

TRANSMISIÓN DE DATOS POR FIBRA ÓPTICA

Contenido

- 1.- Los retos de la transmisión por fibra.
- 2.- Dispersión de pulsos.
- 3.- Atenuación en la fibra.
- 4.- Empalmes y conectores.
- 5.- Fundamentos de diseño del enlace óptico.
- 6.- Mediciones de potencia óptica.

Objetivo

Calcular la máxima tasa de transmisión de datos posible para un sistema de fibra óptica e identificar los factores que causan la atenuación de la luz al viajar a través de la fibra. Preparar un cálculo de pérdida para un sistema de fibra óptica.

Última modificación:
23 de abril de 2011



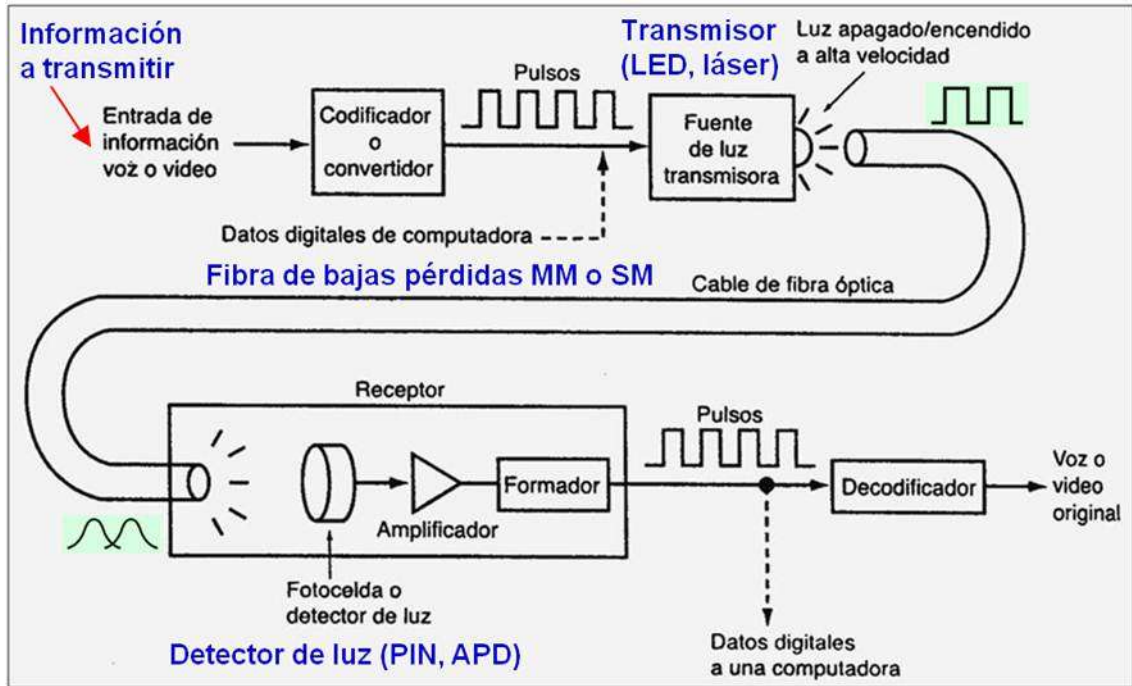
Tema 2 de:
COMUNICACIONES ÓPTICAS
Edison Coimbra G.

1.- Los retos de la transmisión por fibra

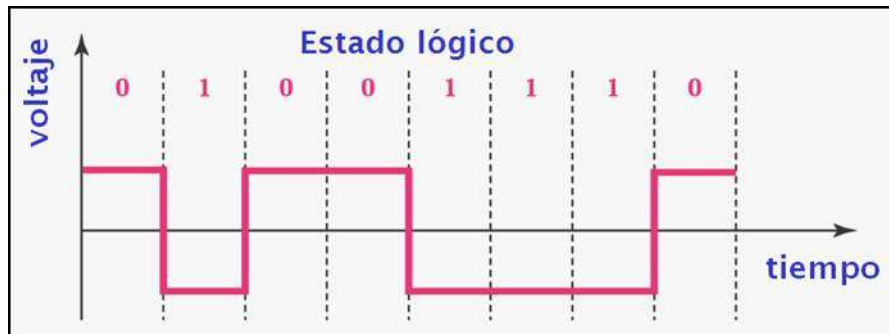
Sistema de transmisión básico

La señal a **transmitir** puede ser voz, video o datos de PC. El primer paso es convertirla en una forma compatible con el medio de transmisión, por lo regular se la convierte en una serie de **pulsos digitales**.

El código de línea de los **pulsos digitales** podría ser del tipo **NRZ**.



Ejemplo de señal digital NRZ



Los pulsos digitales sirven después para disparar (**modular**) con rapidez una fuente de luz potente alternando entre apagado y encendido.

En sistemas de corta distancia, se usa un **LED**, que emite un haz de luz infrarrojo de baja intensidad. En larga distancia se usa el **láser** que se conmuta a una velocidad mucho más alta y emite una luz coherente y de mayor potencia.

En el receptor, se usa un **PIN** o **APD** para detectar los pulsos de luz y convertirlos a en una **señal eléctrica**.

Los pulsos digitales modulan al LED o láser.

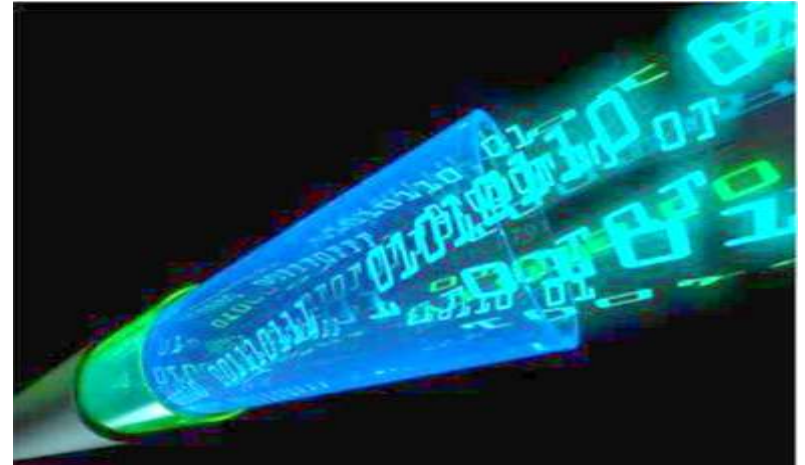
Los tres retos de la transmisión por fibra

Desafíos

La **transmisión de luz** por fibra presenta 3 grandes desafíos.

1 Dispersión

Los pulsos de luz se **dispersan** a medida que viajan por la fibra. Se produce por la propagación **multimodal** y por el **ancho espectral** de las fuentes de luz.



2 Atenuación

La potencia de luz se **atenúa** a medida que viaja por la fibra. Se produce por **imperfecciones** propias del material de la fibra. Es un factor intrínseco.

3 No linealidades

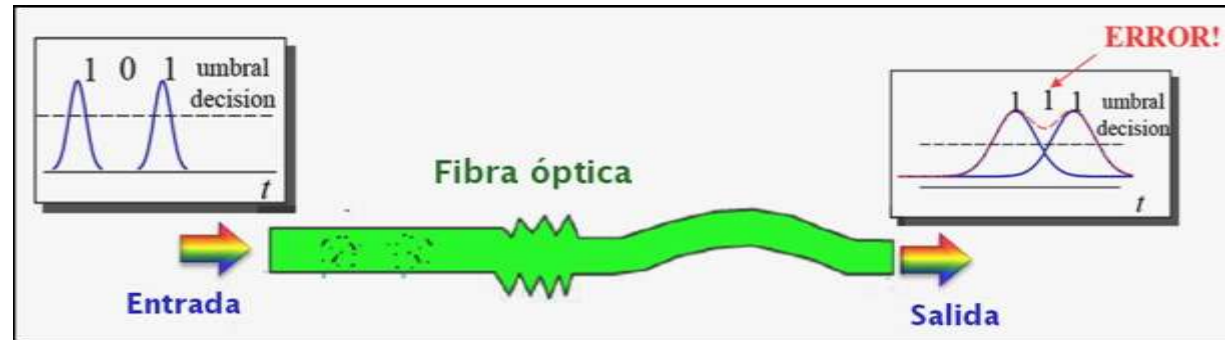
Se producen cambios de la **longitud de onda** e interacciones entre longitudes de onda. Este se tratará en el tema relacionado con tecnologías **DWDM**.

Los pulsos de luz se distorsionan y atenúa al viajar por la fibra.

2.- Dispersión de pulsos

¿Porqué ocurre la dispersión?

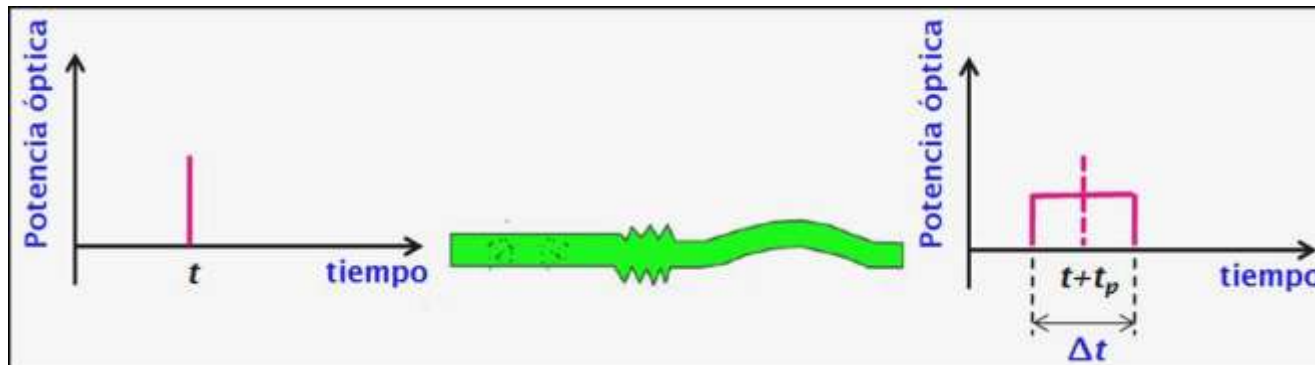
Ocurre porque el pulso de luz viaja a **diferentes velocidades** a través de la fibra, dependiendo del modo de propagación y del ancho espectral de la fuente



La dispersión se manifiesta como un **ensanchamiento** del pulso en el tiempo, que se hace mayor con la longitud. Este ensanchamiento **limita** la tasa de datos: a altas tasas, los pulsos de luz se **solapan** unos con otros y se hacen indistinguibles para el receptor.

Definición de la dispersión

La **dispersión** se define como la **duración del pulso de salida** (Δt) cuando se aplica a la entrada un pulso de luz infinitesimalmente corto.



*De una manera simple, la dispersión mide el ensanchamiento del pulso por unidad de distancia: en **ps/km**.*

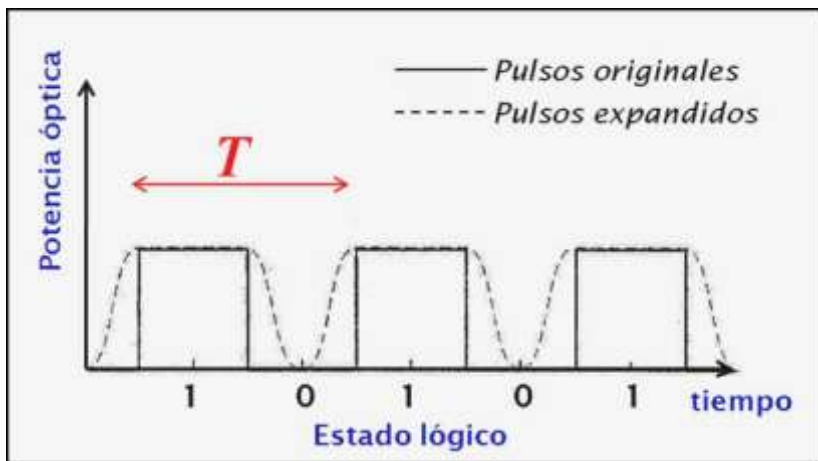
La dispersión limita la tasa de datos.

Efectos de la dispersión de pulsos

¿Cuáles son los efectos de la dispersión?

Los efectos aumentan con la longitud de la fibra. Si la dispersión es grande, el pulso se integra en el siguiente periodo de bit y se produce interferencia entre símbolos; entonces se alcanza el **límite de la capacidad de la fibra** para aplicaciones digitales.

A mayor **tasa de transmisión**, menor será el periodo T de pulsos y mayor será el efecto de la dispersión.



Ancho de banda eléctrico de la fibra

Puesto que sólo es necesario transmitir el componente fundamental de la onda cuadrada en una aplicación digital, se puede decir que el **ancho de banda eléctrico B** de la fibra para máxima velocidad de transmisión será:

$$B = f = 1/T$$

Para máxima velocidad

Para máxima velocidad, la **dispersión total Δt** es igual a la mitad del periodo T .

$$\Delta t = T/2$$

Por tanto, puede decirse que el **ancho de banda eléctrico B** es:

$$B = \frac{1}{2\Delta t}$$

Velocidad o tasa de transmisión

Nyquist define la **máxima capacidad de transmisión C** teórica para un canal. Si la señal es de 2 niveles se calcula así.

$$C = 2B$$

- C = capacidad de transmisión del canal, en bps.
- B = ancho de banda del canal, en Hz.

- B = ancho de banda, en Hz.
- Δt = dispersión total. En s.

Tipos de dispersión de pulsos

¿Cuáles son y qué los causa?

Dispersión modal

Causa: la **propagación multimodo** que ocurre en las fibras multimodo **MM**, debido a que los rayos de luz toman diferentes trayectorias por una fibra y llegan a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso.

Dispersión cromática

Causa: el **ancho espectral** de la fuente. Un fuente de luz emite luces de diferentes longitudes de onda (λ) que viajan por la fibra a diferentes velocidades y llegan a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso. Esta dispersión es significativa en fibras monomodo **SM**.

Dispersión guía - onda

Causa: el **ancho espectral** de la fuente, la **diferencia de densidad** en la frontera núcleo – revestimiento y el hecho que los rayos de mayor λ tienen mayor penetración en el cladding, por tanto, durante el tiempo que comparten entre el núcleo y el cladding viajan a mayor velocidad que los rayos de menor λ confinados en el núcleo y lleguen a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso. Esta dispersión es despreciable, excepto cerca del cero de la dispersión cromática en fibras SM.

Dispersión modo de polarización PMD

Causa: cualquier **imperfección en el núcleo** (asimetría o curvatura) hace que los 2 modos de polarización en la fibra viajen a diferentes velocidades y lleguen a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso. Esta dispersión es significativa solo para enlaces que tienen una velocidad superior a **10 Gbps** en fibras SM.

Dispersión modal en fibras MM.

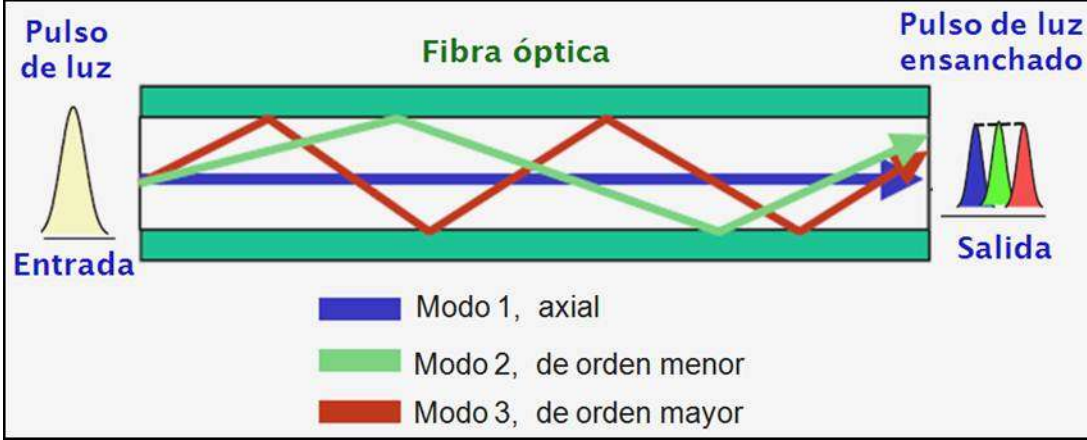
Dispersión cromática en fibras SM.

Dispersión modal

Ocurre en fibras multimodo MM

Causa: la **propagación multimodo** que ocurre en las fibras multimodo **MM**, debido a que los rayos de luz toman diferentes trayectorias por una fibra y llegan a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso.

Las fibras MM de índice escalonado tienen la dispersión más alta.

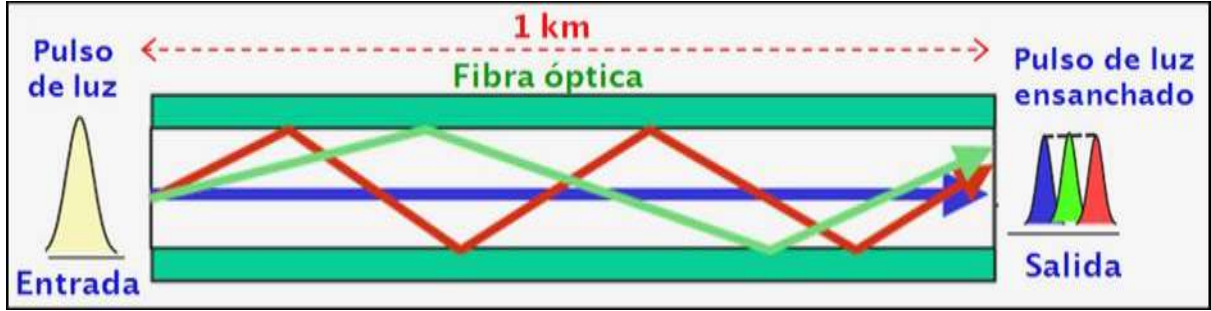


Ancho de banda óptico de la fibra MM

El **ancho de banda óptico** es el producto del ancho de banda eléctrico **B** y la longitud de la fibra. Esta es la forma de evaluar a las fibras multimodo.

$$B_{\text{óptico}} = B \times \text{longitud} \quad [\text{Hz.km}]$$

Se interpreta como el máximo ancho de banda **B** que **un km** de fibra óptica ofrece.



El pulso de luz se ensancha.

Dispersión modal - Ejercicios

Ejemplo de especificación

En este ejemplo, la fibra MM de 1300 nm ofrece **600 MHz** de ancho de banda para **1 km** de longitud, y 300 MHz para 2 km.



CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS		
50-125 μm		
Atenuación (dB/km)	850 nm (valor máximo)	2,4
	1300 nm (valor máximo)	0,6
Ancho de banda mínimo (MHz x km)	850 nm	≥ 400
	1300 nm	≥ 600
Apertura numérica	0,200 \pm 0,015	

Ejercicio 1

Velocidad de transmisión. Un enlace de fibra óptica tiene un ancho de banda de 800 MHz. Calcule la velocidad máxima a la que se puede transmitir en dicho enlace.

Respuesta.-
1,6 Gbps

Ejercicio 2

Distancia máxima. Una fibra óptica tiene un ancho de banda óptico de 500 MHz-km. Si se requiere un ancho de banda eléctrico de 85 MHz para un modo particular de transmisión, ¿cuál es la distancia máxima que puede utilizarse entre repetidores?.

Respuesta.-
5.88 km

Ejercicio 3

Ancho de banda óptico. Se instalan 15 km de fibra óptica y se encuentra experimentalmente que el ancho de banda de operación máximo es 700 MHz. Calcule el ancho de banda óptico para la fibra.

Respuesta.-
10.5 GHz-km

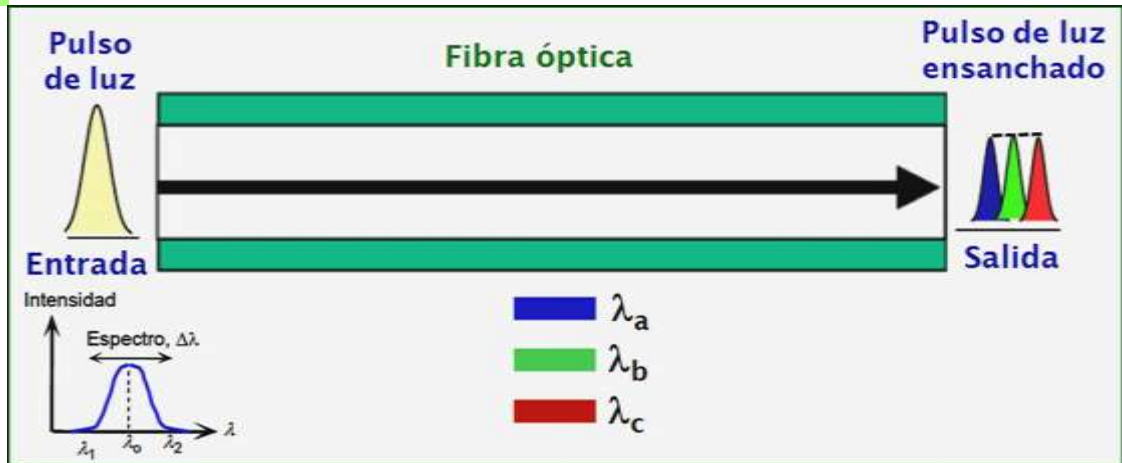
La capacidad de transmisión es $C = 2B$.

El ancho de banda óptico = $B \times$ longitud.

Dispersión cromática

Ocurre en fibras monomodo SM

Causa: el **ancho espectral** de la fuente. Un fuente de luz emite luces de diferentes longitudes de onda que viajan por la fibra a diferentes velocidades y llegan a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso.



¿Cómo se calcula la dispersión cromática?

La **dispersión D de la fibra** es proporcional al ancho espectral de la fuente.

La dispersión cromática es un dato que provee el fabricante de la fibra.

Por tanto, la **dispersión total Δt** en función de la longitud de la fibra es.

El ancho espectral es un dato que provee el fabricante de la fuente de luz.



$$D = D_c \Delta\lambda$$

D = dispersión de la fibra. En **ps/km**.
 D_c = dispersión cromática. En **ps/nm-km**.
 $\Delta\lambda$ = ancho espectral de la fuente. En **nm**.



$$\Delta t = Dl$$

Δt = dispersión total. En **ps**.
 D = dispersión de la fibra. En **ps/km**.
 l = longitud de la fibra. En **km**.

El espectro de un laser es 2 nm.

El espectro de un LED es 50 nm.

Dispersión cromática y ancho de banda

Ancho de banda óptico de la fibra SM

El **ancho de banda óptico** es el producto del ancho de banda eléctrico B y la longitud de la fibra óptica

$$B_{\text{óptico}} = B \times \text{longitud} \quad [\text{Hz.km}]$$

Pero si el ancho de banda eléctrico B se expresa en función de la dispersión total Δt .

$$B = \frac{1}{2\Delta t}$$

Y la dispersión total Δt en función de la longitud l de la fibra.

$$\Delta t = Dl$$

Se obtiene la siguiente expresión para el **ancho de banda óptico**.

$$Bl = \frac{1}{2D}$$

B = ancho de banda. En Hz.
 l = longitud de la fibra. En km.
 D = dispersión de la fibra. En ps/km.

¿Cómo se interpreta?

Se interpreta como el máximo ancho de banda B que **un km** de fibra óptica ofrece.



El ancho de banda óptico se expresa en Hz-km.

Dispersión cromática - Ejercicios

Ejercicio 1

Ancho de banda óptico. Para una aplicación digital se requiere transmitir a una velocidad de 622 Mbps (STM-4 de SDH) entre dos nodos separados 4 km. Calcule el ancho de banda óptico requerido para la fibra.

Respuesta.-
1244 MHz-km

Ejercicio 2

Dispersión total. Un enlace de fibra óptica de 50 km de longitud utiliza una fibra con una dispersión cromática de 9,49 ps/nm-km y una fuente que tiene un ancho espectral de 2 nm. Calcule la dispersión total de esta fibra.

Respuesta.-
949 ps

Ejercicio 3

Velocidad de transmisión. Una fibra óptica, cuyo máximo ancho de banda a 1550 nm es de 26.34 GHz-km, se instala entre 2 nodos separados 50 km. Calcule la velocidad de transmisión máxima que se puede obtener sobre dicho enlace.

Respuesta.-
1.05 Gbps

Ejercicio 4

Velocidad de transmisión. Si la misma fibra del ejemplo anterior se utiliza para un enlace de 25 km, calcule la velocidad de transmisión máxima que se puede obtener.

Respuesta.-
2.1 Gbps

La capacidad de transmisión es $C = 2B$.

El ancho de banda óptico = $B \times$ longitud.

Dispersión cromática - Ejercicios

Ejemplo de especificación

Puesto que la dispersión varía con λ , debe obtenerse la dispersión a la λ en uso, o bien, el fabricante debe proveer un medio para calcular esta dispersión, la cual también depende de su proximidad a la λ de dispersión cero.

Por ejemplo, un tipo particular de fibra SM (*Corning SMF-28*) tiene la siguiente especificación de dispersión.



$$D_c(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$$

$1301.5 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1321.5 \text{ nm}$
Pendiente de dispersión cero:
 $S_0 \leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

D_c = dispersión cromática en ps/(nm · km)

λ = longitud de onda en nanómetros

λ_0 = longitud de onda de dispersión cero en nanómetros

S_0 = pendiente de dispersión cero en ps/(nm² · km)

Ejercicio 5

Dispersión total. La fibra cuya ecuación de dispersión está dada en la ecuación de arriba, tiene dispersión cero a una longitud de onda de 1310 nm y tiene una pendiente de dispersión cero de 0.05 ps/(nm²·km). Calcule la dispersión total de 50 km de esta fibra cuando se usa con una fuente que tiene un ancho espectral de 2 nm a una longitud de onda de 1550 nm.

Respuesta.-

949 ps

Ejercicio 6

Dispersión de la fibra. Una longitud de fibra de 45 km no debe dispersar los pulsos por más de 100 ns. Calcule el valor máximo permisible para la constante de dispersión de la fibra (D).

Respuesta.-

2.22 ns/km

La capacidad de transmisión es $C = 2B$.

El ancho de banda óptico = $B \times$ longitud.

Dispersión guía - onda

Ocurre en fibras monomodo SM

Causa: el **ancho espectral** de la fuente, la **diferencia de densidad** en la frontera núcleo – revestimiento y el hecho que los rayos de λ tienen mayor penetración en el cladding, por tanto, durante el tiempo que comparten entre el núcleo y el cladding viajan a mayor velocidad que los rayos de menor λ confinados en el núcleo y lleguen a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso.

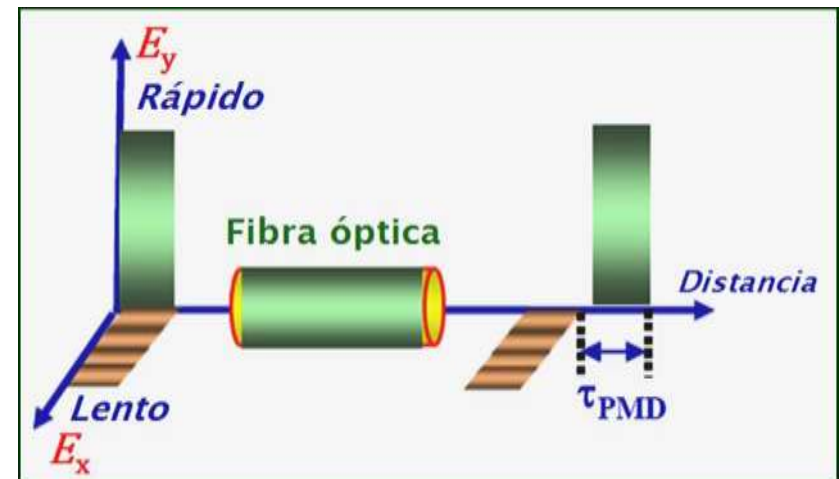
Esta dispersión es despreciable, excepto cerca del cero de la dispersión cromática en fibras SM.

Dispersión por modo de polarización PMD

Ocurre en fibras monomodo SM

Causa: cualquier **imperfección en el núcleo** (asimetría o curvatura) hace que los 2 modos de polarización en la fibra viajen a diferentes velocidades y lleguen a destino en **diferentes tiempos**, causando el ensanchamiento del pulso.

Esta dispersión es significativa solo para enlaces que tienen una velocidad superior a **10 Gbps** en fibras SM.

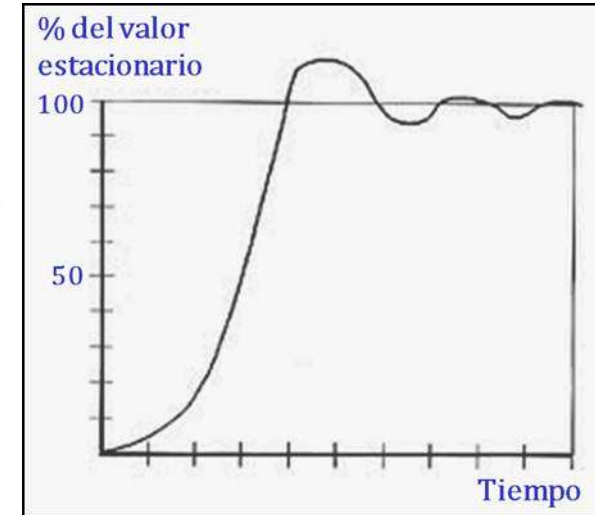


La dispersión limita la tasa de bit.

Tiempo de subida de transmisores y receptores

¿Qué es el tiempo de subida?

Es el tiempo que transcurre hasta que un pulso cuadrado toma su valor estacionario. Tanto **transmisores** como **receptores** tienen **tiempos de subida** finitos que limitan el ancho de banda, por lo que sus efectos deben incluirse al calcular la tasa de transmisión máxima.



¿Cómo se calcula el efecto total?

Cuando se aplica a la fibra un pulso cuadrado, los **tiempos de subida** del transmisor y del receptor se combinan con el efecto de **dispersión del pulso** causado por la fibra en sí.

$$T_{RT} = \sqrt{T_{Rtx}^2 + T_{Rrx}^2 + T_{Rf}^2}$$

El **tiempo de subida** total se hace igual a la **dispersión total** Δt .

- T_{RT} = tiempo de subida total, en s.
- T_{Rtx} = tiempo de subida del transmisor, en s.
- T_{Rrx} = tiempo de subida del receptor, en s.
- T_{Rf} = dispersión debido a la fibra, en s.

$$T_{RT} = \Delta t$$

El efecto acumulativo de estos tiempos de subida es limitar la rapidez a la que se transmiten los pulsos y esto a su vez limita la velocidad de datos.

El tiempo subida limita la tasa de datos.

Velocidad de transmisión - Ejercicios

Ejercicio 7

Tasa de datos. Una longitud de fibra de 45 km dispersa los pulsos hasta 100 ns. Calcule la tasa de datos máxima para este sistema, cuando se utiliza con un transmisor que tiene un tiempo de subida de 50 ns y un receptor que tiene un tiempo de subida de 75 ns. Los pulsos son cuadrados (NRZ).

Respuesta.-
7,4 Mbps

Ejercicio 8

Tiempo de subida. Se estima que una fibra tiene un ancho de banda óptico de 500 MHz-km. Calcule su dispersión en ns/km, y determine el tiempo de subida total de un pulso en una longitud de 5 km de esta fibra.

Respuesta.-
1 ns/km y 5 ns.

Ejercicio 9

Dispersión. Un sistema de fibra óptica utiliza un detector con un tiempo de subida de 3 ns y una fuente de luz con un tiempo de subida de 2 ns. Si se utiliza un código NRZ con una tasa de datos de 200 Mbps en una distancia de 25 km. Calcule:

- La dispersión total máxima permitida.
- La dispersión que produce la fibra en sí.
- La dispersión D máxima aceptable de la fibra.
- El ancho de banda óptico de la fibra.

Respuesta.-
a) 5 ns
b) 3.46 ns
c) 0.1386 ns/km
d) 3.61 GHz-km

La dispersión de la fibra se expresa en ns/km.

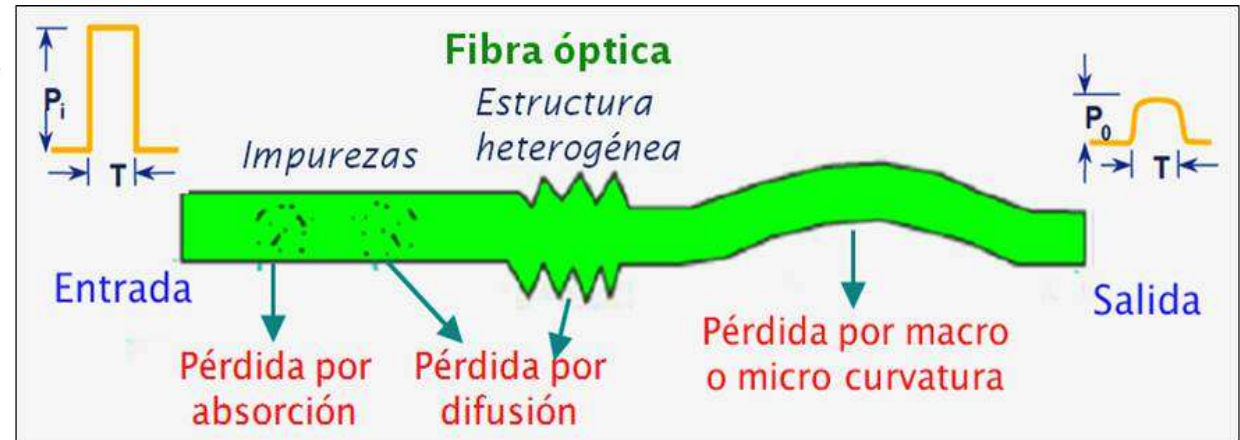
El ancho de banda óptico se expresa en Hz-km.

3.- Atenuación en la fibra

¿Qué es la atenuación?

La **atenuación** es la pérdida de energía que sufre el pulso de luz al viajar de un extremo al otro de la fibra. Es el factor fundamental que **limita** el rendimiento de los sistemas de comunicación por fibra.

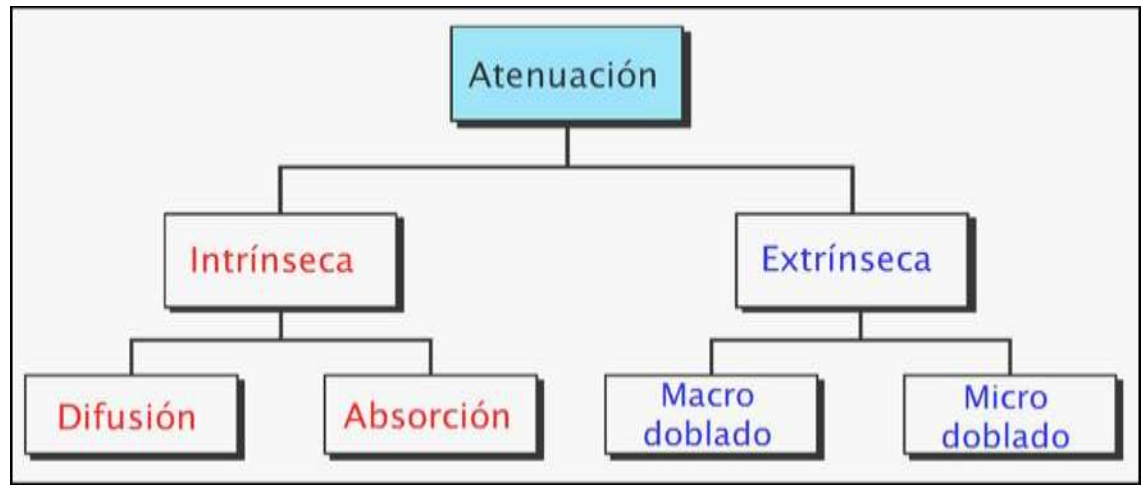
La **amplitud del pulso (brillo)** será mucho más baja en el otro extremo de la fibra.



¿Qué causa la atenuación?

La **atenuación**, al ser causada por varios factores, se la clasifica en 2 categorías: **intrínseca** y **extrínseca**.

La **pérdida** de potencia óptica en una fibra se mide en **dB** y **dB/km**. Una pérdida del 50% de la potencia de entrada equivale a 3 dB.



Atenuación intrínseca

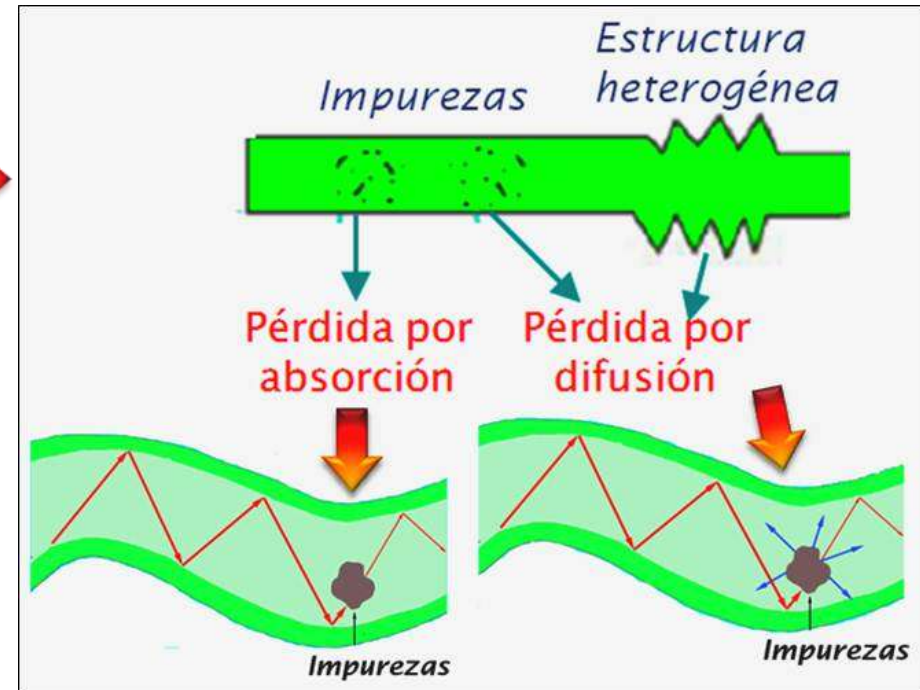
Es una pérdida inherente a la fibra

La causa de esta atenuación son las **impurezas** del vidrio o las **estructuras heterogéneas** que se forman durante el proceso de fabricación.

Pérdida por absorción

La **pérdida por absorción** se produce porque la luz es absorbida por el vidrio, gracias a las propiedades químicas o **impurezas** naturales en el vidrio, transformándose en calor.

La **absorción** representa entre el **3 y 5%** de la atenuación de una fibra.



Pérdida por difusión

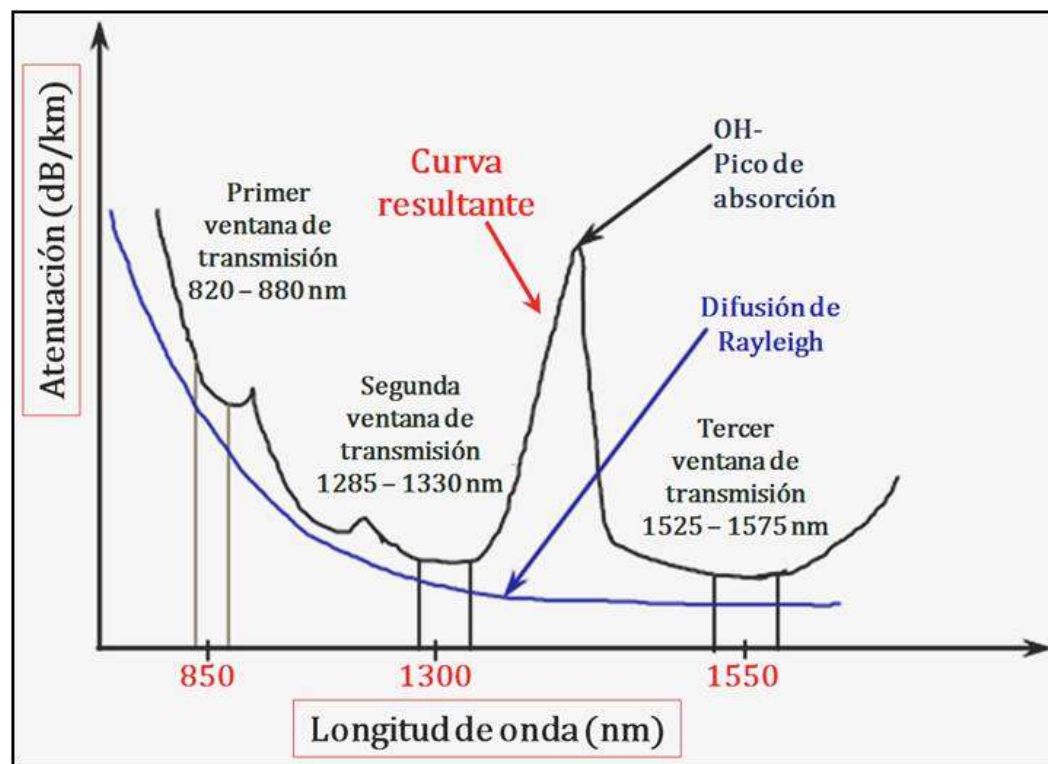
La **pérdida por difusión** se produce cuando el rayo de luz choca contra una **impureza** o una estructura heterogénea y se dispersa (difunde) en todas las direcciones.

Se la conoce como **Difusión de Rayleigh** y representa cerca del **96%** de la atenuación de una fibra.

Algo de esta luz difundida se **refleja** hacia la fuente de luz. Esta propiedad es usada por el instrumento **OTDR** para realizar pruebas en la fibra.

Atenuación intrínseca y curva de atenuación

Espectro de la curva de atenuación de una fibra de silicio



Valores típicos

	Fiber linear Attenuation
Multimode fiber 62,5/125 μ @ 850nm	\approx 2.8 to 3.5 dB/km
Multimode fiber 62.5/125 μ @ 1300nm	\approx 0.7 to 1 dB/km
Single mode fiber @ 1310nm	\approx 0.35dB/km
Single mode fiber @ 1550nm	\approx 0.25dB/km
Single mode fiber @ 1625nm	\approx 0.25dB/km

Características de la curva

- 1 La atenuación disminuye conforme se incrementa la longitud de onda (**Difusión de Rayleigh**).
- 2 La atenuación es alta en **picos de absorción** asociados con el ión hidroxilo OH- (pico de agua).
- 2 La atenuación se incrementa a longitudes de onda mayores que 1.600 nm, debido a las pérdidas inducidas por la absorción del silicio.

Curva resultante: Rayleigh + absorción.

Atenuación intrínseca - Ejercicios

Ejercicio 10

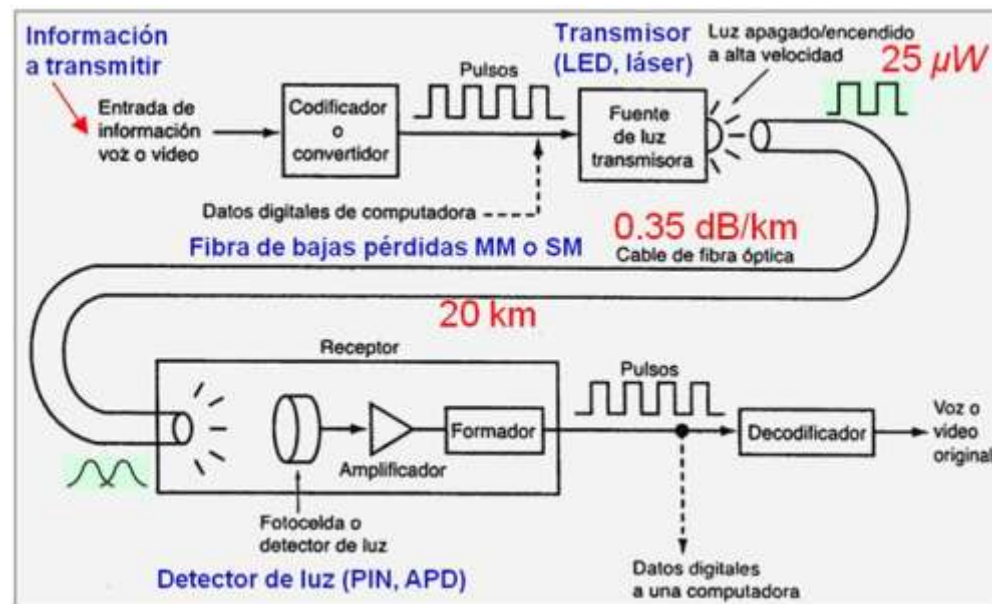
Atenuación total. Un enlace de fibra óptica de 50 km de longitud utiliza una fibra SM de 1550 nm y una atenuación de 0.3 dB/km. Calcule la atenuación total de este tramo de fibra.

Respuesta.-
15 dB

Ejercicio 11

Potencia de salida. Una fibra óptica tiene una pérdida de 0.35 dB/km. Si un LED con una salida de potencia de $25 \mu W$ se conecta a un extremo de una longitud de 20 km de esta fibra, ¿cuánta potencia llega al detector en el otro extremo?

Respuesta.- $5 \mu W$ ó -23 dBm



Ejercicio 12

Pérdida en la fibra. Una fuente con una potencia de nivel de -20 dBm se conecta a un extremo de una pieza de fibra. La longitud de la fibra es 1.200 m. El nivel de potencia en el otro extremo se mide como -22.5 dBm . ¿Cuál es la pérdida de la fibra en dB/km?

Respuesta.-
 2.08 dB/km .

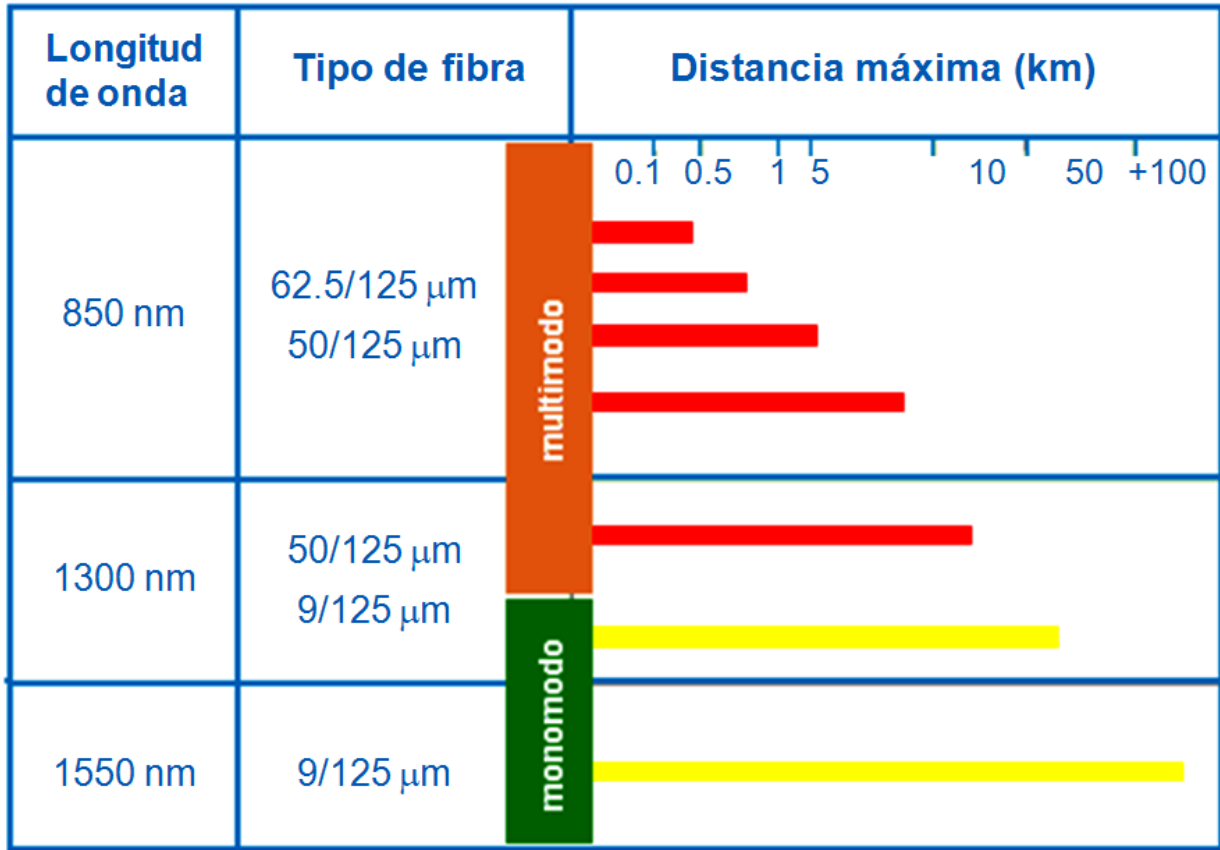
Las fibras de vidrio tienen menos atenuación que las de plástico

Las potencias suelen expresarse en dBm.

Atenuación intrínseca y distancias

Distancias máximas alcanzadas

Considerando sólo la **atenuación intrínseca** de las fibras, se determina el cuadro de **distancias máximas** para enlaces de fibra óptica, en función de la longitud de onda y el tipo de fibra utilizado.



Las fibras MM para corto alcance

Las fibras SM para largo alcance

Atenuación extrínseca

Es una pérdidas por curvatura de la fibra

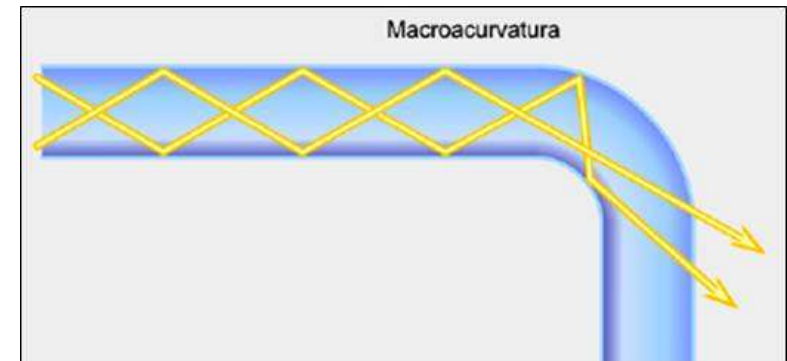
Una **curva** en la fibra puede afectar al **ángulo crítico** en esa área específica. Como resultado, parte de la luz que viaja por el núcleo se refracta, produciéndose la pérdida de potencia.



Macrocurvatura

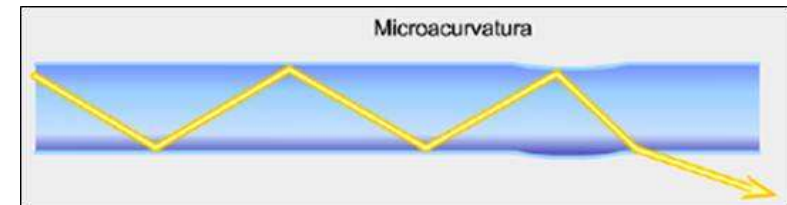
Ocurre cuando se **curvan** demasiado los cables. Para prevenir esta pérdida, se especifica un **radio de curvatura** mínimo.

Radio mínimo de curvatura (mm)	
Durante la instalación	20 x diámetro externo del cable
Después de instalado	10 x diámetro externo del cable



Microcurvatura

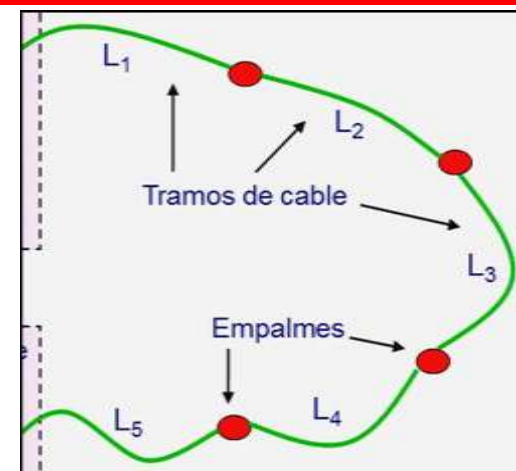
Ocurre por las **microcurvaturas** o pequeñas fisuras en el núcleo producidas por los cambios de **temperatura** o el estiramiento durante el **jalado** del cable.



4.- Empalmes y conectores

¿Porqué se realizan empalmes?

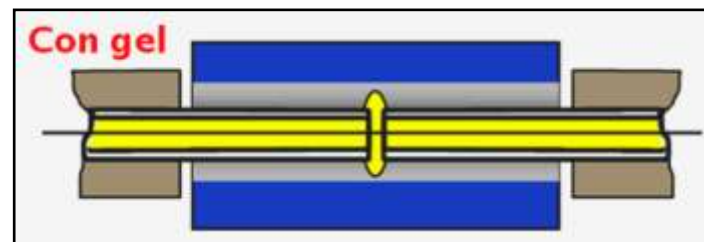
Por razones prácticas, los cables de fibra óptica se despachan en carretes de madera con una longitud que, por lo general, no supera los **4.000 m**, mientras que la distancia entre dos centrales puede ser de 30 ó 40 Km. Por este motivo se realizan en el campo **empalmes de línea** entre los tramos.



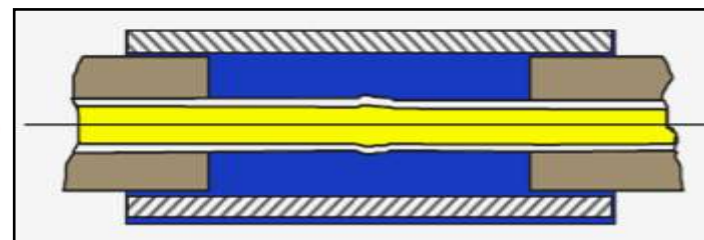
¿Qué es el empalme de fibra?

El **empalme de fibra** (*splice*) es una técnica utilizada para unir permanentemente dos fibras ópticas en una conexión de bajas pérdidas. Existen dos técnicas.

1 Empalme mecánico. Utiliza un conector pequeño, en forma de cilindro, de 6 cm de largo y 1 cm de diámetro, que alinea dos fibras desnudas y las asegura mecánicamente. Las pérdidas en este empalme son de **0.1 a 0.8 dB**.



2 Empalme por fusión. Utiliza una máquina **empalmadora de fusión**, que alinea con precisión las 2 fibras y genera un pequeño arco eléctrico para soldarlas. Las pérdidas en este empalme son **menores que 0.1 dB**.



El empalme es una conexión permanente de 2 fibras.

Empalmes de línea

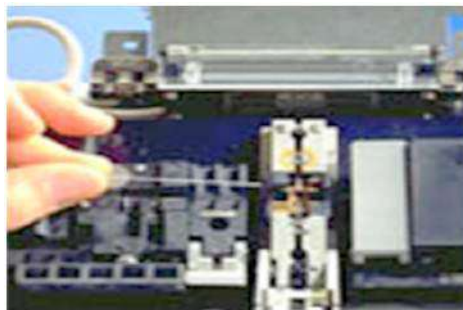
¿Cómo se realizan los empalmes por fusión?

Son empalmes permanentes que se realizan con **máquinas empalmadoras** automáticas.

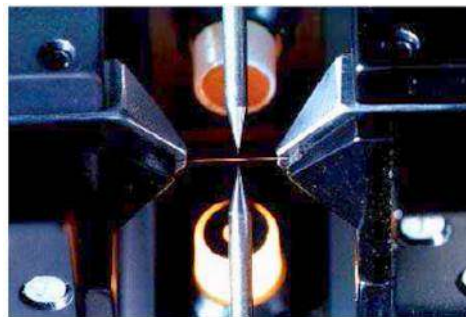


Proceso de empalme

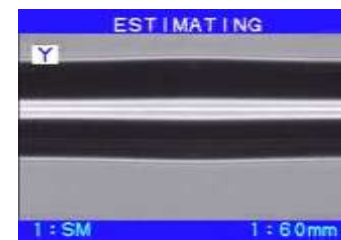
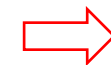
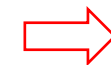
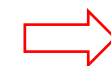
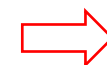
- 1 Se cargan las fibras sin coating y cortadas a 90°



- 2 Se alinean los núcleos
- 3 Se fusionan con un arco producido por dos electrodos



- 4 Se verifica la atenuación. En este caso: 0.01 dB.



Con empalmadora de fusión se realizan empalmes con pérdidas menores que 0.01 dB.

Pérdidas en los empalmes de línea

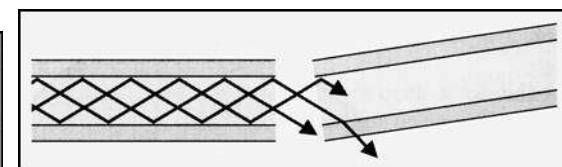
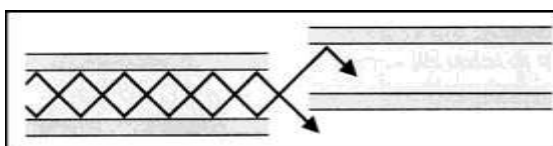
¿Qué importancia tienen las pérdidas en empalmes?

En un sistema óptico, las **pérdidas en empalmes** pueden ser mayores que en el cable mismo. Las buenas conexiones son más críticas con la fibra monomodo SM, debido a su diámetro pequeño, a su apertura numérica pequeña y a su baja pérdida.

¿Qué causa la pérdida en los empalmes?

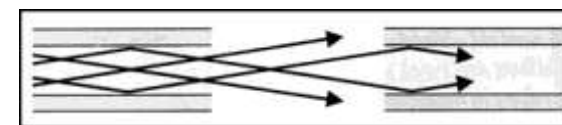
1

Desalineación axial o angular que dan lugar a la dispersión de la luz.



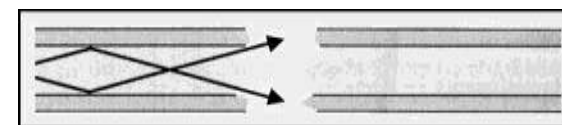
2

Espacios vacíos entre las fibras que dan lugar a la dispersión de luz.



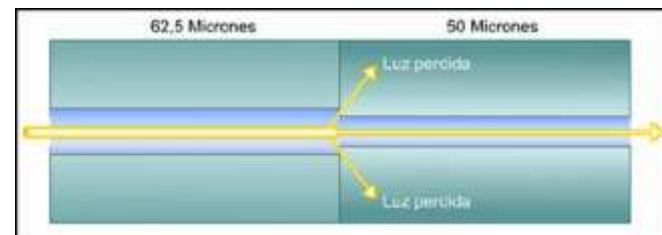
3

Superficies rugosas o ásperas en los extremos de las fibras que permiten que escape la luz en varios ángulos.



4

Para acoplar la fibra a fuentes y detectores se utilizan pigtails o longitudes cortas de fibra, que pueden tener un **diámetro** más pequeño o menor **apertura numérica**, causando que se pierda parte de la luz.



Las pérdidas en los empalmes se consideran cuando se diseña el enlace óptico.

Protección de empalmes de línea

¿Cómo se protegen los empalmes de línea?

Para proteger del entorno a los empalmes, se utilizan **cajas de empalme** que pueden ser montadas en interiores o exteriores.

Las de tipo **exterior** deben ser a prueba de intemperie y con un sellado impermeable. Se montan en postes, en cámaras subterráneas o son directamente enterradas, según se haya instalado el cable de fibra óptica.

¿Cómo se acomodan los empalmes?

Los empalmes son delicados, por lo que su primera protección se hará con **manguitos termocontraíbles** (*sleeves*), los cuales poseen un nervio metálico.



Los manguitos con los empalmes se colocan luego en un **cassette** dentro de la **caja de empalme**.

Los cables de fibra óptica se instalan, por lo general, en canalizaciones subterráneas.

Conectores y empalmes de terminación

¿Para qué se utilizan conectores?

Los **conectores** se utilizan para terminar una fibra óptica y conectarla al equipo óptico (puertos transmisor y receptor).

Técnicas de terminación de la fibra

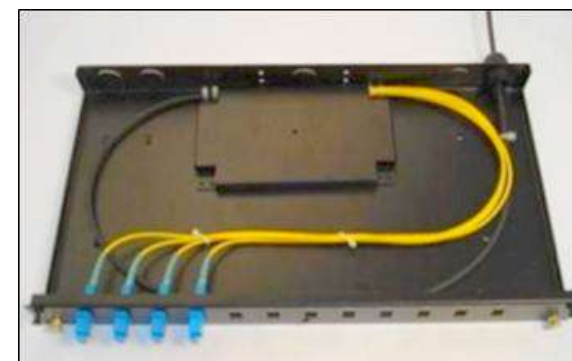
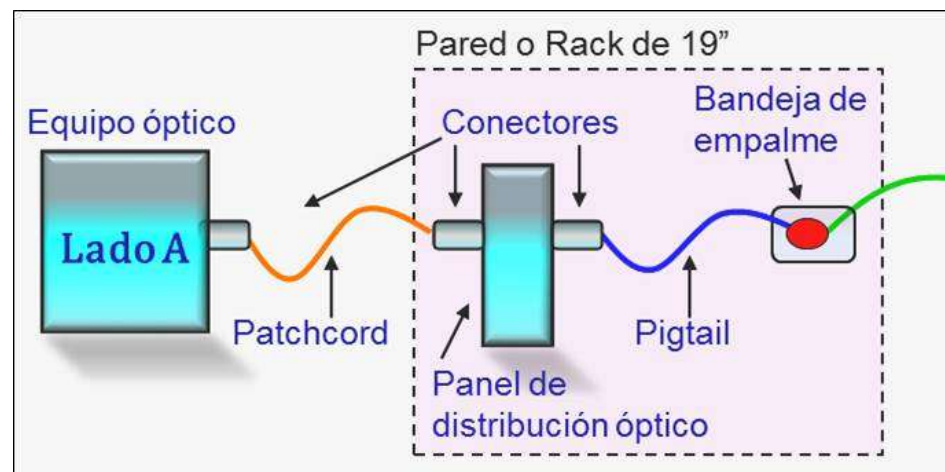
Existen dos **técnicas** muy comunes en la industria.

1 La del **conector instalable en sitio**, que es el proceso de terminar directamente una fibra con un conector.

2 La del **pigtail**, que es una longitud corta de fibra que se utiliza para terminar una fibra óptica. Uno de los extremos del pigtail es **conectorizado** en fábrica y el otro extremo se empalma con la fibra óptica. El empalme se aloja en una **bandeja de empalme**.

Bandeja de empalme

La bandeja de empalme se usa para proteger y mantener los **empalmes de terminación**. Normalmente dan cabida hasta 12 empalmes.

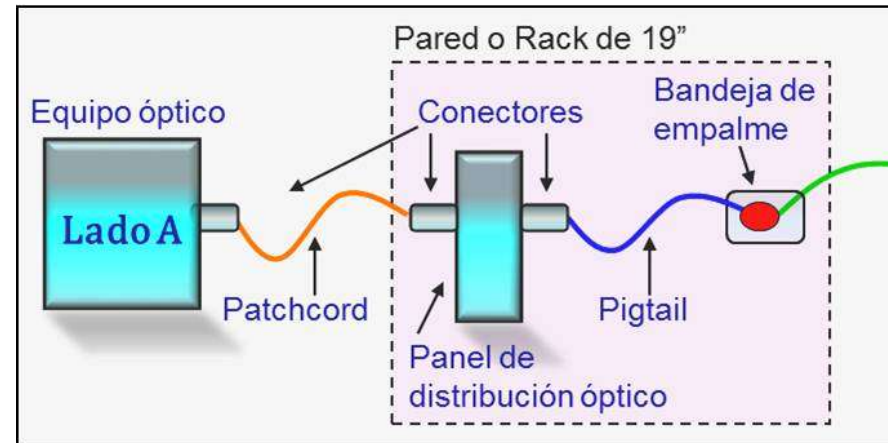


Conectores y panel de distribución óptico

¿Qué es un panel de distribución?

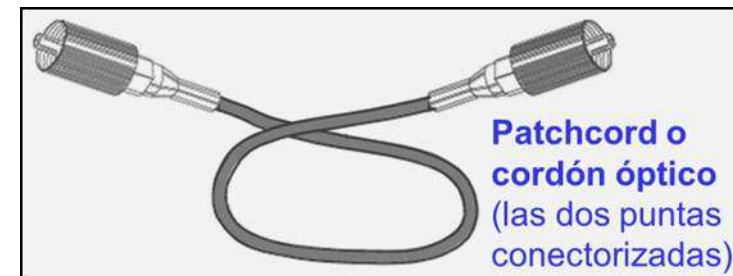
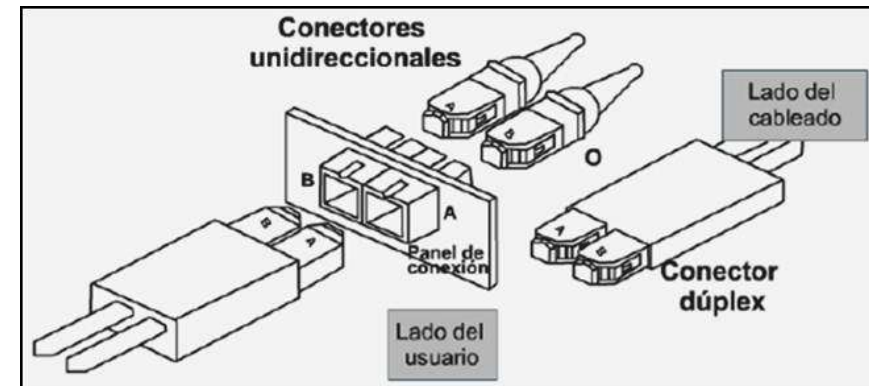
Es un **gabinete** donde termina el cable de fibra óptica y permite que sea conectado al **equipo óptico** mediante **patchcords** (cordones de conexión)

El **panel** (*patch panel*) suministra un **punto de acceso** al equipo óptico y a la planta de cable de fibra. Permite realizar rápidos cambios en la conexión de dispositivos, como por ejemplo switches o routers con distintos tendidos de fibra.



¿Dónde se monta el panel?

Los **paneles** se encuentran disponibles en versión montaje en pared o en **rack**, como muestra el ejemplo.

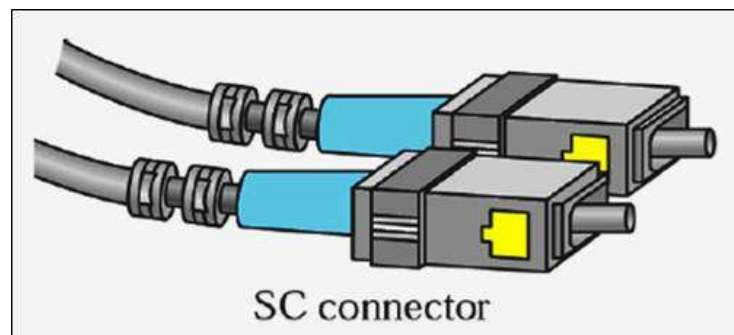
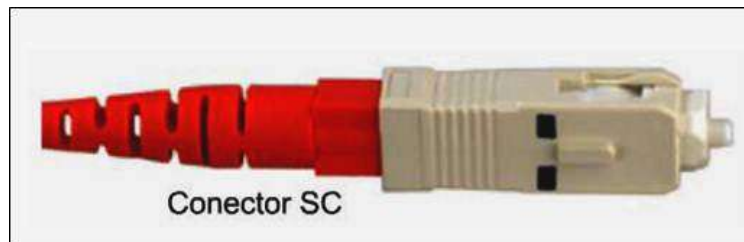


El panel aumenta la flexibilidad de la red óptica.

Tipos de conectores

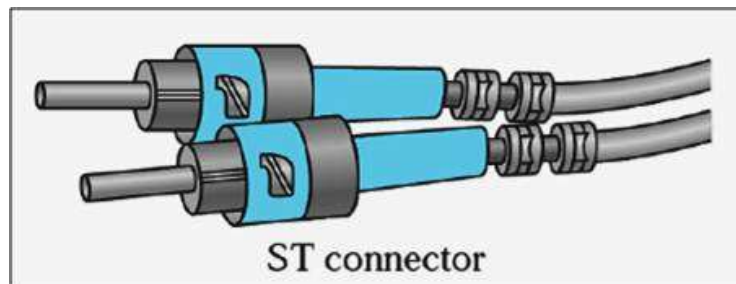
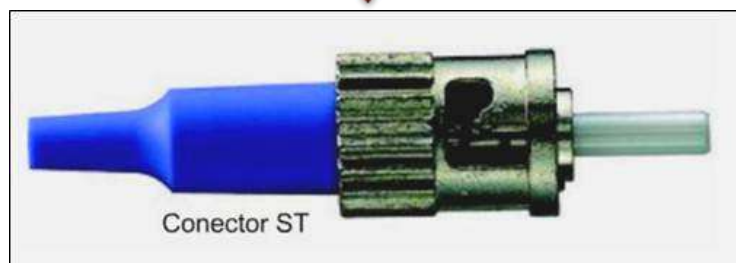
Para fibras multimodo

En fibras **multimodo** se usa con mayor frecuencia el Conector Suscriptor **SC**.



Para fibras monomodo

En fibras **monomodo** se usa el conector de Punta Recta **ST**.



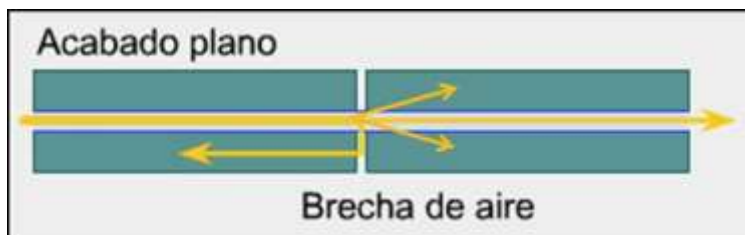
Comentario sobre empalmes y conectores.

Los términos **empalme** y **conector** están relacionados pero no son equivalentes. Generalmente, un empalme es una conexión permanente, en tanto que los **conectores son removibles**. Los conectores son necesarios entre fuentes y detectores y el cable de fibra.

Pérdidas en los conectores

¿Porqué se producen pérdidas en los conectores?

En un **empalme**, las pérdidas son menores que **0.01 dB**. En un **conector** son de **0.2 dB**. La razón es que en un empalme los extremos de las fibras se tocan. En un **conector**, se deja una **brecha de aire** para que las superficies pulidas de la fibra no se dañen durante el proceso de conectar o desconectar, aunque existen conectores que permiten el contacto físico (PC) de los núcleos.



La **brecha** da lugar a la **dispersión** de luz. El salto en el índice de refracción en la interfaz vidrio-aire-vidrio causa que la luz se **refleje** de vuelta a la fuente.

Tipos de pérdidas en el conector

1 **Pérdida por inserción.** Atenuación que agrega a un enlace la presencia de un conector. Es del orden de **0.2 dB**.

2 **Pérdida de retorno** (o de acoplamiento). Es la pérdida causada por la luz reflejada. Se mide como la diferencia entre el nivel de luz reflejada y la luz incidente. Es un valor negativo y **menor que -30 dB**.

La **pérdida** se mide en **ambos sentidos**, tomándose el promedio.

Ejemplo de especificación para conectores con contacto físico (PC).

Descripción	Valor
Pérdida por inserción	< 0.2 dB típico < 0.3 dB max.
Pérdida de retorno <i>PC</i>	< -30 dB
Pérdida de retorno <i>Súper PC</i>	< -40 dB
Pérdida de retorno <i>Ultra PC</i>	< -50 dB

5.- Fundamentos de diseño del enlace óptico

¿En qué consiste el diseño del enlace óptico?

El **diseño** del **enlace óptico** puede llegar a ser un proceso complicado. El proyectista debe considerar muchos factores, como la velocidad de transmisión, la atenuación del cable, los tipos de cable, tipos de fibra, equipos ópticos disponibles, tipos de interfaz eléctricos, conectores ópticos, empalmes, protocolos y otros.

No obstante, el proceso puede simplificarse si se siguen las **recomendaciones** del fabricante del equipo óptico. Estas recomendaciones, normalmente, suministran la suficiente información como para seleccionar la **fibra óptica** adecuada para el enlace.

Primera decisión a tomar

La **primera decisión** a tomar es si se debe utilizar un sistema de fibra **multimodo** o **monomodo**; decisión que dependerá, principalmente, de la longitud del enlace y de las especificaciones del equipo óptico.

1 Las fibras **multimodo** están destinadas a aplicaciones de distancias cortas, **no mayores que 2 km**.

2 Las fibras **monomodo** generalmente se utilizan para distancias largas, **mayores que 2 km**.



Fundamentos de diseño

Sistemas básicos de fibra óptica

Para muchos sistemas, el fabricante de equipos ópticos proporciona información suficiente para implementar un **enlace básico punto a punto** utilizando su equipamiento.

Factores a considerar en el diseño de un enlace básico

1

El máximo ancho de banda del enlace. Que determina la máxima tasa de datos del enlace con un mínimo de distorsión de la señal. Decrece al aumentar la longitud de la fibra.

Los cálculos para este factor pueden evitarse porque el fabricante ya ha **ensayado** su equipamiento usando fibras ópticas disponibles comercialmente, y puede proporcionar los **valores obtenidos**.

2

Las pérdidas totales del enlace. Debidas a las pérdidas en la fibra, empalmes, conectores, curvaturas en los cables, etc. La pérdida debida a los conectores instalados en los equipos ópticos se ignora, puesto que ya han sido tenidas en cuenta e incluidas en los cálculos por el fabricante.

Las **pérdidas totales del enlace** deben estar de acuerdo con las **especificaciones** del fabricante del equipo óptico con el fin de asegurar un funcionamiento adecuado. Esto se determina mediante una cuidadosa planificación del enlace óptico.



La información del fabricante simplifica los cálculos.

Fases del proceso de diseño

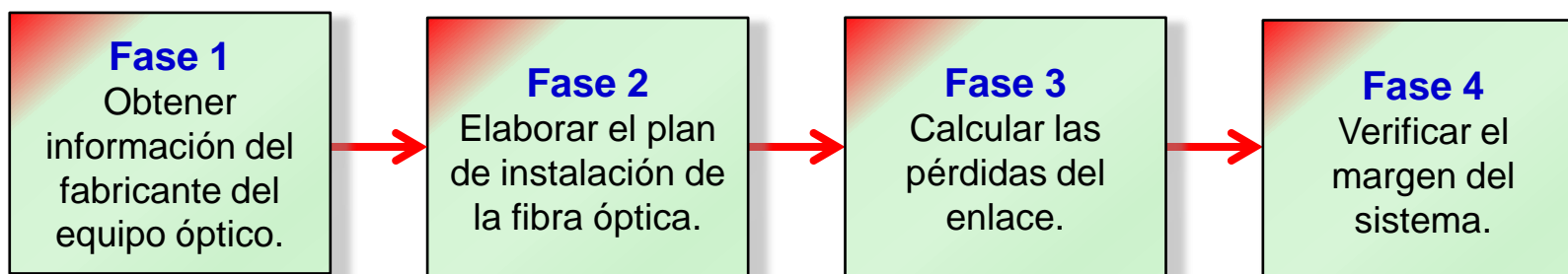
¿Cuáles son las recomendaciones del fabricante?

El fabricante del equipo óptico **recomienda** habitualmente un **tipo de fibra óptica** que puede ser utilizada satisfactoriamente. Este tipo de fibra ya ha sido ensayada con su equipamiento en configuraciones estándar punto a punto, obteniendo datos de **distancias** y **pérdidas máximas**.

El equipamiento funcionará satisfactoriamente si el **tipo de fibra** recomendado cumple las restricciones de **longitud** y **atenuación de la fibra**. Estas restricciones las da el fabricante en forma de tablas.

Para evaluar el enlace se realiza el **cálculo de pérdidas**, cuyo resultado proporciona la **atenuación total** del enlace. Esta se compara con la **atenuación máxima del equipo** para determinar si el diseño está dentro de la especificación de la atenuación.

Fases del proceso de diseño



El proceso se simplifica si se siguen las recomendaciones del fabricante.

Fase 1 del diseño del enlace óptico

¿Qué información se obtiene del fabricante del equipo óptico?

Fase 1
Obtener información del fabricante del equipo óptico.

Recomendaciones del fabricante	
Diámetro de la fibra óptica	8/125, 50/125 ó 62,5/125
Atenuación máxima de la fibra en dB/km	Ej.: 0.3 dB/km
Apertura numérica de la fibra	Ej.: 0.25
Ancho de banda máximo de la fibra en GHz-km a la longitud de onda de trabajo recomendada.	Ej.: 3.6 GHz-km a 1550 nm
Longitud máxima de la fibra	Ej.: 50 km
Atenuación máxima especificada para el equipo	Ej.: 20 dB
Sensibilidad del receptor del equipo al BER adecuado	Ej.: -28 dBm a S/N 68 dB
Potencia media de salida del equipo transmisor	Ej.: 4 mW (6 dBm)
Rango dinámico del equipo receptor	Ej.: -20 dBm a -28 dBm

Rango dinámico del receptor

Si el fabricante facilita las **pérdidas máximas** y el receptor tiene un **rango dinámico** completo (potencia luminosa mínima y máxima para su operación), las especificaciones para la sensibilidad del receptor y la potencia media de salida del transmisor ya no son necesarias.

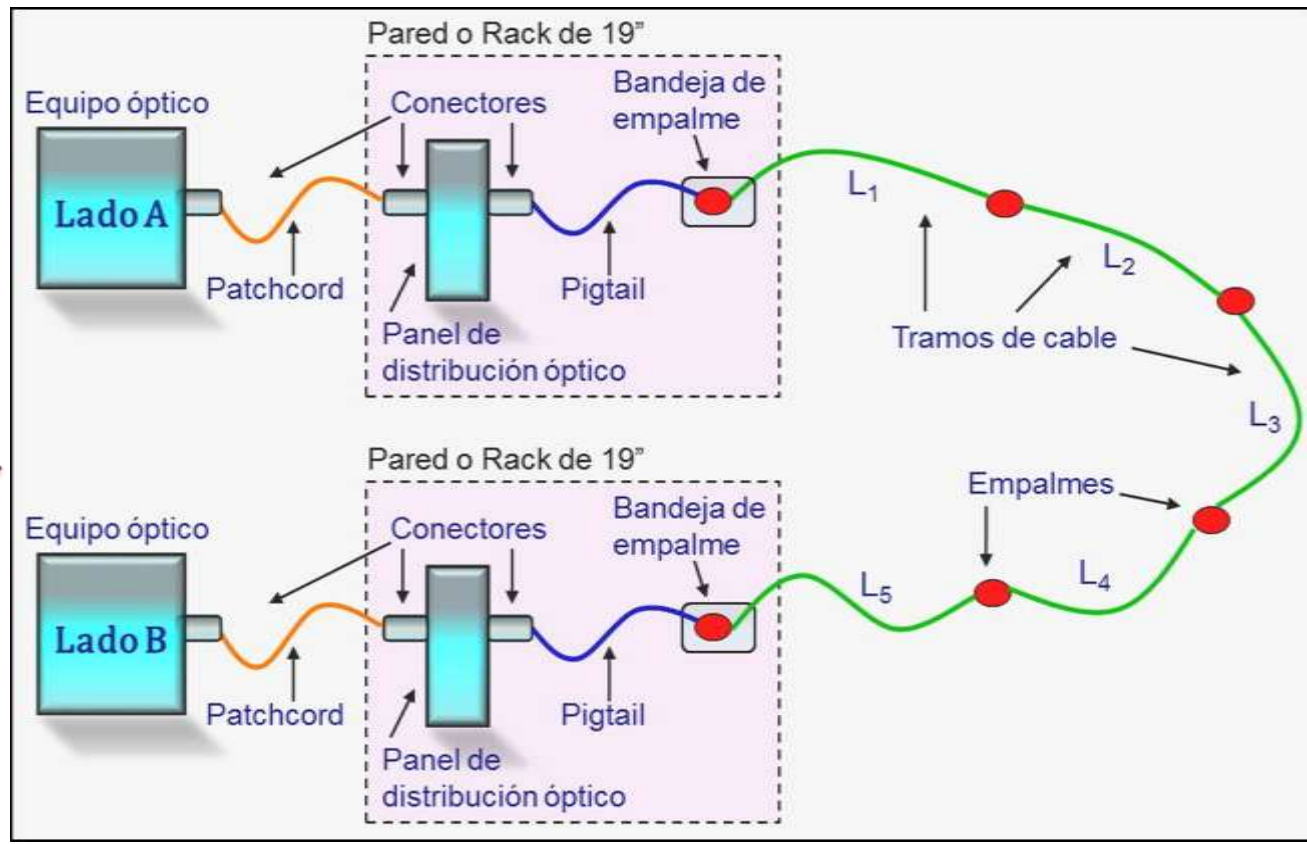
$\text{Pérdidas máximas} = \text{Potencia media transmisor} - \text{Sensibilidad receptor.}$

Fase 2 del diseño del enlace óptico

¿Qué es el plan de instalación?

Fase 2
Elaborar el plan de instalación de la fibra óptica.

Es un esquema que muestra la **longitud** del recorrido de la fibra, la cantidad de **empalmes**, los **conectores** y los equipos necesarios para la terminación de la fibra en los extremos del enlace.



Del plan de instalación se determinan

Del plan de instalación	
Longitud total de fibra óptica y atenuación	Ej.: 40 km × 0.3 dB/km
Número de empalmes y pérdidas de cada uno	Ej.: 15 × 0.01 dB/empalme
Número de conectores y pérdidas de cada uno	Ej.: 2 × 0.2 dB/conector
Margen del sistema	Ej.: 10 dB
Pérdidas debido a otros componentes del sistema	Ej.: acoplador de 3 dB

Fase 3 del diseño del enlace óptico

¿Qué es el cálculo de pérdidas?

Fase 3

Calcular las pérdidas del enlace.

Es el **cálculo** de todas las pérdidas que contribuyen a la **atenuación total** del enlace óptico, con el fin de compararla con la **atenuación máxima del equipo** para determinar si el diseño está dentro de la especificación de la atenuación.

Datos para el cálculo de pérdidas

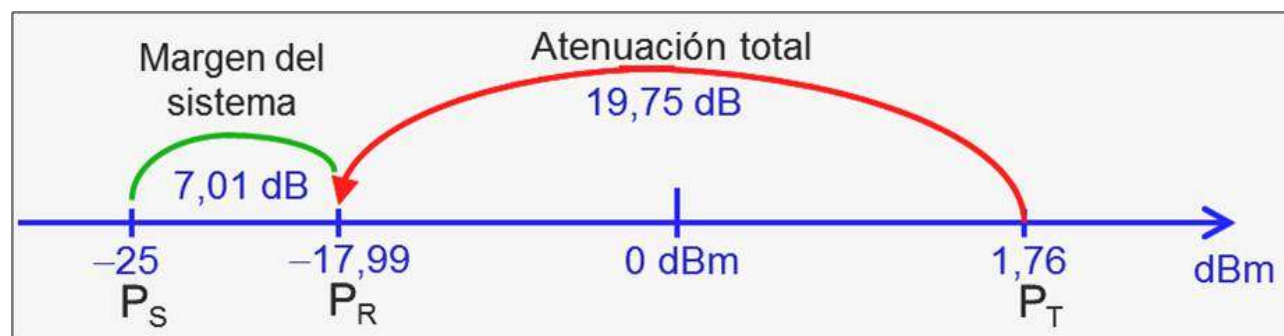
Para el cálculo de pérdidas	
Atenuación de la fibra a la longitud de onda de trabajo	Ej.: $40 \text{ km} \times 0.3 \text{ dB/km}$
Pérdidas en empalmes	Ej.: $15 \times 0.25 \text{ dB/empalme}$
Pérdidas en conectores	Ej.: $2 \times 0.5 \text{ dB/conector}$
Pérdidas debido a otros componentes	Ej.: 3 dB
<hr/>	
Atenuación total del enlace:	Ej.: 19.75 dB
Potencia media de salida del transmisor	Ej.: 1,76 dBm
Potencia de entrada al receptor	Ej.: -17.99 dBm
Rango dinámico del receptor	Ej.: -10 dBm a -25 dBm
Sensibilidad del receptor con el BER deseado	Ej.: -25 dBm
Margen del sistema	Ej.: 10 dB

Fase 4 del diseño del enlace óptico

¿Cómo se calcula el margen del sistema?

Fase 4
Verificar el
margen del
sistema.

La forma más simple es empezar con la potencia de transmisión (P_T) en dBm, restarle la **atenuación total** en dB, y comparar el resultado (P_R) con la potencia requerida en el receptor o sensibilidad del receptor (P_S). Cualquier potencia de más se llama **margen del sistema**.



Valor típico del margen del sistema

Por lo general, se requiere un margen de **5 a 10 dB** para tomar en cuenta el deterioro de los componentes con el tiempo y la posibilidad de que serán necesarios más empalmes (si, por ejemplo, se corta el cable de manera accidental).

Si el **margen del sistema** no es el adecuado, se deben reexaminar los valores de las pérdidas para reducir la atenuación total del enlace.

La sensibilidad es el mínimo nivel de potencia que requiere un receptor para funcionar.

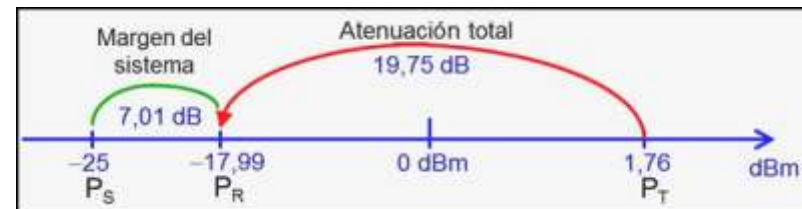
Enlace óptico - Ejercicios

Potencia del transmisor – Potencia en el receptor = atenuación total.

Ejercicio 13

Margen del sistema. Un enlace de fibra óptica abarca 40 km. El emisor de diodo láser tiene una potencia de salida de 1,5 mW, y el receptor requiere una intensidad de señal de -25 dBm para una relación S/N satisfactoria. La fibra está disponible en longitudes de 2,5 km y puede empalmarse con una pérdida de 0,25 dB por empalme. La fibra tiene una pérdida de 0,3 dB/km. El total de las pérdidas por conectores en los dos extremos es 4 dB. Calcule el margen del sistema disponible.

Respuesta.- 7,01 dB



Valores adecuados para margen del sistema: 5 a 10 dB.

Ejercicio 14

Nivel de potencia en el receptor. Un enlace de comunicaciones tiene una longitud de 50 km. La salida de potencia del transmisor es 3 mW, y las pérdidas son como sigue:

- Pérdida de conector (total): 4 dB.
- Pérdida de empalme: 0.1 dB por empalme. Los empalmes están separados 2 km.
- Pérdida de la fibra: 0.4 dB/km.

Calcule el nivel de potencia en el receptor, en dBm.

Respuesta.-
 $-21,63$ dBm

Número de empalmes = (Longitud de la fibra / longitud de la bobina) – 1.

Enlace óptico - Ejercicios

Potencia del transmisor – Potencia en el receptor = atenuación total.

Ejercicio 15

Margen del sistema. Un diodo láser emite una potencia de 1 mW. Éste se utiliza en un sistema de fibra óptica con un receptor que requiere una potencia de, por lo menos, $10 \mu\text{W}$ para la tasa de bits erróneos deseado. Determine si el sistema funcionará en una distancia de 10 km. Suponga que será necesario tener un empalme cada 2 km. Las pérdidas en el sistema son como sigue:

- Pérdidas de acoplamiento y conector, transmisor a fibra: 4 dB.
- Pérdida de la fibra: 0.5 dB/km.
- Pérdida de empalme: 0.2 dB por empalme.
- Pérdida de conector entre la fibra y el receptor: 2 dB.

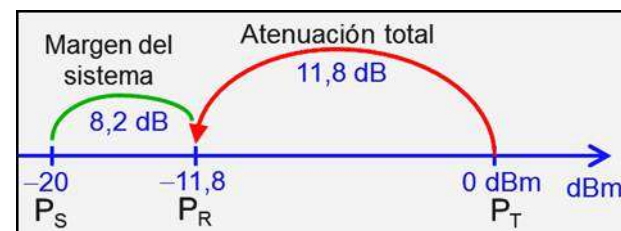
Valores adecuados para margen del sistema: 5 a 10 dB.

Ejercicio 16

Atenuación de la fibra. Un enlace de fibra óptica abarca 50 km. El emisor láser, de 1550 nm, tiene una potencia de salida de 2 mW, y el receptor requiere una intensidad de señal de -31.5 dBm , como mínimo (sensibilidad). La fibra está disponible en longitudes de 2 km y puede empalmarse con una pérdida de 0,2 dB por empalme. Los conectores tienen pérdidas de 2.1 dB por conector. Calcule la atenuación de la fibra que se debe utilizar para que el sistema tenga un margen de diseño de 8 dB.

Respuesta.-

Sí. Existe un margen disponible de 8,2 dB.



Respuesta.-

0.35 dB/km.

Número de empalmes = (Longitud de la fibra / longitud de la bobina) – 1.

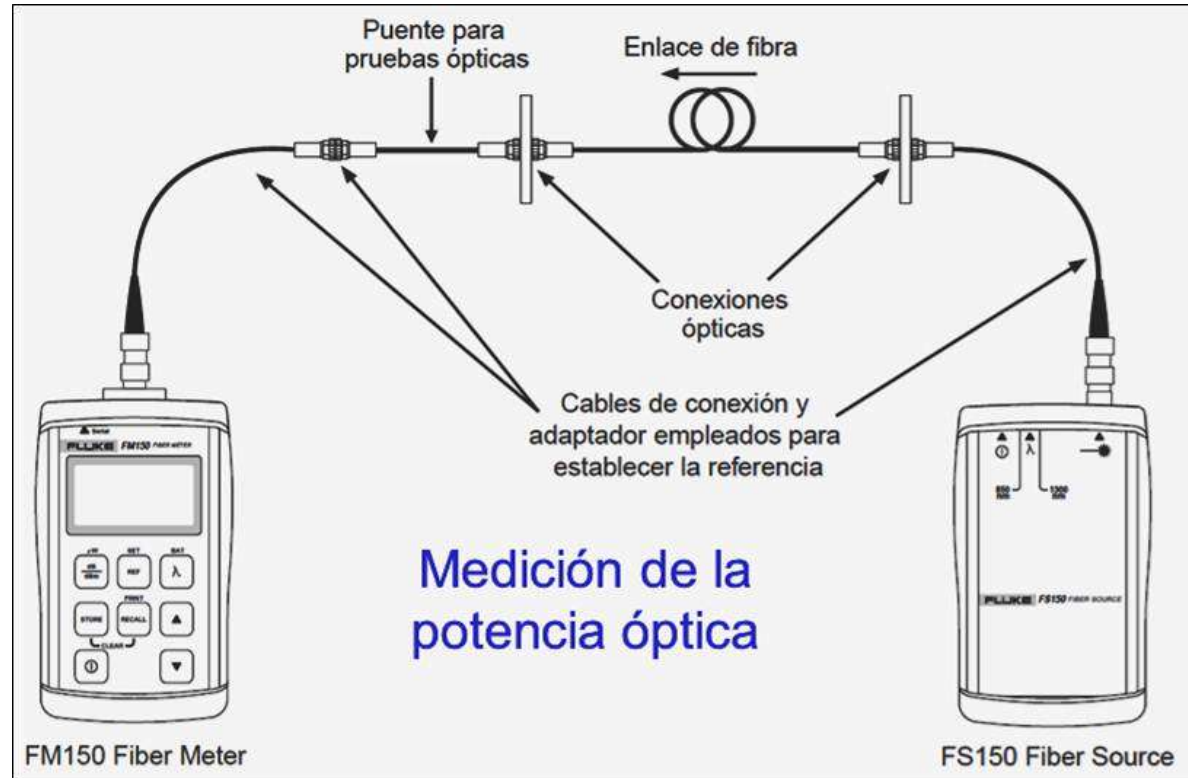
6.- Mediciones de potencia óptica

¿De qué equipos se dispone?

Es de suma importancia **probar** el enlace de fibra óptica. Dos de los equipos de prueba más importante que se utilizan son: el **medidor de potencia óptica** y el **OTDR**.

Medidor de potencia óptica

La **medición** de potencia óptica sirve para determinar con precisión la **atenuación del enlace**.



Para ello se utiliza una **fuentes de luz** y un **medidor de potencia**, que se conectan en ambos extremos de la fibra óptica a medir.

La diferencia en dB es la atenuación total del enlace.

Mediciones con el OTDR

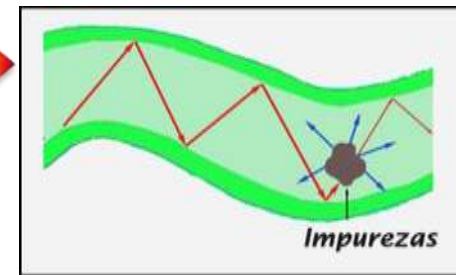
¿Qué es el OTDR?

Para obtener la **representación visual** de la atenuación del enlace de fibra óptica a lo largo de toda su longitud, se utiliza un **OTDR** (*Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo*).



Principio de funcionamiento del OTDR

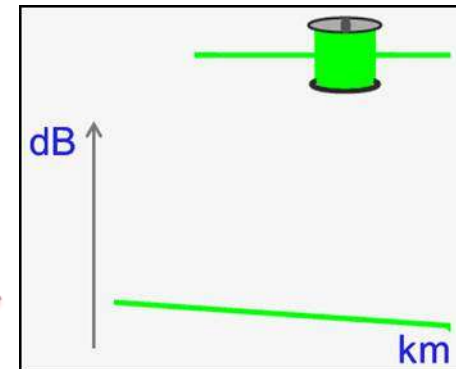
El **OTDR** basa su funcionamiento en la **difusión Rayleigh** ocasionada por las impurezas en la fibra, y por la cual una pequeña fracción de la luz se refleja hacia la fuente (**retrodifusión**).



Si el **OTDR** envía un **impulso** de luz, éste se refleja en forma continua a lo largo de la fibra y es atenuada por ésta. Además, si se mide el tiempo requerido para que los impulsos reflejados retornen, se puede calcular la distancia a la que se encuentra el “evento” que motivó la reflexión.



Gráfica en el OTDR. La **pendiente negativa** de la recta expresa la *atenuación por unidad de longitud* (dB/km) de esa fibra a la longitud de onda del láser.



Mediciones con el OTDR

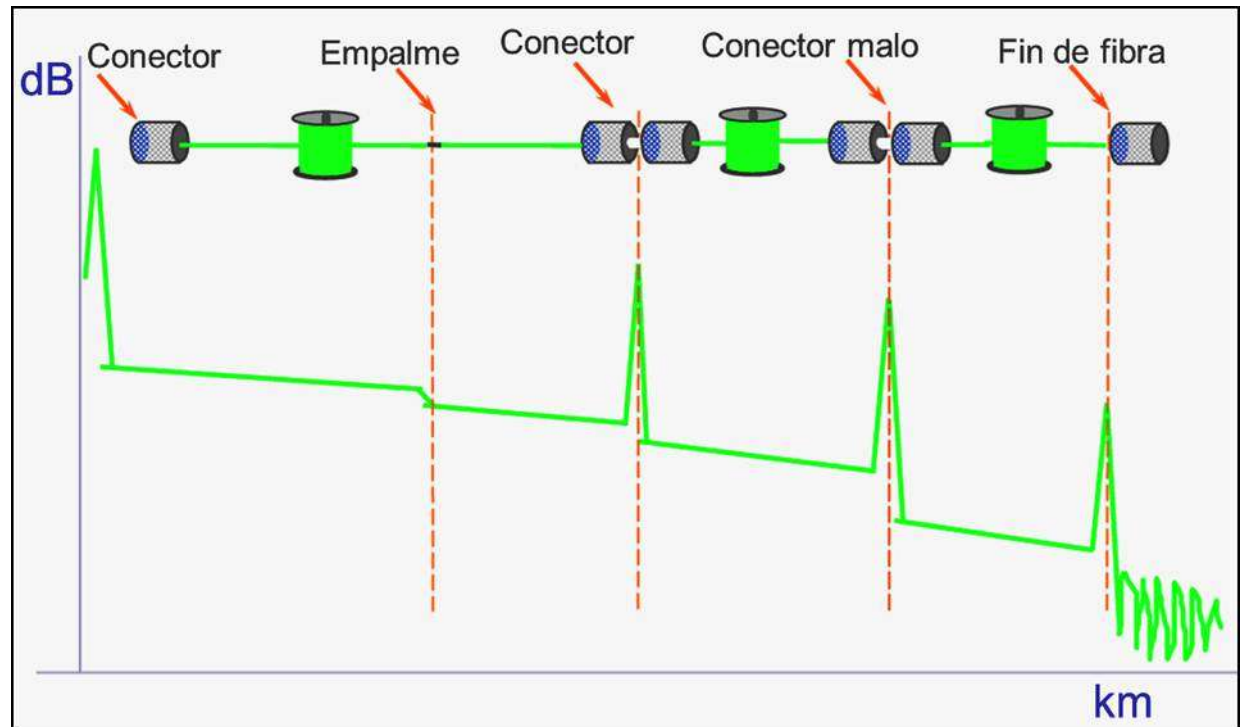
Otros eventos que causan reflexión

Conector. Según la reflexión Fresnel, la luz se refleja al pasar de un medio a otro, como en los conectores, produciendo un **pico reflexivo** antes de atenuar.



Empalme. Los empalmes producen únicamente un descenso de potencia.

Anomalía. Un corte accidental o el fin de fibra, produce un **pico reflexivo** y a continuación un descenso brusco de potencia hasta niveles que no pueden ser detectados.



Salida típica de un OTDR

La salida típica de un **OTDR** es una **representación gráfica** de la atenuación en función de la distancia. Tiene una brusca bajada al comienzo que corresponde a la propia conexión entre el instrumento y la fibra. La gráfica se extiende hasta que el nivel de señal cae por debajo del límite de detección.

Sumando todas las pérdidas se obtiene la pérdida total.

Mediciones con el OTDR - Ejercicios

Ejercicio 17

La pendiente de atenuación de la fibra es continua.

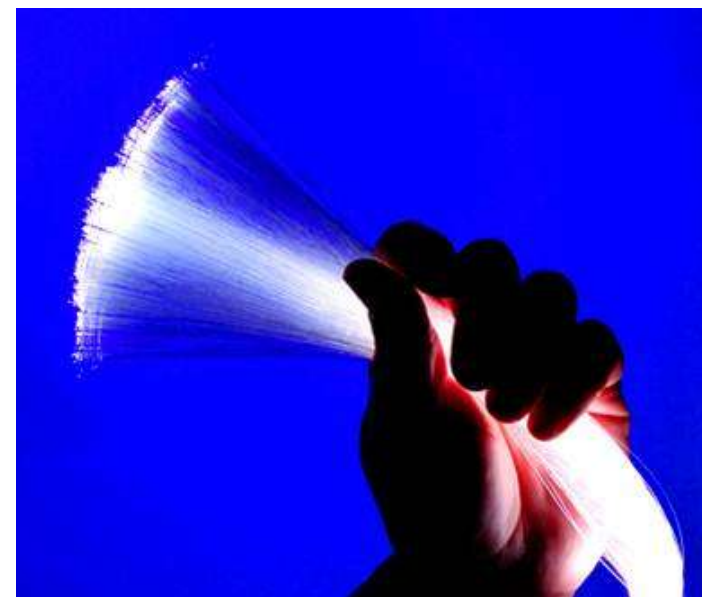
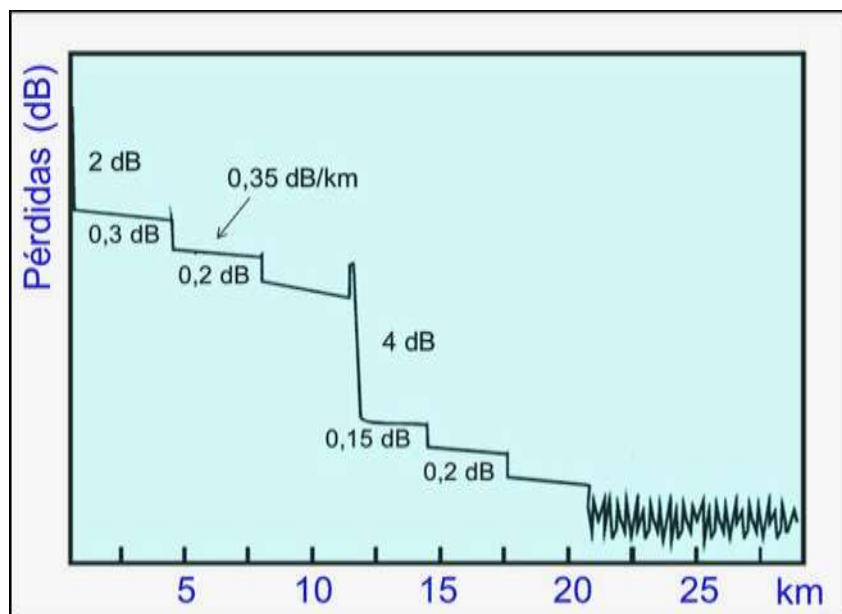
Lecturas en el OTDR. Un OTDR muestra la curva de atenuación de la figura. La fibra tiene un conector al principio, cuatro empalmes por fusión y un empalme por conector en medio tramo.

- Calcule la pérdida total del enlace hasta el final de la fibra.
- Si por el enlace se envían 4mW, calcule la potencia recibida al final de la fibra, considerando que en ese punto tiene que utilizar un conector de 2 dB.

Respuesta.-

a) 14,2 dB

b) -10 dBm



Los conectores producen picos reflexivos antes de atenuar.

FIN

Los empalmes solo atenúan.