



IC323 Comunicación de Datos

Unidad N°3:

Propagación en Medios Guiados

COMUNICACIONES ÓPTICAS

Dr. Ing. Javier Ernesto Kolodziej

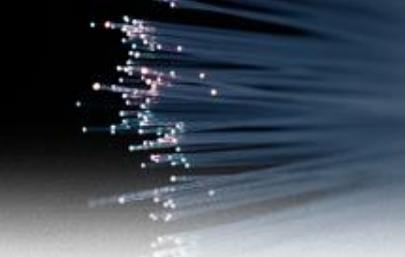
(profesor responsable)

Ing. Luis Urbani

(profesor jefe de trabajos prácticos)

Dr. Ing. Sergio Eduardo Moya

(profesor adjunto)



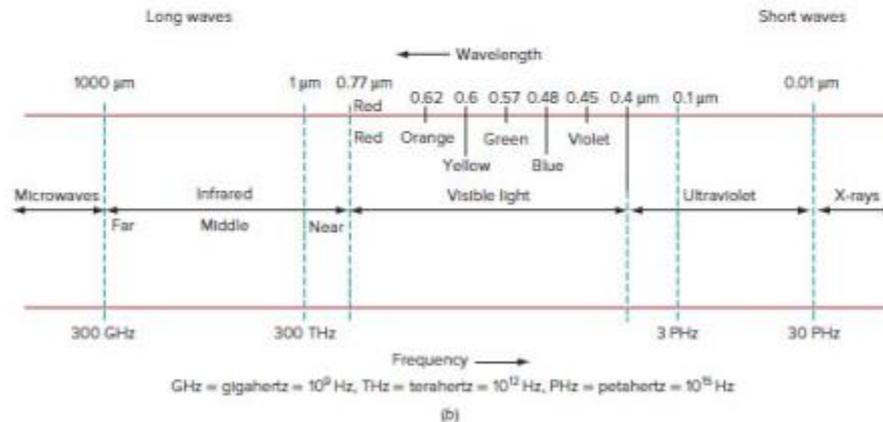
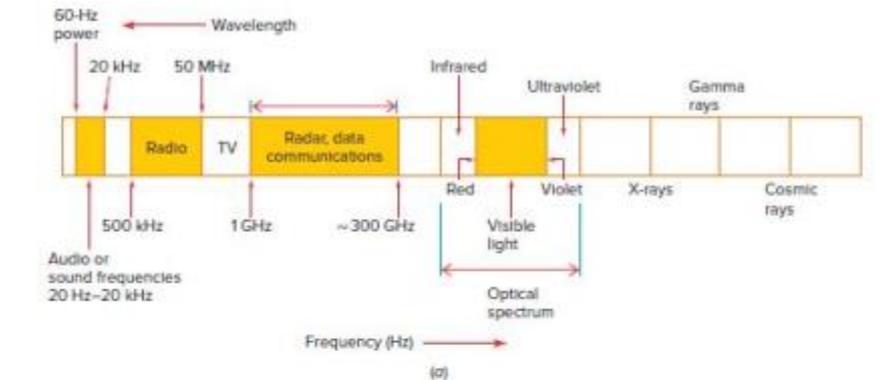
Comunicaciones Ópticas

- **Objetivos:**

- **Definir** los términos óptica y luz.
- **Nombrar** las tres principales bandas del espectro óptico y precisar sus intervalos en longitudes de onda
- **Precisar** ocho beneficios de las fibras ópticas sobre los cables eléctricos para comunicaciones.
- **Nombrar** seis aplicaciones de comunicaciones características para la fibra óptica
- **Explicar** cómo se propaga la luz a través de una fibra óptica.
- **Nombrar** los tres tipos básicos de fibra óptica y conocer los dos materiales básicos para su manufactura.
- **Calcular** las pérdidas de transmisión en dB de la FO y sus conectores
- **Nombrar** los dos tipos de componentes de transmisión óptica y su gama principal de operación

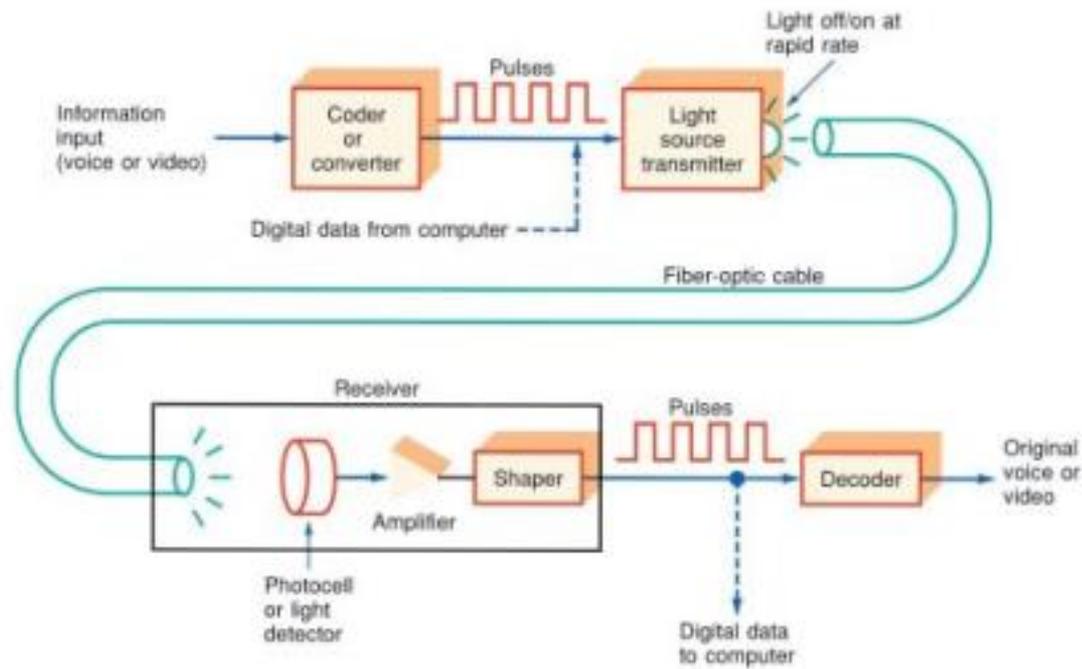
Principios de Óptica

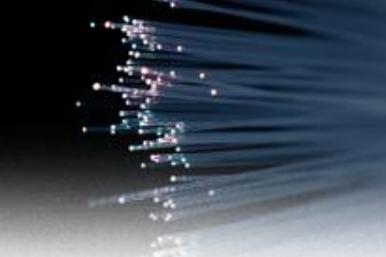
- Buscar en contenidos mínimos donde se da
- La luz, las ondas de radio y las microondas son todas ondas electromagnéticas
- Las principales bandas son la luz visible, la infrarroja y la ultravioleta.



Sistemas de Comunicaciones Ópticas

- Los sistemas de comunicaciones ópticas utilizan la luz como portadora de la información
- Puede tratarse de medios guiados o no guiados (comunicaciones entre satélites, control remoto)
- Los guiados son los más utilizados



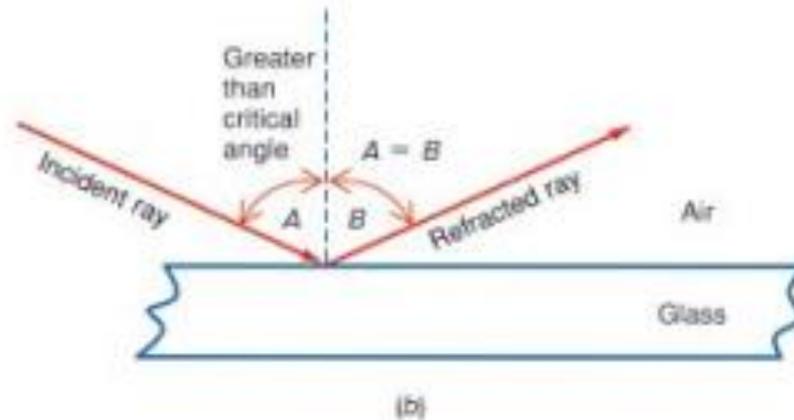
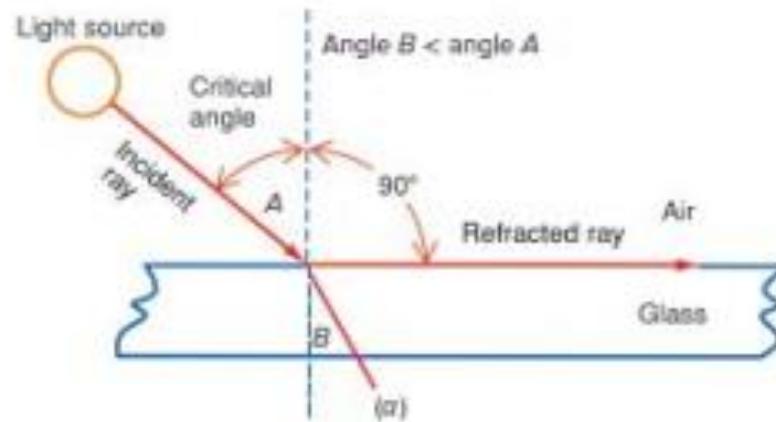


Principales Características FO

- Mayor ancho de banda
- Bajas pérdidas y atenuación
- Peso ligero
- Tamaño reducido
- Seguridad de la información
- Inmunidad a las interferencias
- No existe el riesgo eléctrico
- Desventajas: difíciles de trabajar por su delgadez, requieren equipos especiales

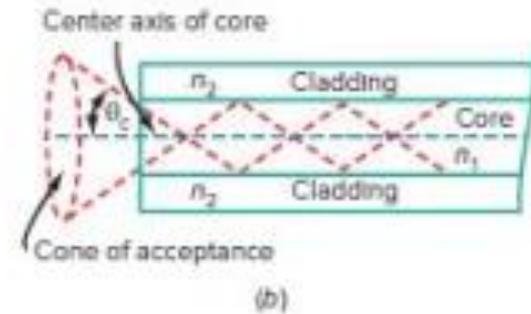
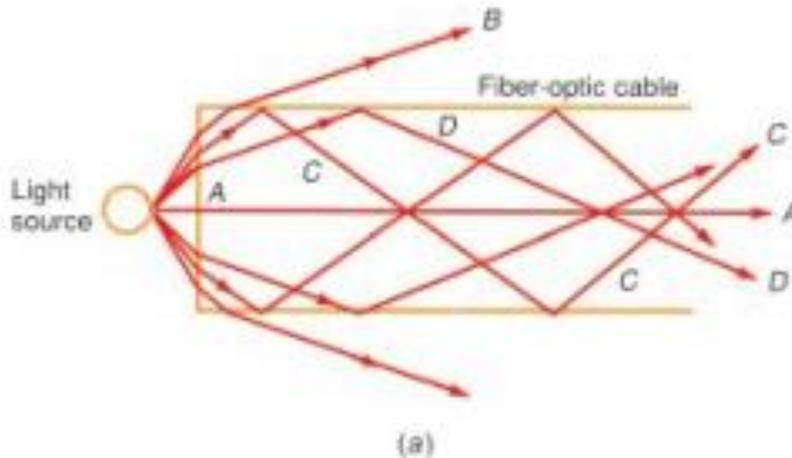
Angulo de Incidencia y Angulo crítico

Efectos de refracción y reflexión



Angulo de Incidencia y Angulo crítico

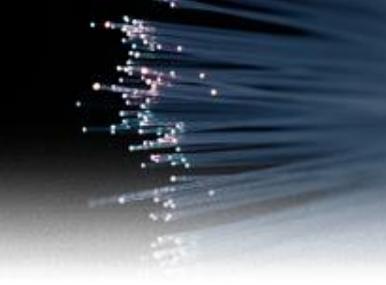
Efectos de refracción y reflexión



El cono de aceptación define la Apertura Numérica (numerical aperture - NA)

Es un número menor a 1 que indica el intervalo de ángulos dentro del cual trabajara la fibra

$$NA = \text{sen} (\theta_c)$$



Angulo de Incidencia y Ángulo crítico

la NA también puede determinarse a partir de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento:

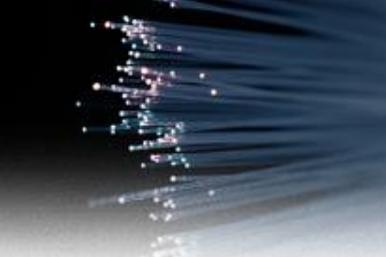
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Ejemplo:

If $n_1 = 1.5$ and $n_2 = 1.4$, the numerical aperture is

$$NA = \sqrt{(1.5)^2 - (1.4)^2} = \sqrt{2.25 - 1.96} = \sqrt{0.29} = 0.5385$$

Tipicamente, la NA está entre 0,275 y 0,29



Ángulo de Incidencia y Ángulo crítico

La NA de una fibra óptica es 0,29. Cuál es el ángulo crítico?

$$NA = \sin \theta_c$$

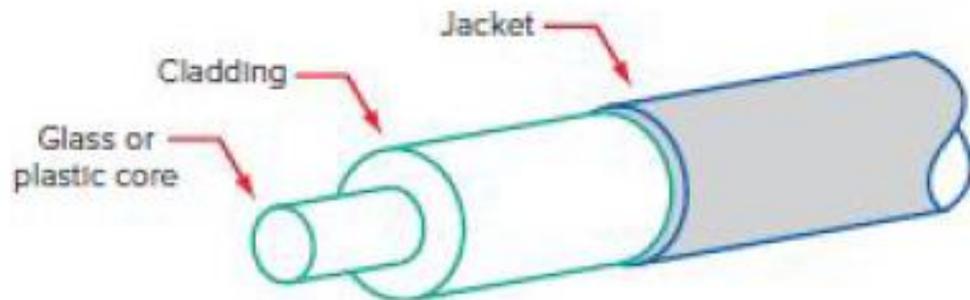
$$0.29 = \sin \theta_c$$

$$\theta_c = \sin^{-1} 0.29 = \arcsin 0.29$$

$$\theta_c = 16.86^\circ$$

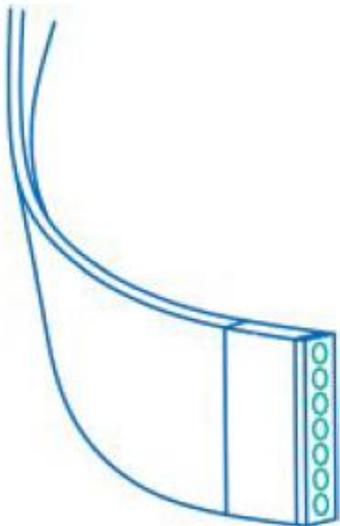
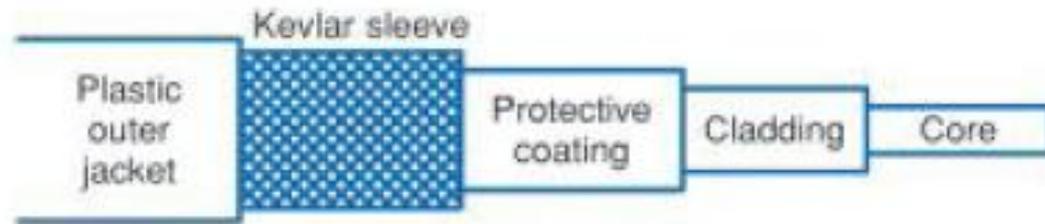
Construcción de la Fibra óptica

- La porción que transporta la luz es de vidrio (sílice) o plástico y es llamada núcleo
- El vidrio tiene mejores condiciones de propagación que el plástico, pero es más costoso
- El núcleo es rodeado de un revestimiento del mismo material pero con un índice de refracción (N_2) es ligeramente menor que el del núcleo (N_1) (Típicamente $N_1=1,5$ y $N_2=1,4$)
- Por encima del revestimiento hay una cubierta plástica



Construcción de la Fibra óptica

- Algunos cables de fibra óptica incorporan elementos para darle más resistencia mecánica, como acero o kevlar, y también lograr mayor inmunidad a la influencia de las condiciones ambientales



- Se pueden incluir varios núcleos en el mismo cable, como el cable plano ilustrado en la figura

Tipos de Cable de Fibra Óptica

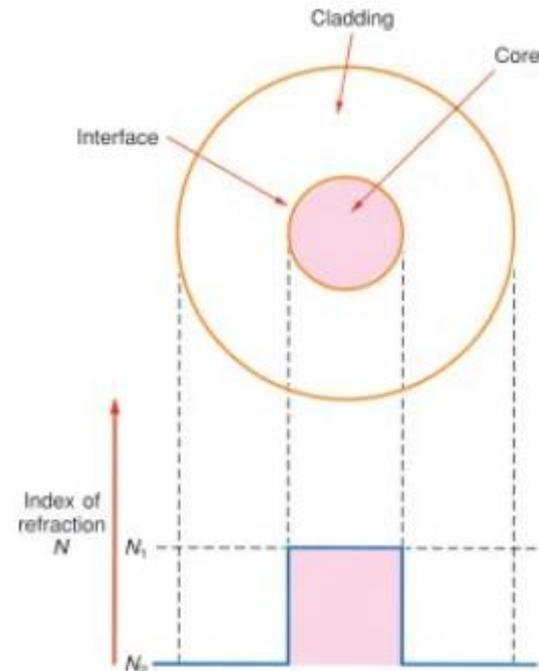
Existen dos formas de clasificar las fibras ópticas:

- Mediante el índice de refracción
- Modo de propagación (trayectorias que puede tomar el rayo al pasar por la fibra)

Por lo general, estos dos modos se combinan para definir los tipos de cable

Por el índice de refracción tenemos:

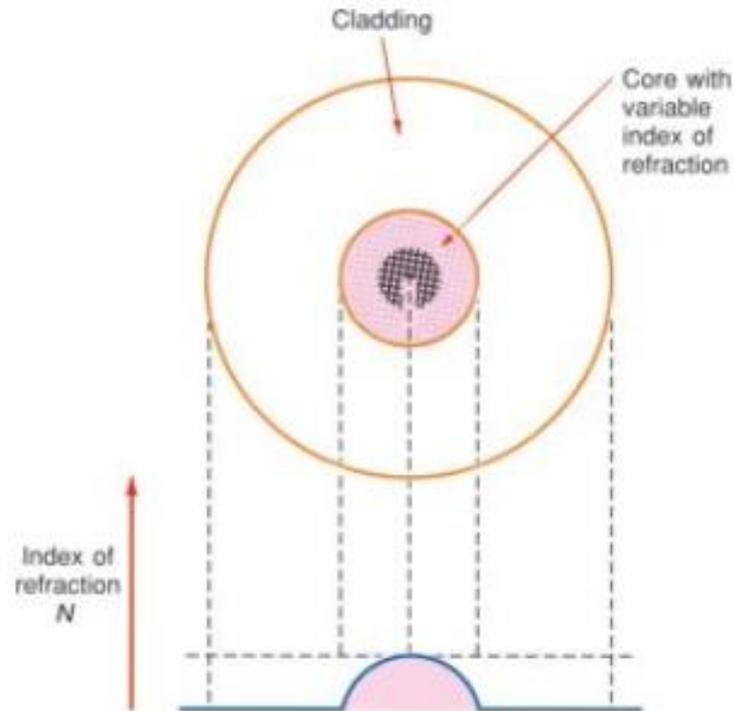
- Cable de índice escalonado:

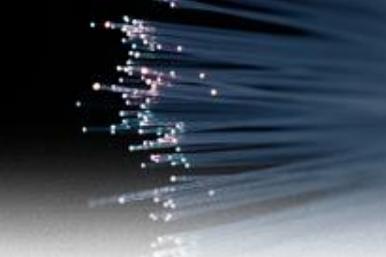


Tipos de Cable de Fibra Óptica

Por el índice de refracción tenemos:

- Cable de índice gradual





Tipos de Cable de Fibra Óptica

Por el modo de propagación tenemos:

- Mono modo: la luz sigue una sola trayectoria dentro del núcleo
- Multimodo: la luz sigue múltiples trayectorias

La combinación del modo de propagación y el índice de refracción determinan en la práctica tres tipos de cables:

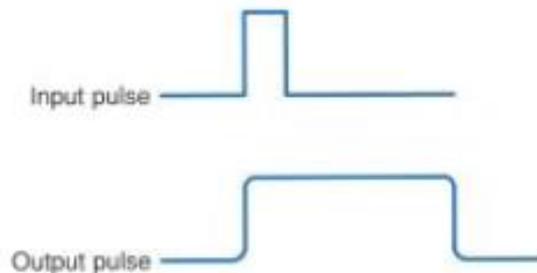
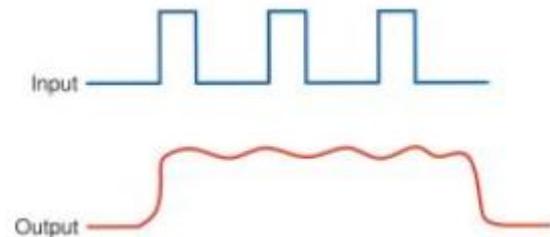
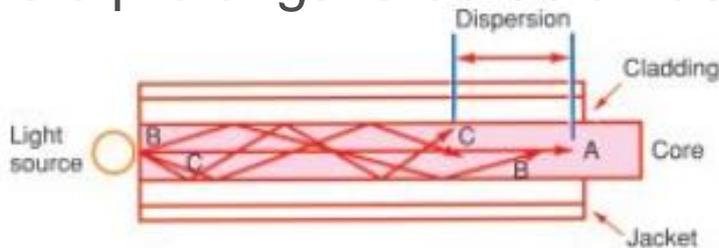
- Índice escalonado multimodo
- Índice escalonado monomodo
- Índice gradual multimodo

A continuación, se desarrollan cada uno

Tipos de Cable de Fibra Óptica

Cable de índice escalonado multimodo:

- Es el más común y más utilizado
- Es el más fácil de fabricar y el que cuesta menos
- La fuente de luz puede ser un simple led
- Se utiliza para distancias cortas y medias a velocidades bajas
- El tamaño del núcleo está entre 50 y 1.000 μm
- La luz toma varios cientos e incluso miles de trayectorias
- Esto prolonga la duración del pulso llamado dispersión modal (también disminuye la amplitud)



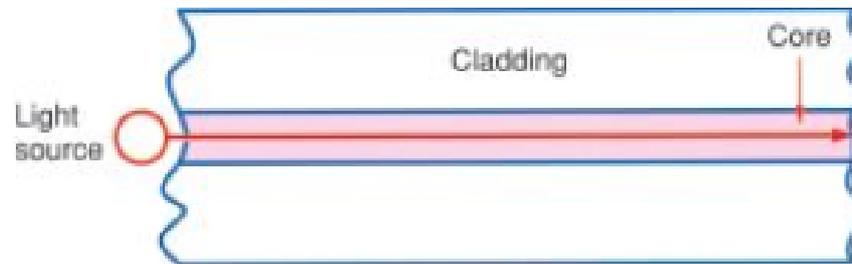
Efecto de la dispersión modal a velocidades muy altas.

Se pueden usar compensación electrónica de dispersión (EDC)

Tipos de Cable de Fibra Óptica

Cable de índice escalonado monomodo:

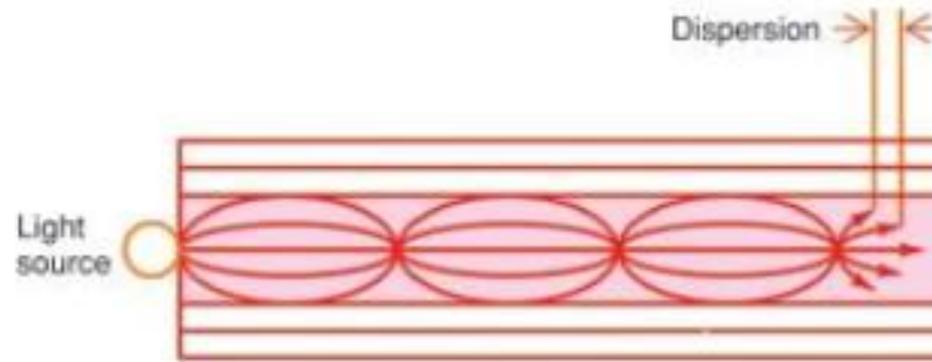
- Elimina la dispersión modal reduciendo tanto el núcleo que el número de trayectorias resulta mínimo
- El tamaño del núcleo va de 2 a 15 μm
- Grandes distancias, altas tasas de transmisión
- Son en extremo pequeños y difíciles de fabricar, resultan más caros
- También son difíciles de manejar, empalmar y conexionar
- La fuente de luz debe ser un láser



Tipos de Cable de Fibra Óptica

Cable de índice gradual multimodo:

- Tienen varios modos de propagación pero son más ordenados y predecibles



- El índice gradual provoca curvaturas en los haces
- Las trayectorias de los extremos son más rápidas
- Tamaño del núcleo de 50 a 100 μm
- Son más fáciles de empalmar y conectar
- Fuentes de luz más baratas y menos intensas

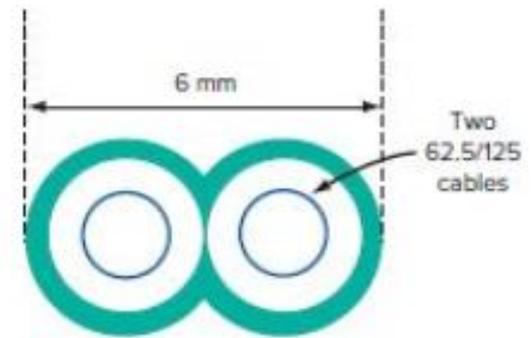
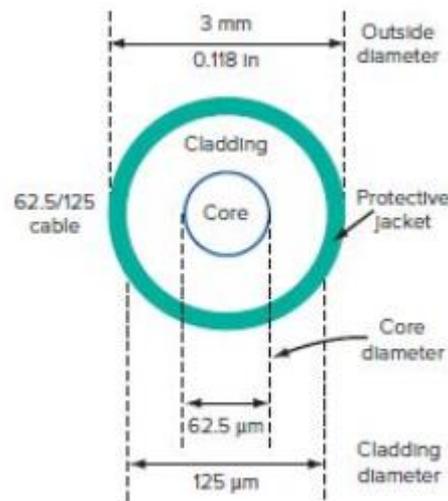
Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

Las principales especificaciones son:

- Tamaño
- Atenuación
- Ancho de banda

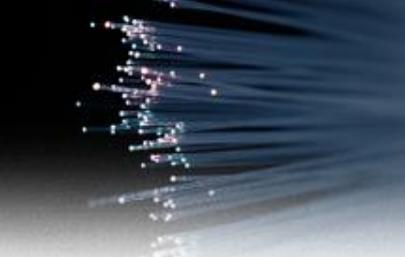
Tamaño: medida del núcleo y el revestimiento en μm

Ejemplo: 62,5/125
(más utilizado)



Otros ejemplos: 50/125, 100/140,

Cable doble



Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

Atenuación: es la especificación más importante
Se refiere a la pérdida de energía cuando la luz viaja de un extremo al otro.

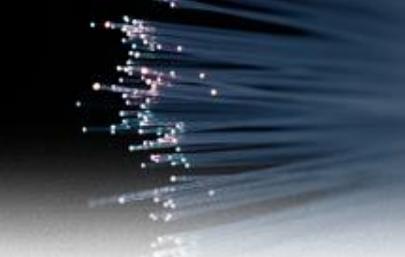
Las causas principales son:

- **Absorción:** la energía se convierte en calor en el núcleo de la fibra por impurezas en el vidrio o plástico
- **Fuga de luz:** pérdidas de luz a causa de rayos que entran en ángulos incorrectos y se pierden en el revestimiento por refracción
- **Dispersión:** disminuye la amplitud por el alargamiento del pulso

El vidrio tiene menos atenuación que el plástico

Los núcleos más anchos tienen menos atenuación que los angostos del mismo material (menor absorción, mayor dispersión)

Los núcleos más anchos suelen ser de plástico

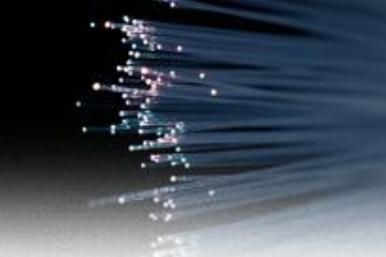


Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

La atenuación se mide en decibelios por unidad de longitud (directamente proporcional a la longitud):

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}} \right)$$

Loss, dB	Power Output, %
1	79
2	63
3	50
4	40
5	31
6	25
7	20
8	14
9	12
10	10
20	1
30	0.1
40	0.01
50	0.001



Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

La atenuación se mide en decibelios por unidad de longitud (directamente proporcional a la longitud):

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}} \right)$$

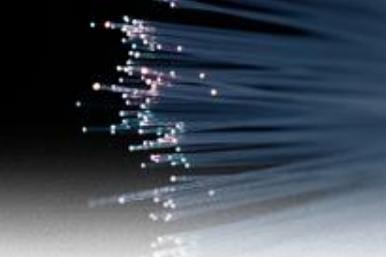
Una fibra con atenuación menor a 10dB/km se considera de bajas pérdidas, una de entre 10 dB/km y 100 dB/km de pérdidas medias, y mayor a 100 dB/km altas pérdidas.

Un cable típico 62,5/125 tiene una pérdida de 3 a 5 dB/km

Un cable monomodo de índice escalonado, solo 1 dB/km.

¿Cuál es la atenuación de una fibra óptica de 15 km considerando pérdidas de 3,75dB/km?

Si un tramo de fibra tiene una pérdida de 17 dB y otra 24 dB, ¿cuál es la pérdida total al empalmar los dos tramos?



Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

Ancho de Banda:

Determina la velocidad máxima de pulsos que puede conducir

Generalmente se mide en MHz – Km

Un cable 62,5/125 tiene un ancho de banda entre 100 y 300 MHz

También se pueden encontrar de 500 y 600 MHz o gigahertz.

Conforme aumenta la longitud del cable, el ancho de banda disminuye en proporción.

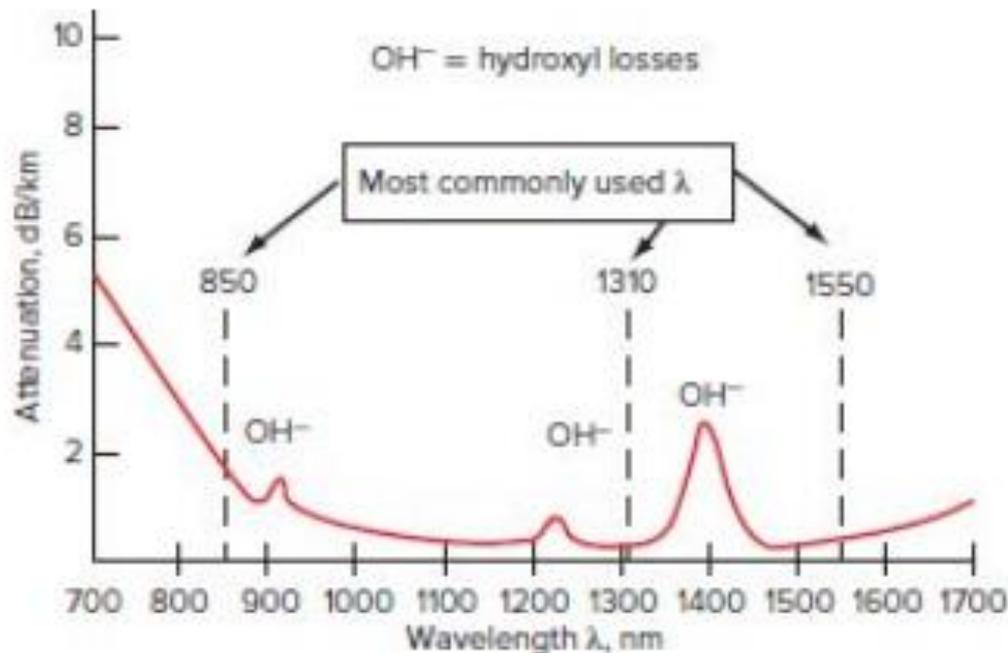
Si se duplica la longitud de un cable de 160 MHz – km, de 1 a 2 km, el ancho de banda se reduce a la mitad, a 80 MHz.

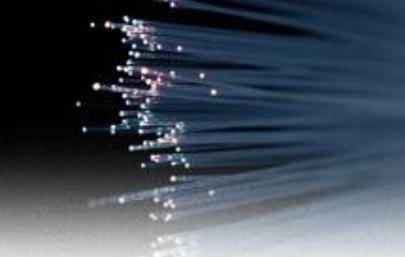
Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

Intervalo de frecuencias:

La mayor parte de las fibras ópticas operan dentro de un intervalo de frecuencias de luz más o menos amplio

Las más comunes son: 860, 1.300 y 1.550 nm (el cable tiene una atenuación mínima en estas frecuencias)





Especificaciones de Cables de Fibra Óptica

Intervalo de frecuencias: Ejemplo

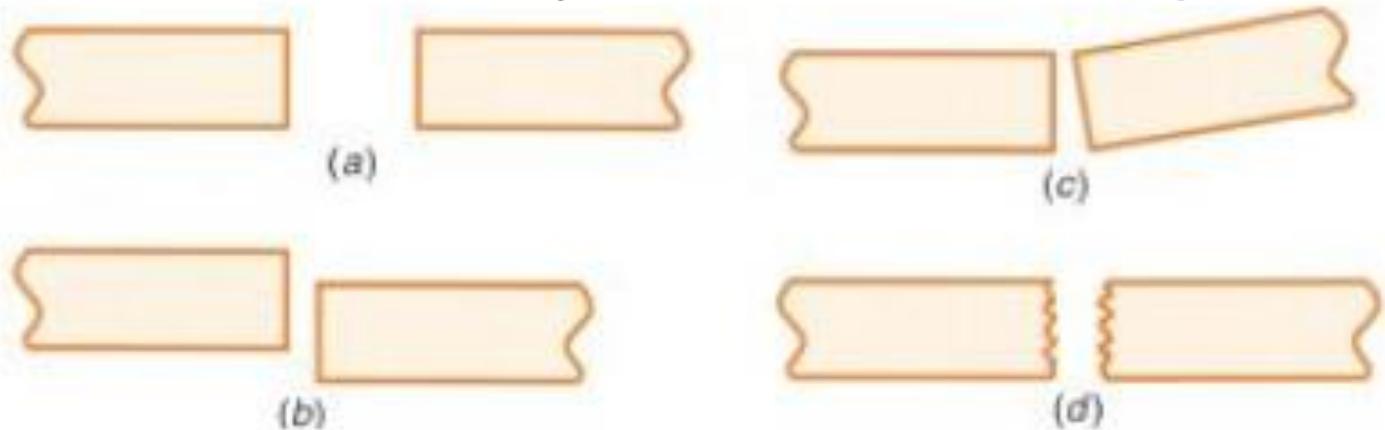
Si una fibra óptica tiene un ancho de banda de 600MHz – km. ¿Cuál es el ancho de banda de un segmento de 0,153 km?

$$x [MHz] = \frac{600 \text{ MHz} - km}{0,153 \text{ km}} = 3.928,3 \text{ MHz o } 3,93 \text{ GHz}$$

Conectores y Empalmes

- Empalmar: los extremos de los cables se alinean a la perfección y se unen por fusión mediante calor
- Un mal empalme o conexión introduce una atenuación excesiva al salir la luz de un cable y entrar en otro.

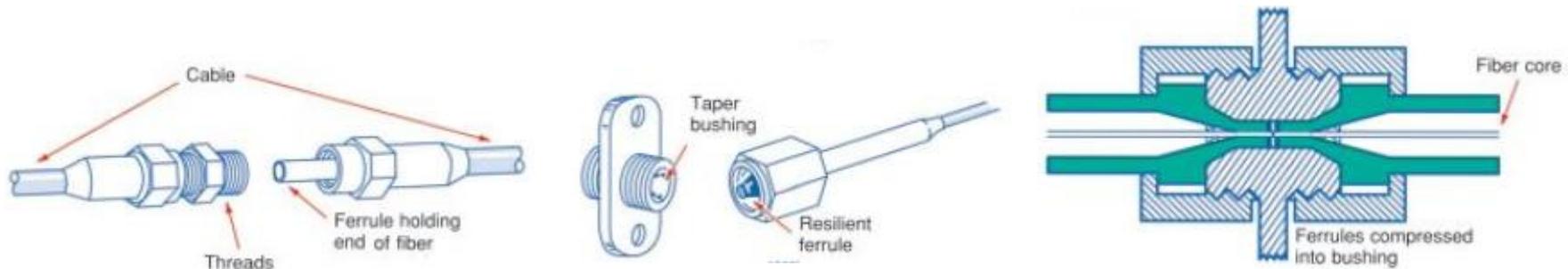
Ejemplos de mal alineamiento y extremos con superficies ásperas



Para empalmarse, debe hacerse un corte recto, limpio, con herramientas especiales

Conectores y Empalmes

- También hay una variedad de conectores: son ensambles mecánicos que permiten conectar fibras ópticas entre sí
- Conector general de FO



- Conector ST: también llamado conector de bayoneta, se basan en un dispositivo de media vuelta de tipo leva como el de los conectores coaxiales BNC. Son convenientes para conexión y desconexión rápida
- Conector SMA, son aproximadamente del mismo tamaño pero tienen conexiones roscadas



Transmisores y receptores ópticos

- El transmisor consiste de un generador de una portadora y de un modulador
- La portadora es un haz de luz modulado casi siempre por encendido/apagado, mediante pulsos digitales
- El transmisor básico es en esencia una fuente de luz
- El receptor es un fotodetector que convierte la luz recibida en una señal eléctrica
- Fuentes de Luz:
 - **Diodos emisores de luz (LED) para la transmisión por fibra óptica: están normalmente en el intervalo del rojo e infrarrojo cercano (0,82, 0,94, 1,3 y 1,55 μm). No son visibles al ojo humano. Se escogieron por minimizar pérdidas dentro de la FO.**
Su salida de luz se expresa en potencia, normalmente de 10 a 50 μW . También se puede referir a dBm (relación con 1mW)
Velocidad de hasta 500 MHz



Transmisores y receptores ópticos

- Fuentes de Luz:
 - **Laser:** emite luz monocromática (una sola frecuencia), coherente (todas las ondas de luz están en fase entre sí)
Produce un enfoque en un haz angosto e intenso
- La fuente de luz más común en sistemas de fibra óptica es un diodo laser de inyección (ILD – *injection laser diode*)
- Con una corriente de polarización de bajo nivel funciona como un LED, produciendo luz de bajo nivel en un intervalo amplio de frecuencias
- A un nivel de corriente de conducción más alto, denominado umbral, el ILD opera como un laser, emitiendo una luz brillante dentro de un rango de frecuencias mucho más angosto
- Los ILD disipan una tremenda cantidad de calor y deben conectarse a un difusor de calor para su correcta operación

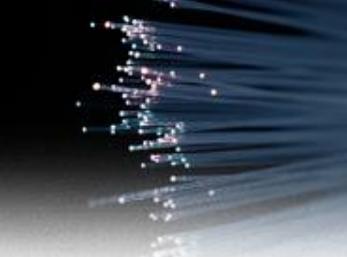


Transmisores y receptores ópticos

- Detectores de Luz:

La parte receptora consta de un detector sensible a los pulsos de luz que los convierte en una señal eléctrica que luego es amplificada y conformada como datos digitales.

- **Fotodiodo:** es el sensor de mayor uso. Se polariza en inversa y su corriente de fuga se incrementa con una luz incidente
- **Fototransistor:** provee mayores corrientes y tensiones
- **Diodo PIN:** son muchísimo más rápidos en respuesta a cambios rápidos de pulsos de luz de alta frecuencia, y su sensibilidad a la luz es mucho mayor que la de un fotodiodo común
- **Diodo de avalancha (*avalanche photodiode* - APD):** es el diodo más rápido y más sensible pero es caro y su circuito complicado



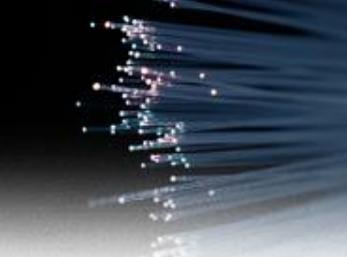
Consideraciones de Desempeño

La especificación más importante de un sistema de comunicación por fibra óptica es la velocidad de datos o velocidad de pulsos ópticos.

Los mejores sistemas se basan en diodos laser de inyección de alta potencia y detectores APD, logrando velocidades gigabit (Gbps)

El desempeño se indica por el producto distancia velocidad de datos

La velocidad de datos también está limitada por la dispersión
Los tiempos de subida y caída de los pulsos recibidos se incrementan en una cantidad igual al valor de dispersión.



Consideraciones de Desempeño

Una fórmula sencilla para determinar la velocidad de datos máxima R , para una distancia D , con un factor de dispersión d , es:

$$R = \frac{1}{5dD}$$

Por ejemplo, considere un cable de 8 km y un factor de dispersión de 10 ns/km

$$R = \frac{1}{5(0,01)(8)} = 2,5 \text{ Mbps}$$

Esta expresión es solo una aproximación pero es un medio práctico para predecir las limitaciones de un sistema



Consideraciones de Desempeño

Ejemplo: De una medición realizada en un cable de fibra óptica de 0,367 Km se determina que su frecuencia superior límite es 43 Mbps. ¿Cuál es el factor de dispersión?

$$d = \frac{1}{5DR} = \frac{1}{5(0,367)(43 \times 10^6)} = 12,7 \text{ ns/km}$$



Estimación de Potencia

Un estimado de potencia es una contabilidad de todas la atenuaciones y ganancias en un sistema de fibra óptica.

Las ganancias deben ser mayores que las pérdidas para que el sistema funcione

El receptor debe recibir la suficiente luz dado lo que indica su sensibilidad

Pérdidas: Hay numerosas fuentes de pérdidas a lo largo de la fibra óptica:

1. Pérdidas del cable: van de 1dB/km a decenas de dB/km
2. Conexiones entre la fibra y la fuente y entre la fibra y el fotodetector: de entre 1 a 6 dB
3. Conectores: de 0,5 a 2dB
4. Empalmes: si eta bien hecho de solo algunos décimos de dB
5. Dobleces o curvaturas: recomendable un radio de curvatura



Estimación de Potencia: Ejemplo

Assume a system with the following specifications:

1. Light transmitter LED output power: $30 \mu\text{W}$
2. Light receiver sensitivity: $1 \mu\text{W}$
3. Cable length: 6 km
4. Cable attenuation: 3 dB/km, $3 \times 6 = 18 \text{ dB total}$
5. Four connectors: attenuation 0.8 dB each, $4 \times 0.8 = 3.2 \text{ dB total}$
6. LED-to-connector loss: 2 dB
7. Connector-to-photodetector loss: 2 dB
8. Cable dispersion: 8 ns/km
9. Data rate: 3 Mbps

First, calculate all the losses; add all the decibel loss factors.

$$\text{Total loss, dB} = 18 + 3.2 + 2 + 2 = 25.2 \text{ dB}$$

Also add a 4-dB contingency factor, making the total loss $25.2 + 4$, or 29.2, dB. What power gain is needed to overcome this loss?



Estimación de Potencia: Ejemplo

$$29.2 \text{ dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

Therefore,

$$\frac{P_t}{P_r} = 10^{\text{dB}/10} = 10^{2.92} = 831.8$$

If P_t is $30 \mu\text{W}$, then

$$P_r = \frac{30}{831.8} = 0.036 \mu\text{W}$$

Estimación de Potencia: Ejemplo

1. Increase transmitter power.
2. Get a more sensitive receiver.
3. Add a repeater.

In an initial design, the problem would be solved by increasing the transmitter power and/or increasing receiver sensitivity. Theoretically a lower-loss cable could also be used. Over short distances, a repeater is an unnecessary expense; therefore, using a repeater is not a good option.

Assume that the transmitter output power is increased to 1 mW or 1000 μ W. The new received power then is

$$P_r = \frac{1000}{831.8} = 1.2 \mu\text{W}$$

This is just over the threshold of the receiver sensitivity. Now, we can determine the upper frequency or data rate.

$$R = \frac{1}{5dD} = \frac{1}{5(0.008)(6)} = 4.1666 \text{ Mbps}$$

This is higher than the proposed data rate of 3 Mbps, so the system should work.