20 años, por lo que se establece como horizonte para todas las alternativas.

Posibilidad de crecimiento de tráfico:

Los cables de fibra óptica ofrecen una mayor posibilidad de crecimiento de tráfico, ya que si los equipos DWDM llegan a saturarse se pueden tomar fibras adicionales para instalar nuevos sistemas de comunicaciones. Con lo cual hay grandes posibilidades de soportar la explosiva demanda de tráfico de los usuarios. En el caso del alquiler de fibras oscuras, dependerá de la disponibilidad de fibras con que cuente el portador de telecomunicaciones.

Imagen de marca:

El mercado de las telecomunicaciones está atendido por pocos operadores quienes han desplegado una enorme infraestructura en todo el país. Esta infraestructura soporta los servicios de voz, datos, acceso a Internet y multimedia. La inversión en infraestructura de telecomunicaciones aparte de ser un requisito en el marco regulatorio y llega a convertirse en una ventaja competitiva de un operador respecto del otro. Por lo que la decisión de alquilar fibras oscuras a otro operador competidor o a un portador de telecomunicaciones no contribuye a la imagen de marca del operador que renta infraestructura.

b) Decisión

La decisión para el largo plazo será instalar un nuevo cable de fibra óptica para renovar la infraestructura de telecomunicaciones. Así mismo irá acompañado con la inversión en equipos de transmisión para establecer sistemas de grandes velocidades por encima de 100 Gbps. Dado que la inversión es significativa se tiene que elaborar el caso de negocio y buscar la fuente de financiamiento. Asimismo dado que la cartera de inversiones para el año 2010 está programada conforme al marco inversor, se propondrá su ejecución para el año 2011.

3.4 Recursos humanos y equipamiento

Para la solución de corto plazo, la tabla 3.6 muestra los recursos utilizados así como el personal involucrado en la medición y en la posterior conexión de las fibras que tienen menor contribución a la PMD.

Tabla 3.6: Personal y recursos para medición de PMD

Rubro	Unidad de medida	Cantidad	Comentario
Medición PMD	tramo de repetición	20	Trabajo programado a partir de la 01:00 horas
Personal	técnico	2	Uno en cada extremo del tramo
Reflectómetro OTDR	c/u	1	AXS 110 marca Exfo
Medidor PMD	c/u	1	FTB 5700 marca Exfo
Duración medición	día	40	Incluye desplazamiento desde Lima
Duración conexionado de fibras	día	40	Incluye trabajo programado a partir de la 01:00 horas y desplazamiento desde Lima

La tabla 3.7 muestra el equipamiento que se solicitará al proveedor para instalar 2 regeneradores y el equipo complementario para incrementar en dos lambdas la ruta de 10 Gbps.

Tabla 3.7: Equipamiento para la regeneración a 10 Gbps

Rubro	Unidad de medida	Cantidad	Comentario
Regenerador 10 Gbps con dos lambdas	c/u	2	Para ser instalados en Chala y Pedregal
TMX (2.5G to 10G) para 5 lambdas 10 Gbps	c/u	2	Para ser instalados en Chala y Pedregal
Cambio de tarjetas LBE por LBFS para 2 lambdas de 10 Gbps	c/u	10	Para ser instalados en Lurín, Ica, Chala, Atico, Pedregal y Arequipa

CAPITULO IV

ANALISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1. Introducción

El análisis de los datos y la presentación de resultados se enfocan en las mediciones de la PMD en el cable de fibra óptica, ya que es la actividad más inmediata a realizar. En cuanto a la instalación de dos regeneradores se muestran los valores esperados, ya que aun no se ha ordenado al proveedor la instalación de dichos equipos.

4.2 Análisis descriptivo y estadístico de la información relativa a las variables de estudio.

En la tabla 4.1 se vuelven a mostrar los valores de las mediciones del coeficiente PMD. En ella mostramos los valores mínimos y máximos encontrados en cada tramo de repetición. Se ha planteado que la PMD debe estar relacionado a tres factores, que las denominaremos variables: el proceso de fabricación, el proceso de instalación y la operación y mantenimiento.

La variable proceso de fabricación no se puede establecer dentro del proceso de medición. Lo que si se sabe es que está subyacente en todo el proceso de comportamiento de instalación y mantenimiento.

La variable proceso de instalación la relacionaremos con la distancia del tramo de repetición considerando que a mayor distancia es más probable que la fibra óptica en el cable sufra estiramientos. Otra alternativa sería relacionarla con la cantidad de empalmes.

La variable proceso de operación y mantenimiento la relacionamos con la cantidad de cortes que ha tenido el tramo en 15 años de operación.

Tabla 4.1: Mediciones PMD en la ruta sur

Enlace	Tramo	Distancia (Km)	Cantidad de empalmes	Cantidad de cortes	Cantidad de empalmes y cortes	Cantidad de fibras FON	Cantidad de fibras con Coef PMD menor a 0.5 (ps/√km)	% fibras con Coef PMD > 0.5 (ps/√km)	Coef PMD	
									Min (ps/√km)	Max (ps/√km)
Lurín - Ica	Lurín - Mala	55.6	24	12	36	18	3	83%	0.12	2.42
	Mala - Cañete	63.7	23	10	33	18	1	94%	0.49	0.89
	Cañete - Chincha	58.0	17	11	28	18	0	100%	0.64	2.11
	Chincha - Pisco	45.1	14	8	22	18	0	100%	0.52	3.26
Ica - Atico	Pisco - Ica	83.6	23	9	32	18	8	56%	0.27	2.81
	Ica - Palpa	93.0	15	9	24	18	0	100%	0.72	2.27
	Palpa - Nazca	52.5	13	5	18	18	1	94%	0.48	4.22
	Nasca - Lomas	94.6	18	7	25	18	0	100%	0.67	4.36
	Lomas - Chala	90.9	14	7	21	18	0	100%	0.60	2.28
Atico - Arequipa	Chala - Atico	92.8	17	4	21	18	0	100%	0.86	2.70
	Atico - Ocoña	85.2	16	6	22	18	0	100%	0.55	3.39
	Ocoña - Camana	59.6	11	3	14	18	0	100%	0.87	3.72
	Camana - Pedregal	80.6	14	2	16	18	0	100%	0.75	3.44
Arequipa - Tacna	Pedregal - Arequipa	103.0	31	4	35	18	0	100%	1.02	3.27
	Arequipa - San José	52.4	14	2	16	18	2	89%	0.41	3.13
	San José - Mollendo	76.0	19	7	26	18	0	100%	0.56	2.45
	Mollendo - Fiscal	52.6	10	3	13	18	8	56%	0.33	2.35
	Fiscal - Moquegua	110.1	22	2	24	18	0	100%	0.64	2.28
	Moquegua - Camiara	74.2	17	6	23	18	2	89%	0.27	2.01
	Camiara - Tacna	90.7	20	3	23	18	0	100%	0.57	2.37

4.3 Análisis teórico de los datos y resultados obtenidos en relación con las bases teóricas de la investigación.

En la figura 4.1 se presenta la curva de regresión ajustada del coeficiente PMD mínimo encontrado en los tramos de repetición, según la longitud de dicho tramo. En dicho gráfico se puede apreciar que el valor mínimo del coeficiente PMD se incrementa conforme aumenta la longitud del tramo de repetición de la fibra óptica.

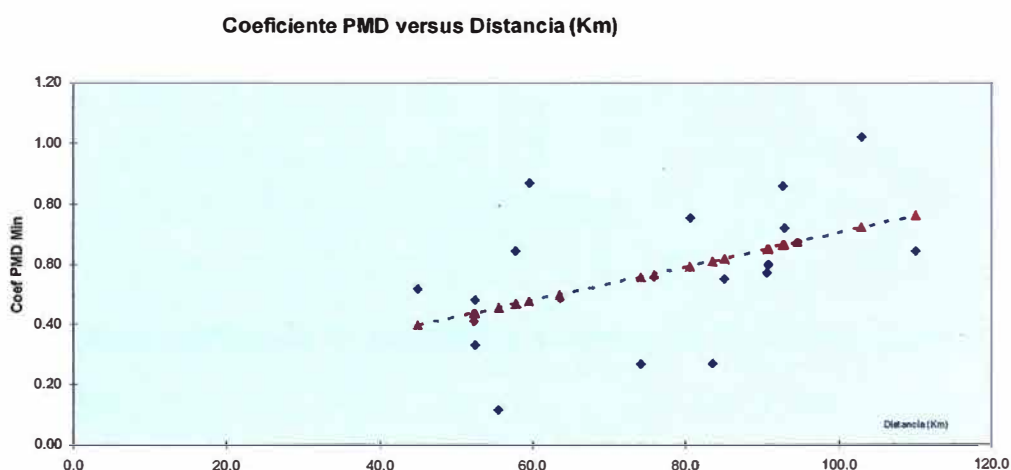


Figura 4.1: variación del Coeficiente PMD mínimo con la distancia del tramo

Asimismo en la figura 4.2 se muestra la curva de regresión ajustada entre el coeficiente PMD mínimo respecto de la cantidad de cortes que ha sufrido dicho tramo de repetición. En ella se puede apreciar que existe una tendencia a que el coeficiente PMD mínimo del tramo de repetición disminuya con la cantidad de cortes.

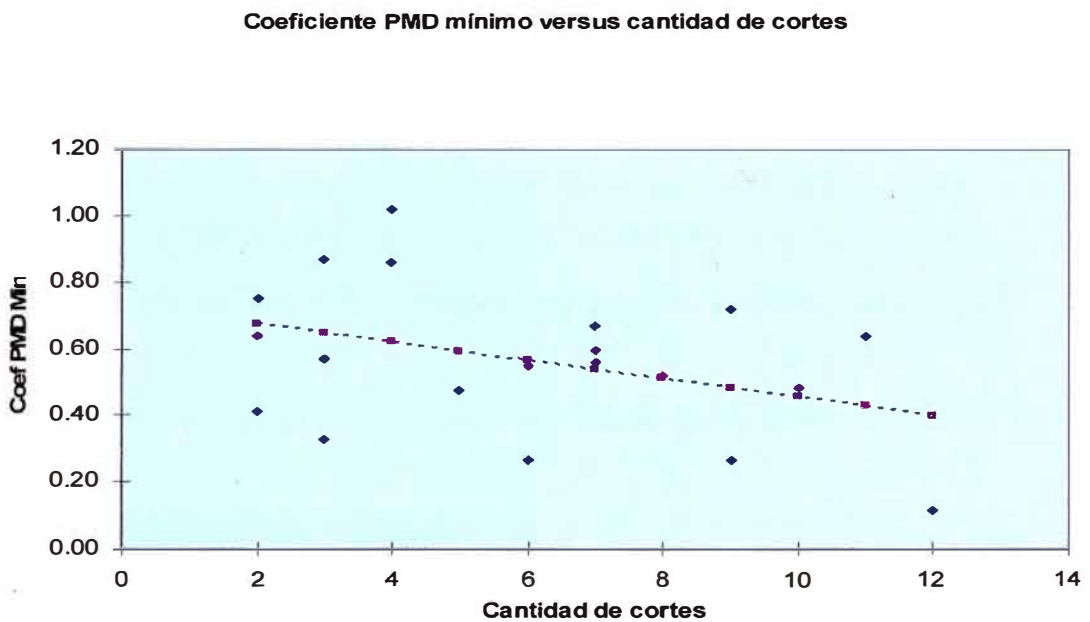


Figura 4.2: Variación del Coeficiente PMD mínimo con los cortes de la fibra

4.4 Análisis de la asociación de variables y resumen de las apreciaciones relevantes que produce.

En la tabla 4.2 se muestra los resultados de la regresión entre el coeficiente PMD mínimo con la distancia. Podemos ver que el coeficiente de determinación R^2 es del 24 %, lo cual significa que la distancia del tramo de repetición no explica suficientemente al coeficiente PMD mínimo.

Tabla 4.2 Resultados de la regresión respecto a la distancia del tramo de repetición

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.491128909
Coefficiente de determinación R ²	0.241207606
R ² ajustado	0.199052473
Error típico	0.198639835
Observaciones	20

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.225773635	0.225773635	5.721903557	0.027877827
Residuos	18	0.710240115	0.039457784		
Total	19	0.93601375			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	0.142460102	0.182851804	0.779101433	0.446042768	-0.241697282
Distancia (Km)	0.005604723	0.002343063	2.392050074	0.027877827	0.000682131

En la tabla 4.3 se muestra la regresión respecto de los cortes de la fibra óptica. En ella se observa que el coeficiente de determinación R² es del 14.6 %, lo cual significa que el coeficiente PMD mínimo del cable se explica muy poco con respecto a la cantidad de cortes

Tabla 4.3: Resultados respecto de la regresión respecto de los cortes de la fibra óptica

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.382731134
Coefficiente de determinación R ²	0.146483121
R ² ajustado	0.099065516
Error típico	0.210673989
Observaciones	20

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de	Promedio de los	F	Valor crítico de F
Regresión	1	0.137110215	0.137110215	3.089213858	0.095806674
Residuos	18	0.798903535	0.04438353		
Total	19	0.93601375			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	0.729653226	0.103968924	7.017993459	1.50097E-06	0.511222623
Cantidad de cortes	-0.027150538	0.015447366	-1.757615958	0.095806674	-0.05960425

Por lo que si el coeficiente PMD mínimo no es explicado suficientemente por el proceso de instalación como por el proceso de la operación y mantenimiento, entonces para el caso de estos tramos de cable instalados en el año 1995, este debe estar explicado mayormente por el proceso de fabricación. Ello concuerda con la falta de especificación de la característica PMD en las recomendaciones ITU-T de la época.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro del proceso de investigación detallado en el presente informe de suficiencia se concluye y recomienda lo siguiente:

1. Los cables de fibra óptica tienen limitaciones para cursar velocidades desde 10 Gbps a más debido al fenómeno de la dispersión por modo de polarización PMD.
2. La PMD está relacionado a factores dentro del proceso de fabricación, dentro del proceso de instalación y dentro del proceso de operación y mantenimiento.
3. Para el caso específico de la fibra óptica nacional de la ruta sur, la PMD está explicada por el proceso de fabricación, ya que al momento de su instalación en el año 1995, no existían recomendaciones respecto de este fenómeno.
4. Las limitaciones de la PMD a altas velocidades se pueden resolver tomando acciones tanto en el equipo de transmisión como en el propio cable de fibra óptica.
5. Las soluciones por el lado de los equipos de transmisión pasan por acortar las distancias de regeneración. Para lo cual es necesario insertar equipos regeneradores en tramos intermedios. También pueden instalarse equipos de transmisión con características de modulación óptica QPSK.
6. Las soluciones por el lado de la fibra óptica se pueden realizar identificando aquellas fibras ópticas que contribuyen menos a la dispersión de modo de polarización. Una buena práctica consiste en reservar circuitos ópticos con las fibras con menor coeficiente PMD.
7. Es necesario adoptar como parte del proceso de mantenimiento preventivo de los cables de fibra óptica, la medición de la PMD de manera regular, mínimo 6 meses,

en cada uno de los tramos. Inclusive es necesario adoptar el uso de equipos que puedan analizar la PMD de cada sección de cable entre empalmes.

8. La PMD se ha convertido en el factor preponderante para determinar el ciclo de vida útil de un cable de fibra óptica. Por lo que conviene la renovación de la infraestructura para poder soportar la explosión de la demanda por nuevos servicios y mayores velocidades.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Walter Cciora, James Farmer, David Large, Michael Adams, “Modern Cable Television, Technology”, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco-USA, 2004.
- 2 Miguel Alva, Eduardo Belleza, Jorge Isa, “Transmisión por Fibras Ópticas”, INIC-TEL, Lima-Perú, 1989.
- 3 Carlos Antúnez de Mayolo, “Telecomunicaciones por Fibras Ópticas”, CONCY-TEC, Lima-Perú, 1996.
- 4 TELEFONICA, Telefónica del Perú S.A.A. “Esquemas de la Fibra Óptica Nacional”, Lima-Perú, 2008.
- 5 3M, “Optical FTTH Solutions”, 3M Innovation, Lima-Perú, 2008.
- 6 Textos Científicos, “Propiedades de La fibra óptica”, 2010, <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades>.
- 7 Juan Bedmar, “Telecomunicación a Través de Fibras Ópticas”, AHCIET, Madrid-España, 1986.
- 8 Área Europa, “Redes Convergentes”, 2010, <http://www.area-europa.net/index.html>.
- 9 Leading Optical Innovations, “Manufacturing Multimode Fiber”, <http://www.ofsoptics.com/resources/fibermfgpaper.pdf>, 2010
- 9 Oscar Santa Cruz, “Módulo Introductorio Principios Generales del Sistema por Fibra Óptica”, 2008, Universidad Tecnológica Nacional, Córdova-Argentina, http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/plantel_exterior.htm.
- 10 Freddy Ortiz, “Conceptos sobre la fibra óptica y las telecomunicaciones”, 2008, <http://orbita.starmeda.com/fortiz/Tema07.htm>.
- 11 TELEFONICA, Telefónica de España, “Mantenimiento de Redes de Fibra Óptica”, Madrid-España, 1995.
- 12 ITU-T G.652 “Características de los medios de transmisión, cables de fibra óptica, Características de un cable de fibra óptica monomodo”, 2005.

- 13 Laboratorio de Informática, “Redes Ópticas DWDM”, Universidad Complutense de Madrid, Madrid-España, 2010, <http://www.fdi.ucm.es/profesor/jseptien../WEB/Docencia/AVRED/Documentos/Tema5.pdf>
- 14 Laboratorio Docente de Computación, “Redes”, Universidad Simon Bolivar, Caracas-Venezuela, 2008, <http://www ldc.usb.ve/~figueira/cursos/redes2../EXPOSICIONES/DWDM/material/dwdm8.htm>.
- 15 ITU-T G.650 “Características de los medios de transmisión, cables de fibra óptica, Definiciones y métodos de prueba de los atributos conexos de las características estadísticas y no lineales de fibras y cables”, 2005
- 16 Ariel Leiva, Marco Tarifeño, Ricardo Olivares “Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas”, Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería, Santiago-Chile, 2007, <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>
- 17 Corning, “Una introducción a los fundamentos de PMD en fibras”, New York.USA, 2006.
- 18 Grupo Comunicaciones ópticas de la Universidad de Valladolid, “Tutorial de Comunicaciones Ópticas”, España-Valladolid, 2006, http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_1.htm
- 19 Francisco Ramos, “Regeneradores Ópticos 3R”, CONECTRONICA, Esaña-Valencia, 2009, <http://www.conectronica.com/redes-opticas/regeneradores-opticos-3r-y-iii>.
- 20 Kim Roberts, Maurice O’Sullivan, Kuang Tsan, Han Sun, “Performance of Dual Polarization QPSK for Optical Transport Systems”, Journal of Lightwave Technology, Vol 27, N° 16, 2009.
- 21 Ministerio de Transportes y Comunicaciones, “Contratos de Concesión con Telefónica del Perú S.A.A.”, Lima-Perú, 1994.
- 22 Roberto Hernández, Carlos Fernández, Pilar Baptista, “Metodología de la Investigación”, 4ta Edic., Mac Graw Hill, 2006, México D.F.-México.
- 23 ITU-T G.652 “Características de los medios de transmisión, cables de fibra óptica, Características de un cable de fibra óptica monomodo”, 1993
- 24 TELEFONICA, Telefónica del Perú S.A.A. “Red de Fibra Óptica Nacional”, Lima-Perú, 2009.
- 25 TELEFONICA, Telefónica del Perú S.A.A. “Red de transporte”, Lima-Perú, 2009.