

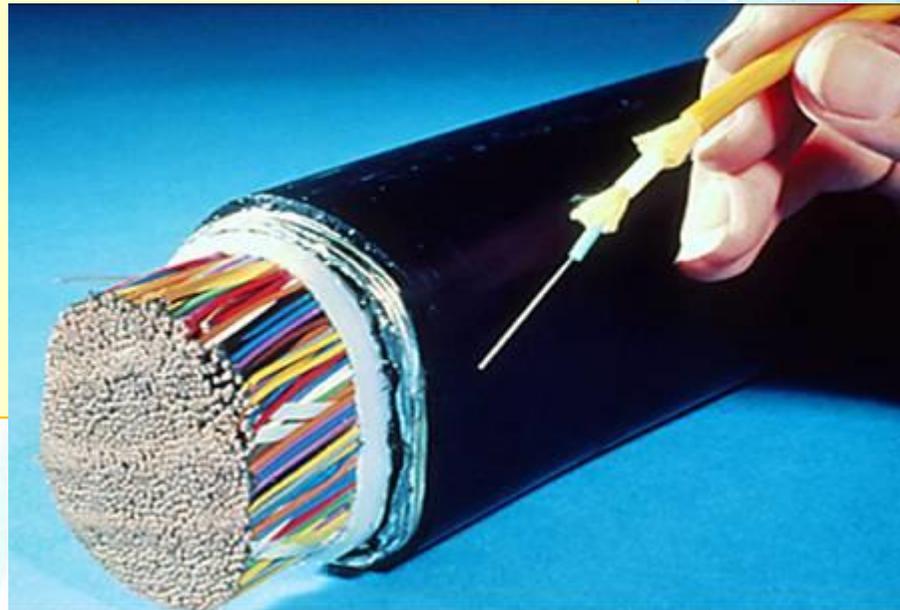
Sección 4 – Parte 2ª  
Anexo I

# CAPA FÍSICA MEDIOS DE TRANSMISIÓN FIBRA ÓPTICA

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Contenido

- Principios de la transmisión por fibra óptica.
- Tipos de fibra.
- Estándares de fibra
- Energía óptica.
- Transporte óptico.
- Tecnología WDM

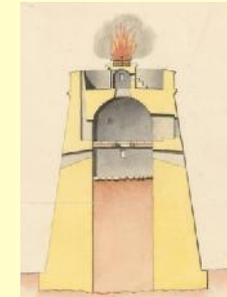


# Medios transmisión: Fibra óptica

## Orígenes

- Las **comunicaciones ópticas** son tan antiguas como la humanidad, desde el comienzo de la civilización los mensajes ópticos se han usado para intercambiar información:

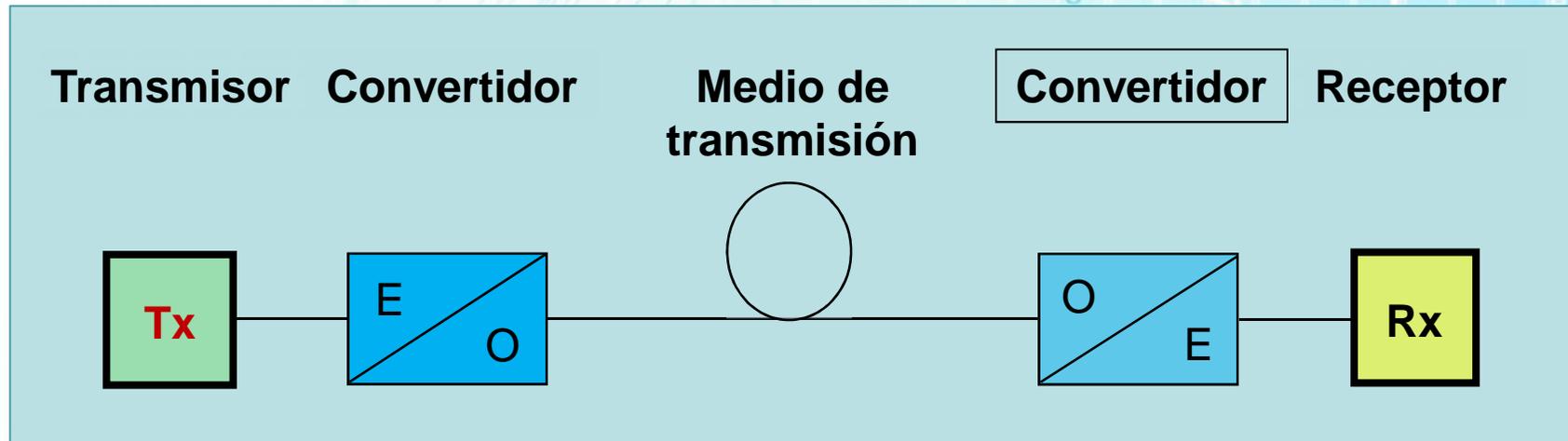
- Señales con las manos
- Señales de humo
- Telégrafos ópticos (banderas, luz, etc.)



- Para el desarrollo de las **comunicaciones mediante fibras ópticas** tal y como las usamos ahora fueron necesarios **dos hechos**:
  - La **transmisión de la luz sobre materia transparente** ( en 1870 Tyndall sentó los principios, en 1970 , Corning, realizó la primera usando fibra óptica).
  - Disponibilidad del **LASER** en 1960.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Principio de un sistema comunicaciones óptico

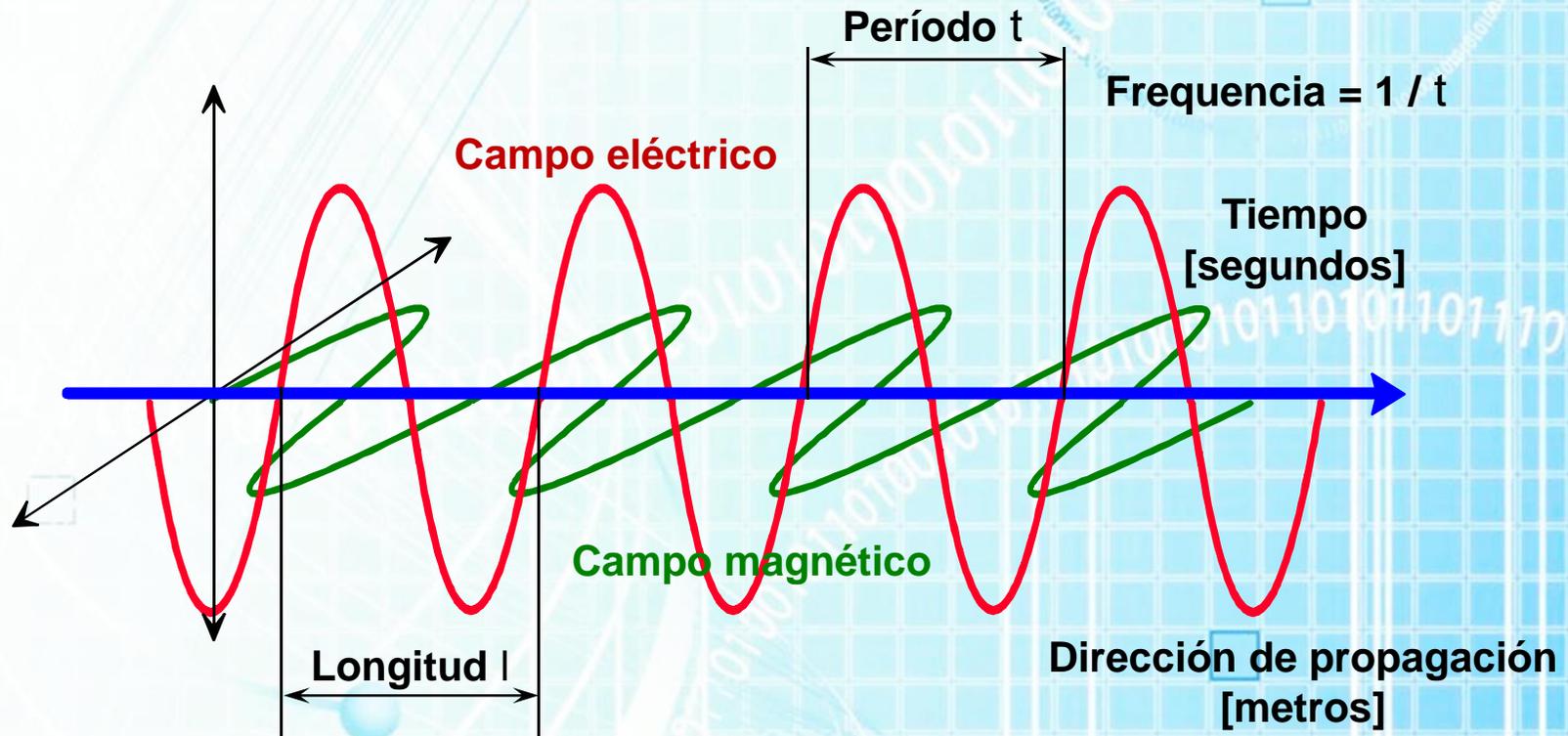


### Componentes del sistema

- **Transmisor:** Origen de la información, sistema electrónico.
- **Convertidor E/O** (electrónico / óptico): traduce las señales eléctricas a pulsos de luz.
- **Medio de transmisión:** Fibra óptica, en algunos casos, con accesorios ópticos.
- **Convertidor O/E** (óptico / electrónico): traduce los pulsos de luz a señales eléctricas.
- **Receptor:** Recibe la información como el Transmisor la envió.

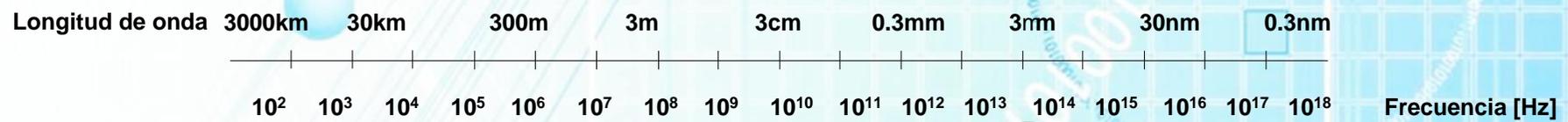
# Medios transmisión: Fibra óptica

## La luz como onda electromagnética



# Medios transmisión: Fibra óptica

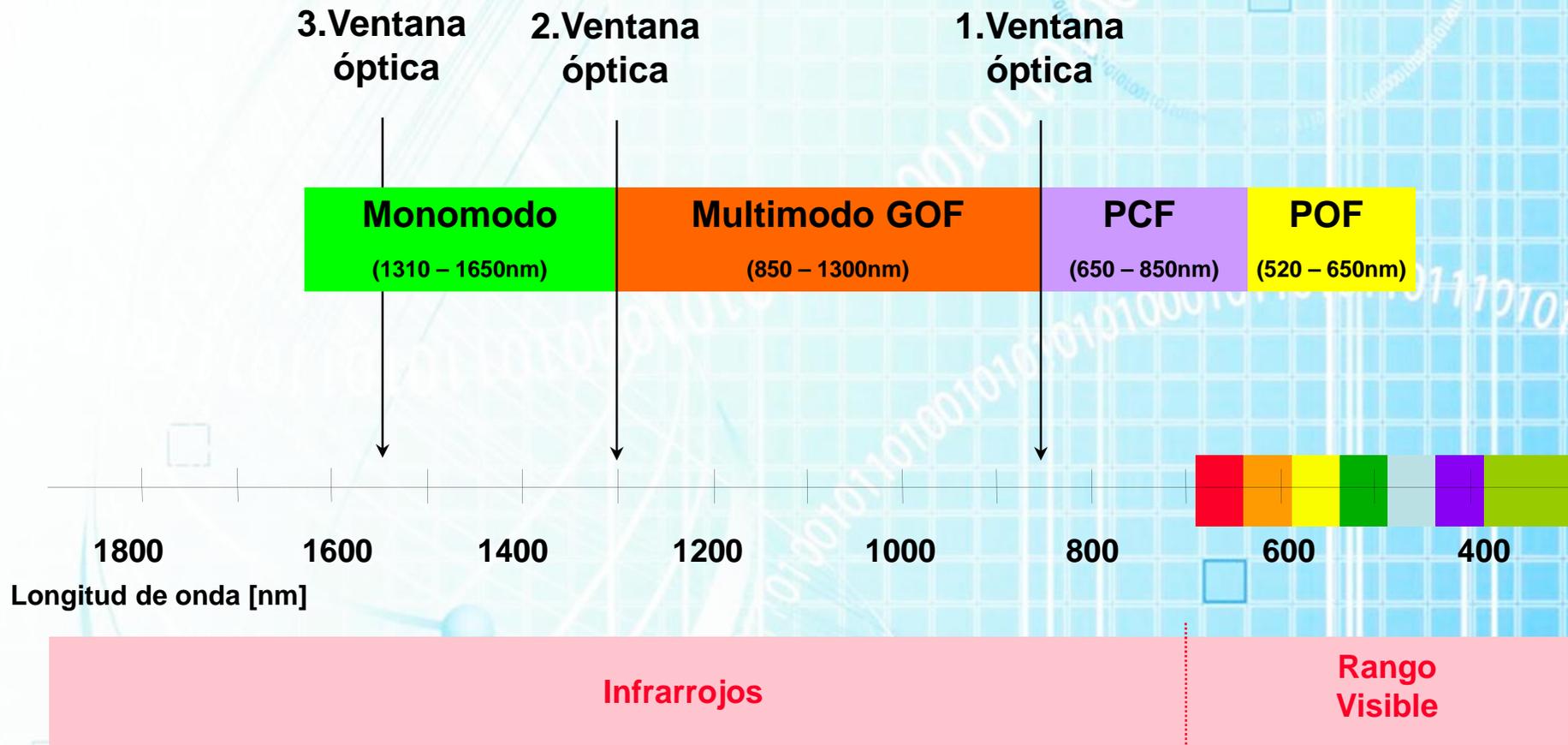
## Espectro de transmisiones electromagnéticas



www.micronica.es

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Longitudes de ondas usados en transmisiones ópticas



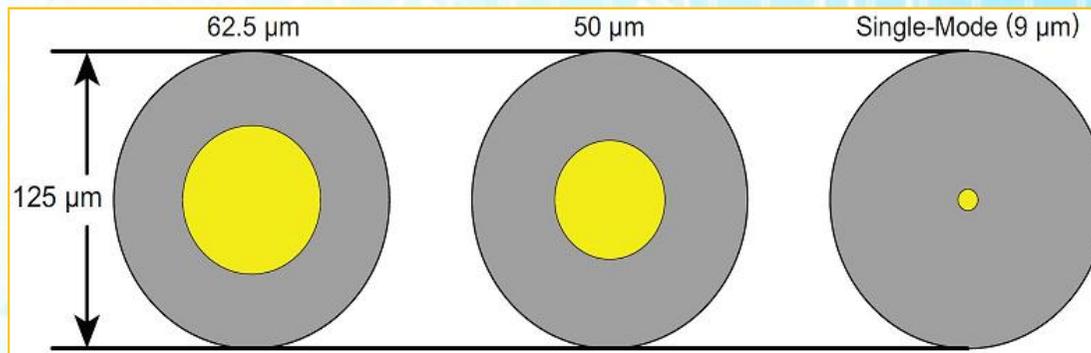
www.micronica.es

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Tipos Multimodo (MM) y Monomodo (SM)

	<i>Multimodo</i>	<i>Monomodo</i>
<i>Tamaño núcleo</i>	Mayor 50 - 62,5 $\mu\text{m}$	Pequeño 8 $\mu\text{m}$
<i>Haces de luz (*)</i>	Varios	Uno
<i>Distancia</i>	Corta	Larga
<i>Ancho de banda</i>	Bajo	Alto
<i>Aplicación</i>	Red acceso	Largas distancias

Estos conceptos se irán viendo más adelante, en principio es la clasificación más simple en cuanto a tipos de fibra y su uso, siendo la diferencia principal el tamaño del núcleo (core), vía por donde circula la luz. (\*) *No se refiere a fuentes de luz diferentes*



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Velocidad de las ondas electromagnéticas

### Velocidad de la luz en el vacío

Velocidad de la luz (radiación electromagnética) es:



$C_0 = \text{Longitud de onda} \times \text{frecuencia}$



$C_0 = 299793 \text{ km / s}$

**Notas:** Un haz de rayos X ( $\lambda = 0.3 \text{ nm}$ ), un haz de radar ( $\lambda = 10 \text{ cm} \sim 3 \text{ GHz}$ ) o un haz de infrarrojos ( $\lambda = 840 \text{ nm}$ ) tienen la misma velocidad en el vacío.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Índice de refracción

### Cambio de velocidad de la luz en la materia

#### Velocidad de la luz (radiación electromagnética):

✓ siempre menor que en el vacío:

$C_n$  (Velocidad de la luz en la materia)

✓  $n = C_0 / C_n$

✓  $n$  se define como *índice de refracción* ( $n = 1$  en el vacío)

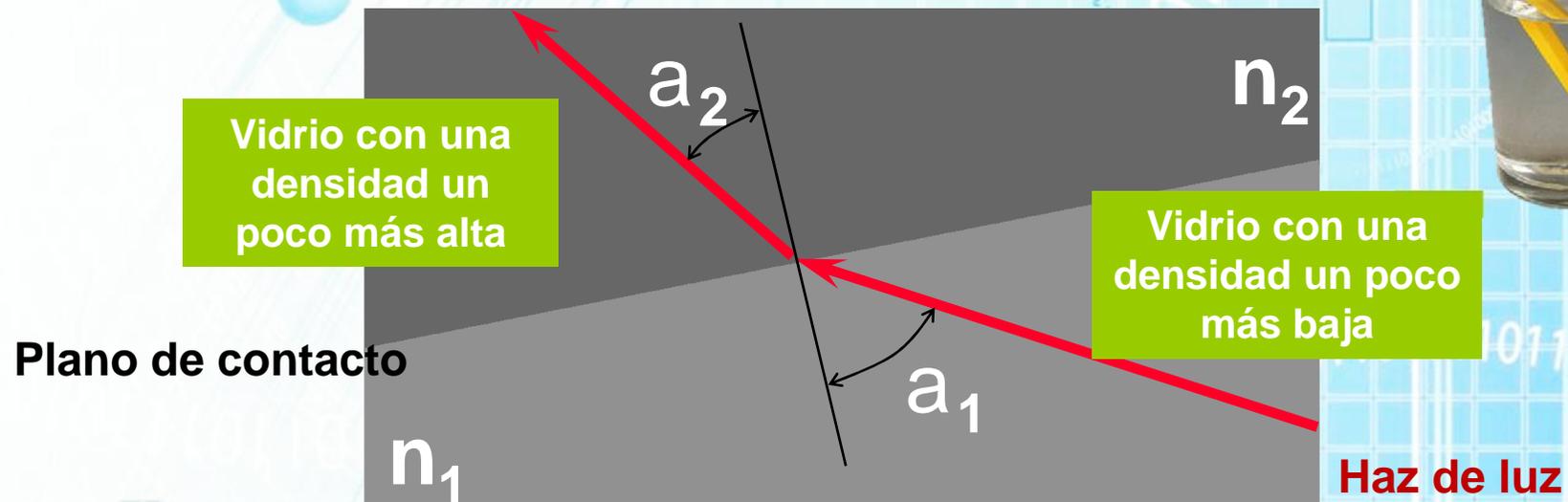
✓  $n$  depende de la *densidad de la materia* y de la *longitud de onda*

Medio	Velocidad luz (km/s)	Índice de refracción
Aire (0 °C)	299 705	1'000293
Agua	224 900	1'333
Vidrio	197 232	1'52
Diamante	118 965	2'52

**Notas:**  $n_{\text{Aire}} = 1.0003$ ;  $n_{\text{núcleo}} = 1.5000$  o  $n_{\text{agua dulce}} = 1.8300$

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Refracción en dos medios



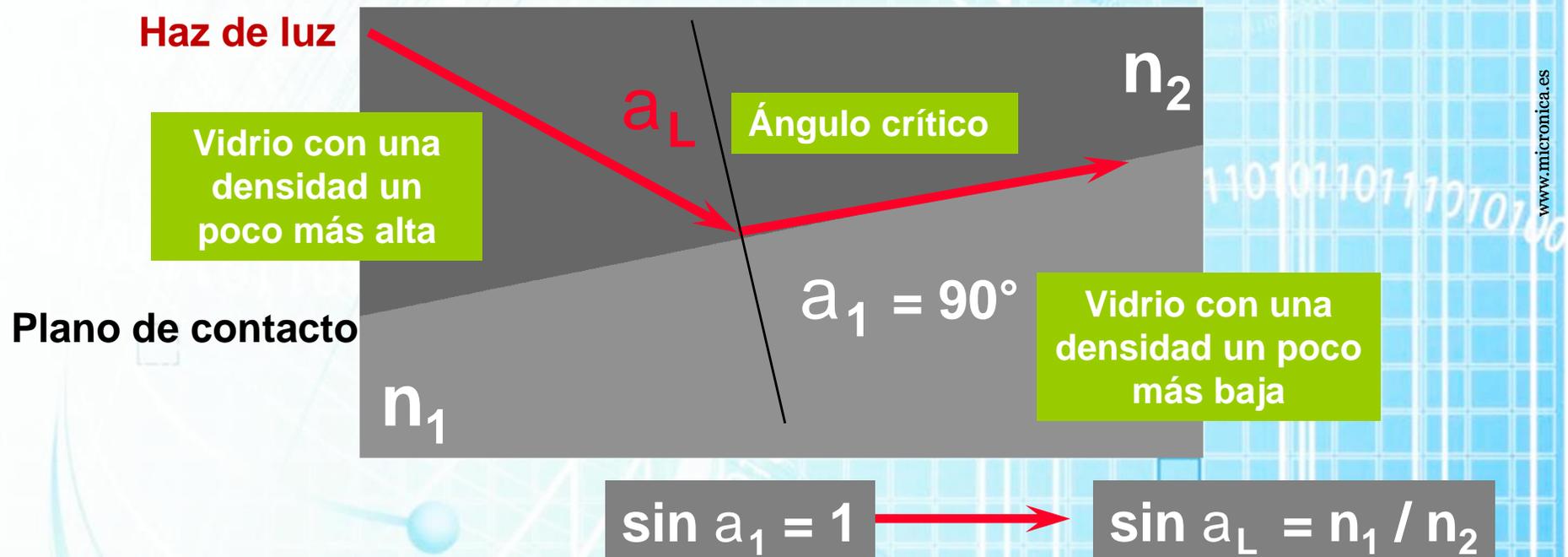
**Notas:**  $n_1 < n_2$  y  $a_1 > a_2$

$$\sin a_2 / \sin a_1 = n_1 / n_2$$

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Refracción total en dos medios

Ángulo luz incidente = ángulo crítico

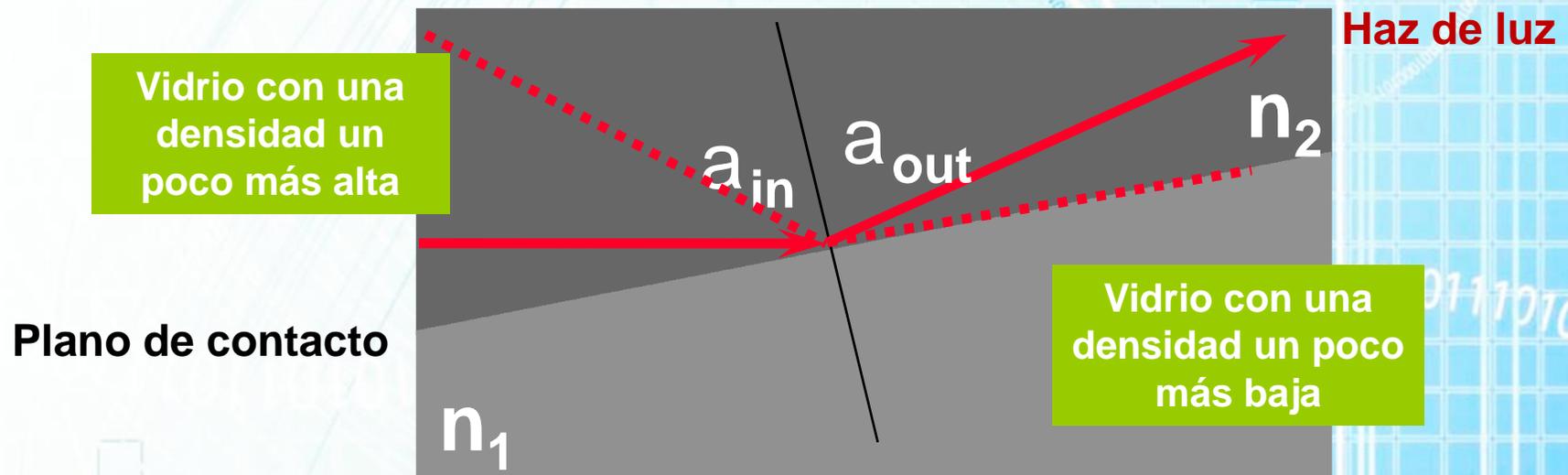


**Notas:**  $n_1 < n_2$  y  $a_2 = a_L$

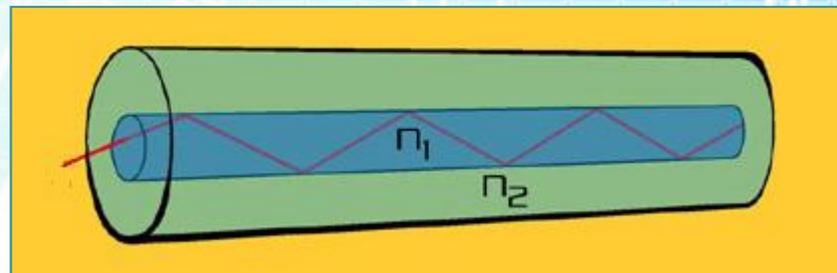
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Reflexión en dos medios

Ángulo luz incidente > ángulo crítico

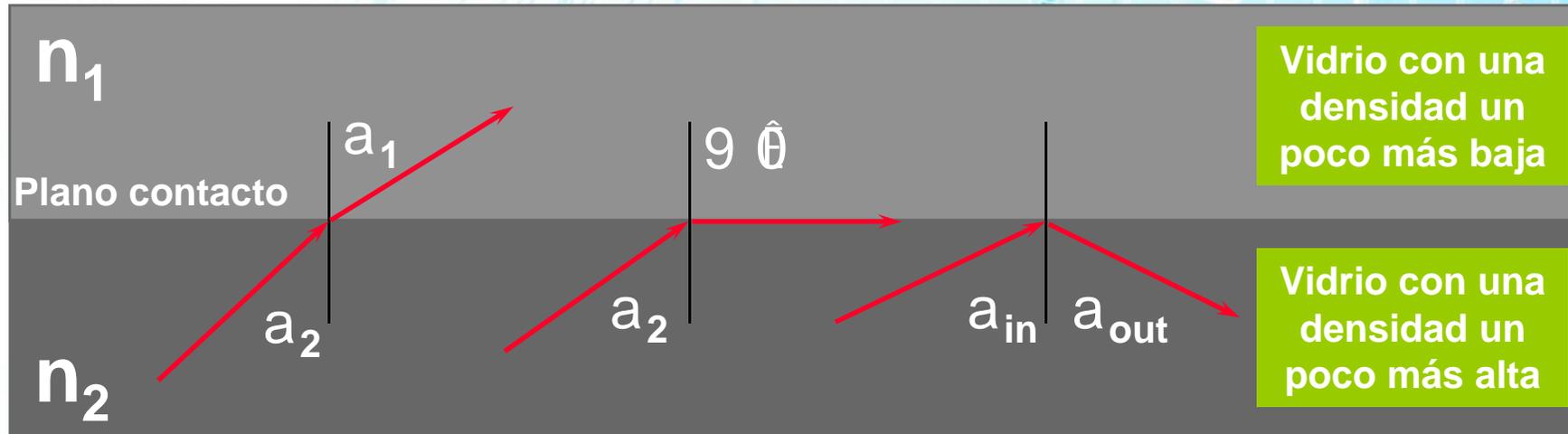


**Notas:**  $n_1 < n_2$  y  $a_{in} = a_{out}$

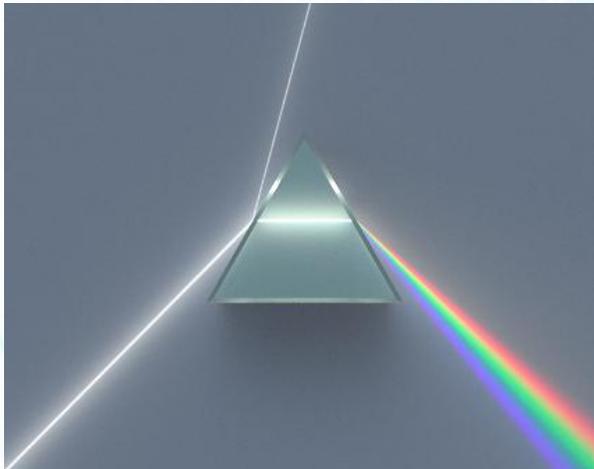


# Medios transmisión: Fibra óptica

## Resumen haz luz en dos medios

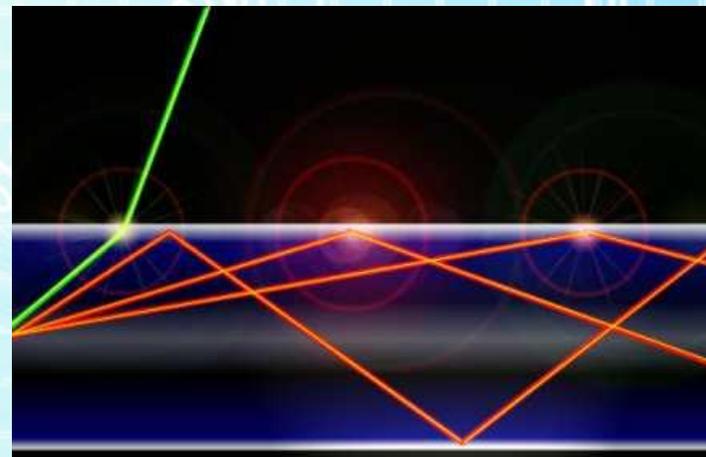


Refracción



Refracción total

Reflexión



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Apertura numérica (NA)

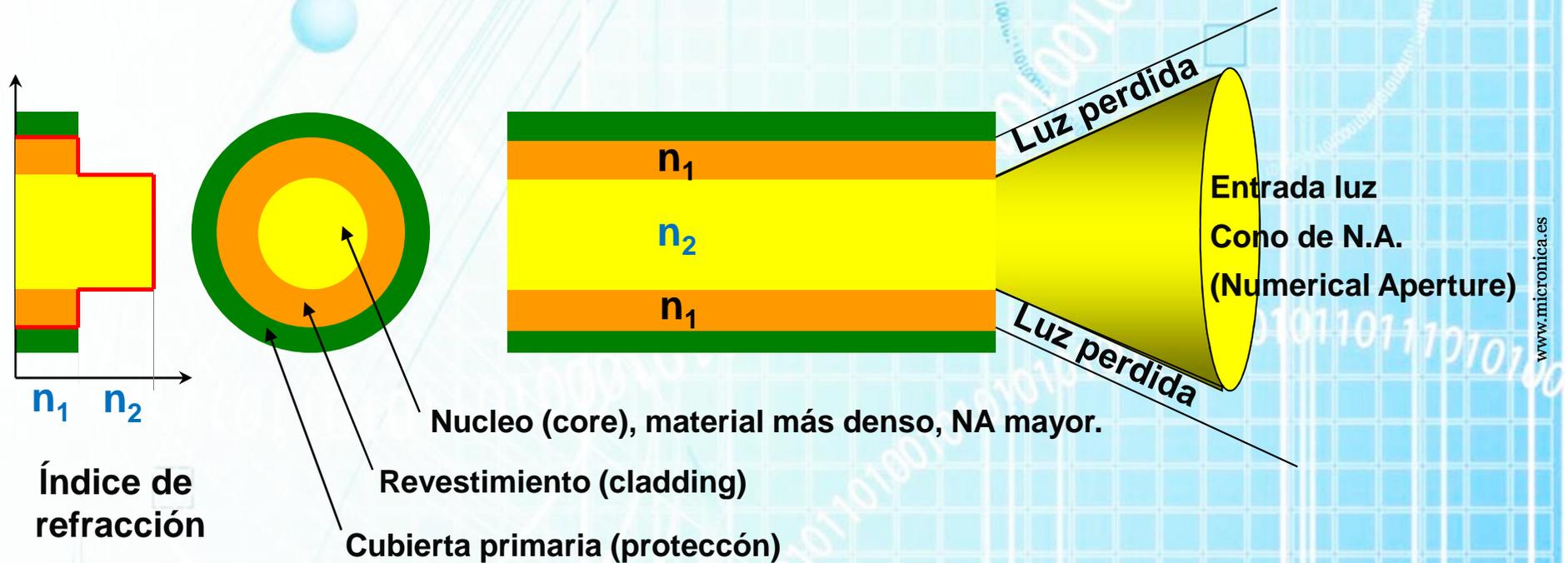


$$NA = \sqrt{(n_2^2 - n_1^2)} = \sin$$

Standard	= NA 0.5	30°
Bajo NA	= NA 0.3	17.5°

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Estructura de la fibra



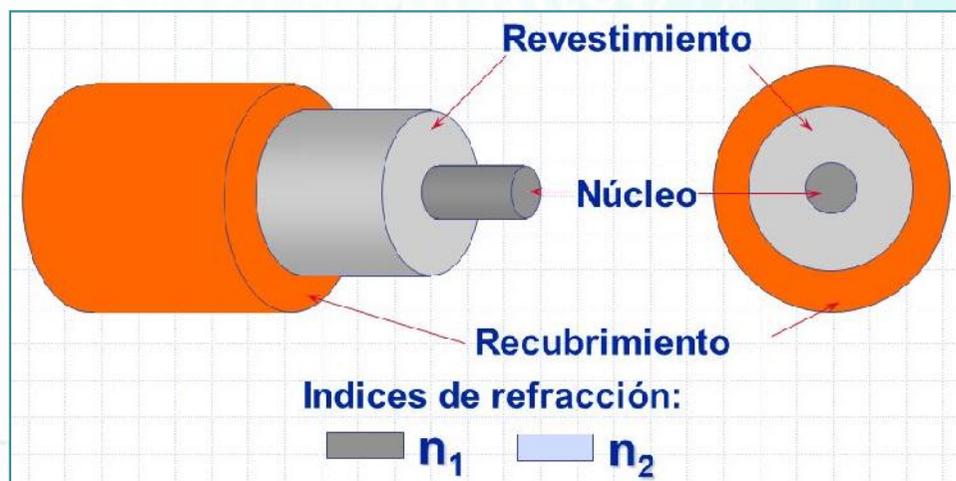
www.micronica.es

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Composición fibra: núcleo y revestimiento

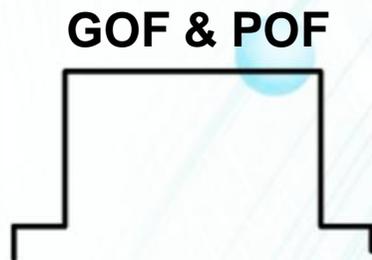
	Glass Optical Fiber (GOF)	Polymer Clad Fiber (PCF)	Polymer Optical Fiber (POF)
<b>Núcleo (Core)</b>	<i>Sílice</i>	<i>Sílice</i>	<i>Polímero</i>
<b>Revestimiento (cladding)</b>	<i>Sílice</i>	<i>Polímero</i>	<i>Polímero</i>

Si se usa el mismo material (sílice o polímero) en núcleo y revestimiento, uno de ellos debe ser modificado (dopado) para cambiar su índice de refracción.



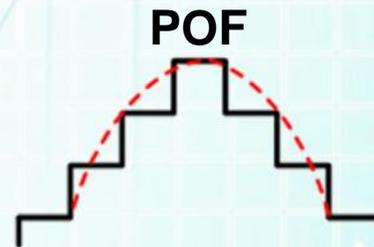
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Tipos de índices de refracción



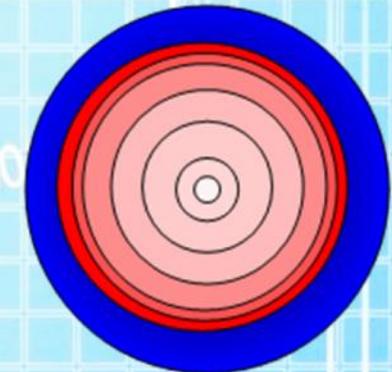
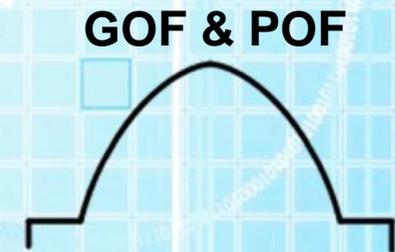
### Step Index (SI)

Core = Índice refracción escalonado



### Multistep Index (MSI)

Core = Varias capas de materiales con diferentes índices de refracción

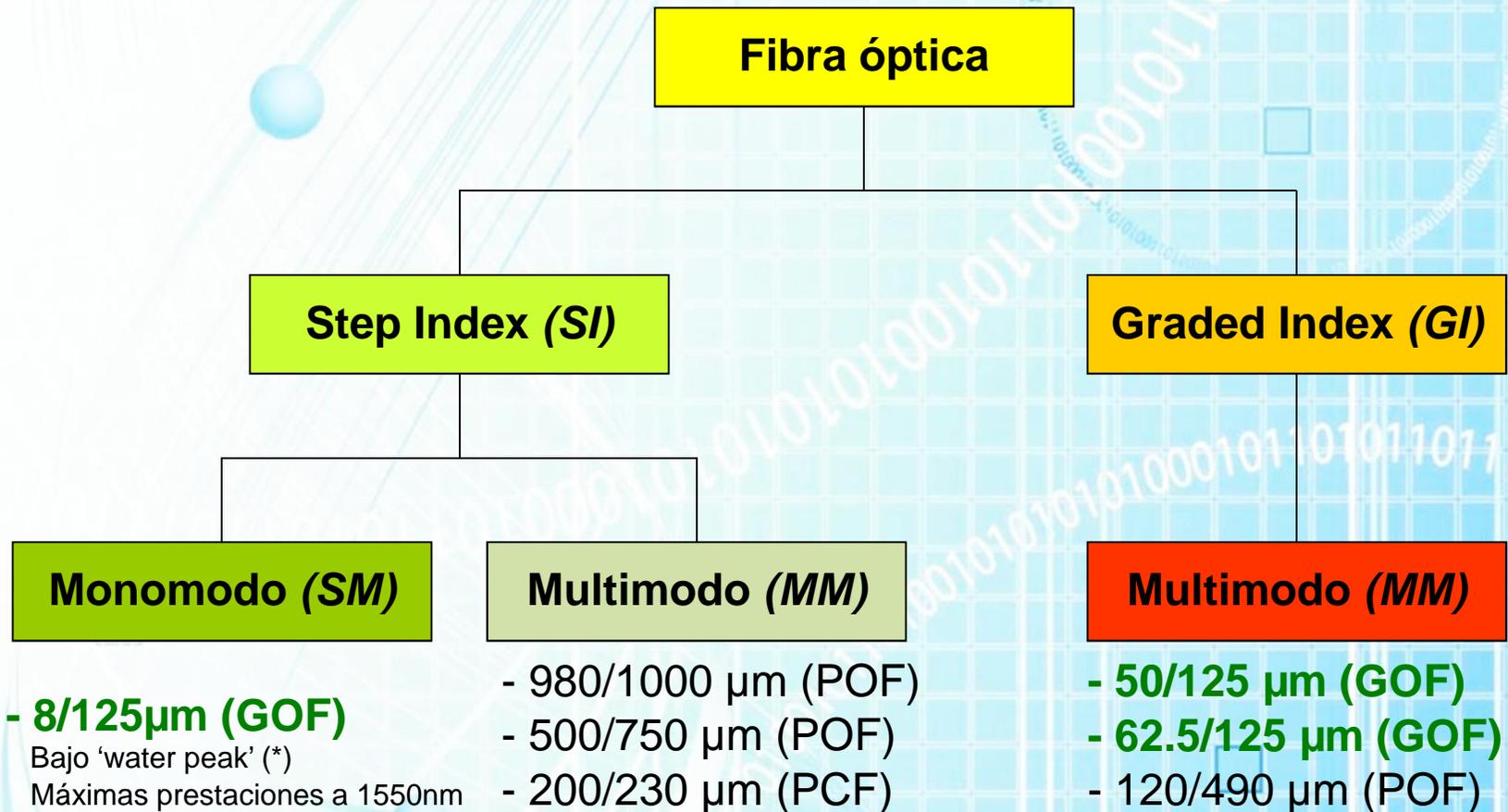


### Graded index (GI)

Core = Índice de refracción progresivo (parabólico)

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Tipos de fibras



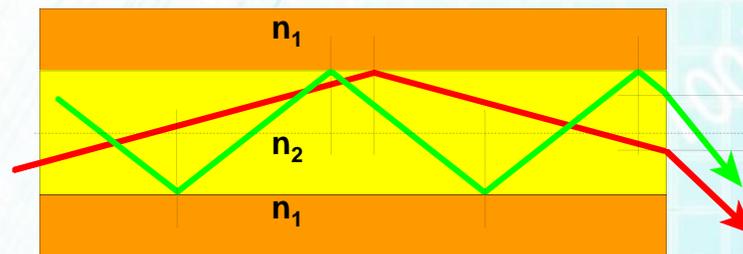
(\*) Atenuación en 1383 nm debida a absorción de iones OH en procedimiento de fabricación

# Medios transmisión: Fibra óptica

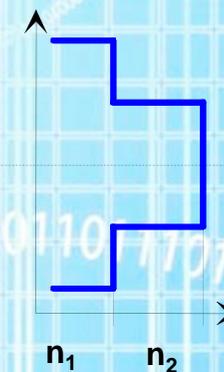
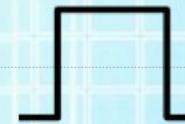
## Fibras multimodo (Step index)

Al tener el núcleo la misma densidad la misma luz recorre diferentes distancias y la información llega en diferentes momentos (desfase)

Entrada



Salida



www.micronica.es

Número de modos  $M = 0.5 \times (\pi \times d \times NA / \lambda)^2$

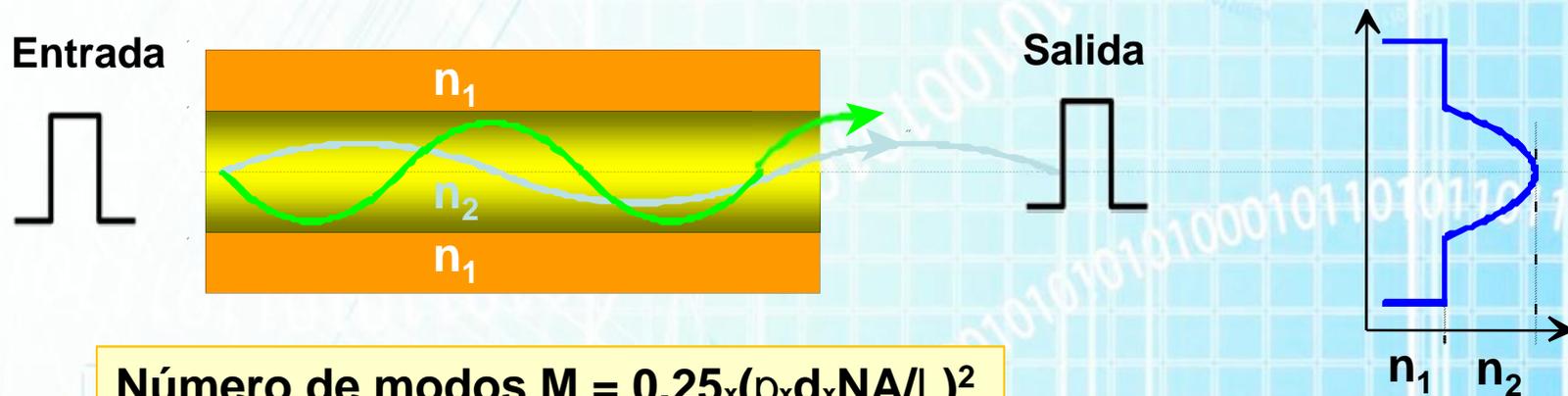
Tipo índice Refracción escalonado (Step index)

**Notas:** ~ 680 Modos con  $NA = 0.2$ ,  $d = 50 \text{ nm}$  &  $\lambda = 850 \text{ nm}$   
~ 292 Modos con  $NA = 0.2$ ,  $d = 50 \text{ nm}$  &  $\lambda = 1300 \text{ nm}$

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Fibras Multimodo (Graded Index)

Las diferencias graduales de densidad del núcleo provocan diferentes velocidades de propagación de la luz, siendo más rápida por el exterior, lo que provoca que la llegada de los haces de luz sea simultánea.



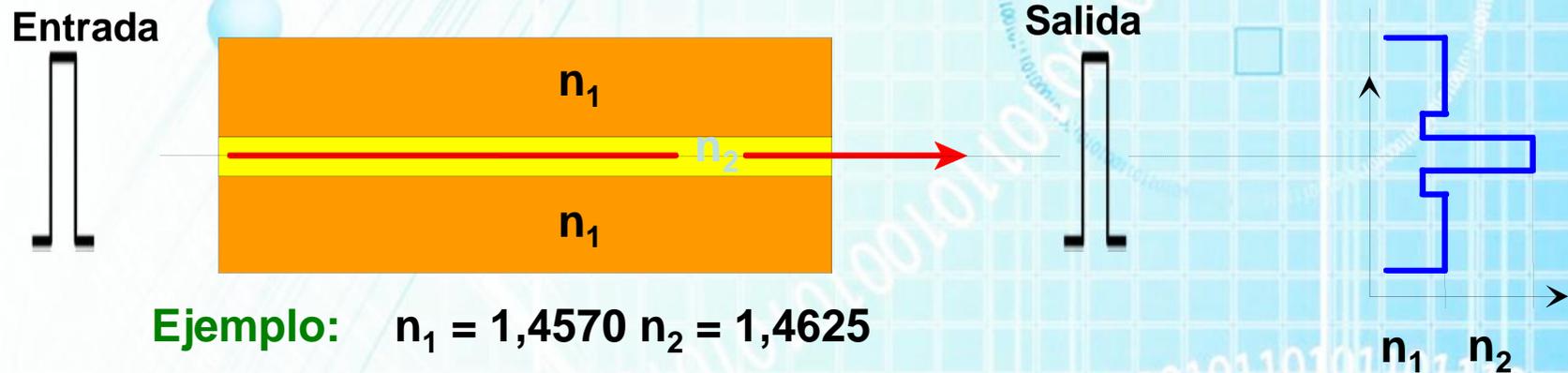
$$\text{Número de modos } M = 0.25 \times (\rho \times d \times NA / \lambda)^2$$

Tipo índice refracción gradual (Graded Index)

**Notas:** ~150 Modos con  $NA = 0.2$ ,  $d = 50 \text{ mm}$  &  $\lambda = 1300 \text{ nm}$

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Fibra monomodo (SM)



**Ejemplo:**  $n_1 = 1,4570$   $n_2 = 1,4625$

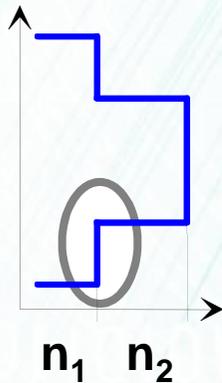
El tamaño reducido del núcleo no permite la existencia de muchos haces de luz reflejados y por lo tanto la dispersión por esta causa es muchísimo más reducida.

Tipo índice refracción escalonado (Step Index)

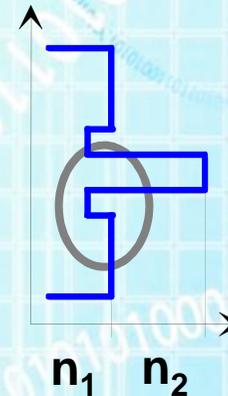
**Nota:** Un modo / haz de luz (2 polarizaciones)

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Tipos de refracción escalonado y acentuado (Step index y depressed step index)



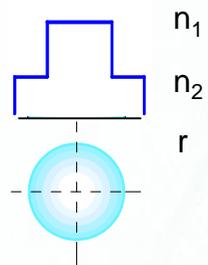
Revestimiento con índice de refracción escalonado (proceso OVD)



Revestimiento con dos índices de refracción independientes (proceso MCDV).  
Menos 'microbending'  
Rango de atenuación más bajo  
Dos puntos de dispersión cero

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Tipos de perfiles refractivos

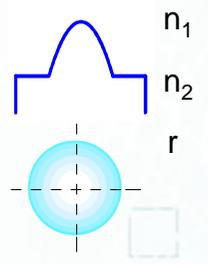


Señal entrada

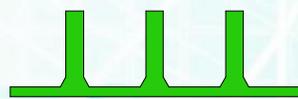
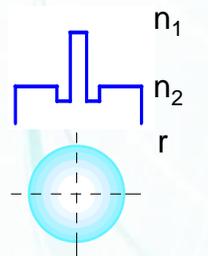


Step index

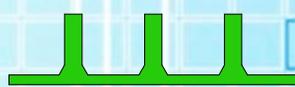
Señal salida



Graded index



Step index



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Características ópticas

	<b>Término</b>	<b>Efecto</b>	<b>Limita</b>
<b>1</b>	<b>Atenuación</b> [dB]	<b>Pérdidas de energía</b> en el enlace óptico	<b>Distancia de</b> transmisión
<b>2</b>	<b>Dispersión</b>	<b>Ensanche y</b> <b>debilitamiento</b> de la señal	<b>Ancho de banda señal</b> <b>y distancia</b> de transmisión
<b>3</b>	<b>Apertura</b> <b>Numérica (NA)</b> [-]	<b>Pérdidas acoplamiento</b> LED/Laser → fibra fibra → fibra fibra → p.e. APD	Capacidad de <b>acoplamiento</b>

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Apertura numérica (NA) y calidad de transmisión

- Un **NA elevado** implica un ***elevado ángulo de aceptación*** ( ).
- Un **NA elevado** implica más ***modos (camino)*** en la fibra.
- Más ***modos*** implican más ***dispersión de modo*** (ancho banda inferior)
- Un **NA elevado** implica ***menor atenuación por fibra doblada (bending)***

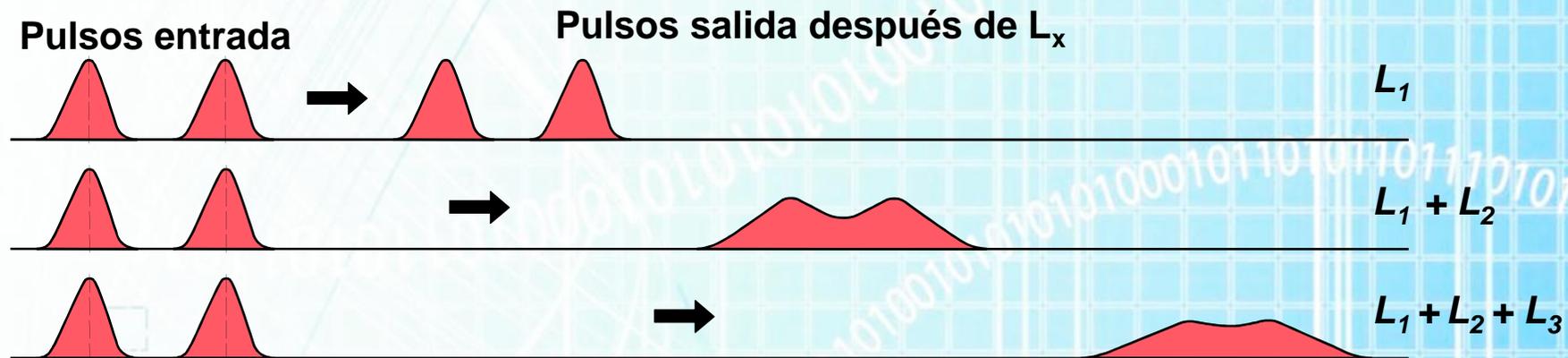
**Dos fibras con NA = 0.2 y 0.4**

Fibra con NA=0.2 tiene 8 veces más atenuación por dobleces que una con NA=0.4

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión (tiempo)

Los efectos de **dispersión** son todos los efectos que **afectan** considerablemente a **ensanchar y aplanar** los pulsos de luz.



La dispersión crece con la longitud de la fibra y con la velocidad de transmisión (bit rate).

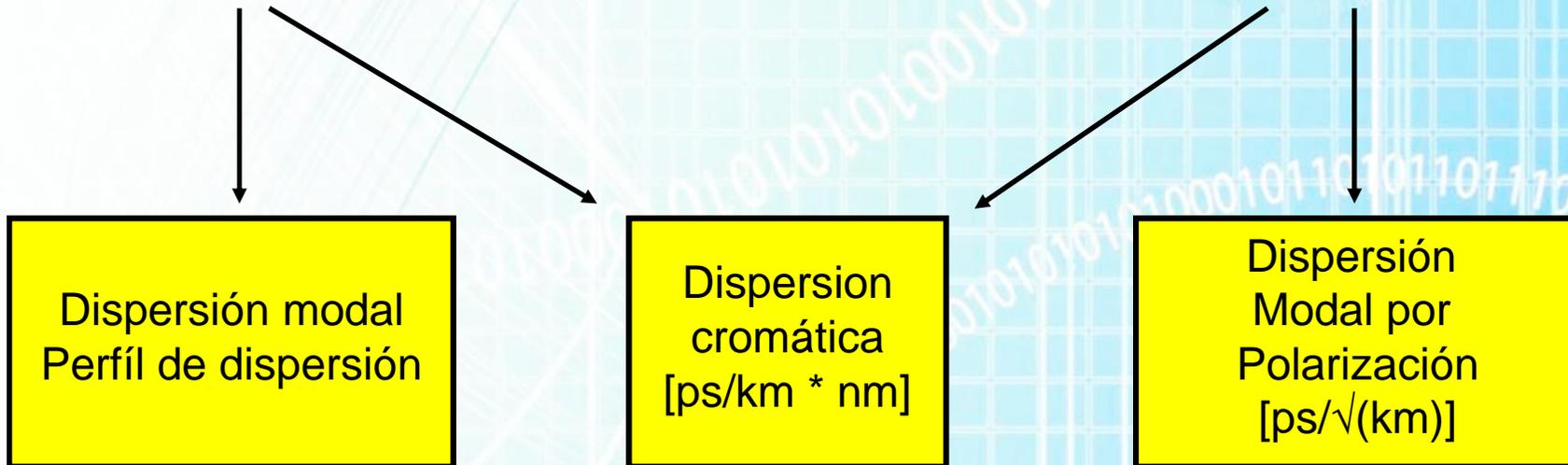
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión

Dispersión es el **ensanchamiento y solapamiento de los pulsos de luz** en una fibra optica debido a las **diferencias de retardo de tiempo**

Fibra Multimodo

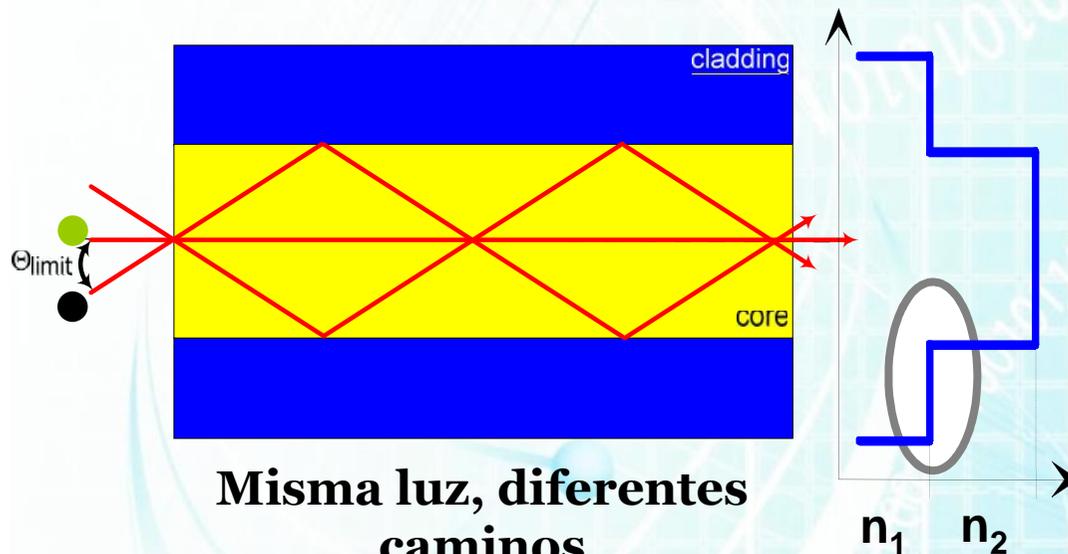
Fibra monomodo (SM)



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión por tipo SI

- **Step Index** (nucleo de índice de refracción escalonado)
- Diferentes “**modos**” (caminos) de luz en la fibra **provoca diferentes ‘tiempos’**
- Un **número inferior** de ‘modos/haces’ se propagan **por el eje de la fibra.**
- A más ‘**caminos**’ > **diferentes longitudes** > **tiempos datos distintos**



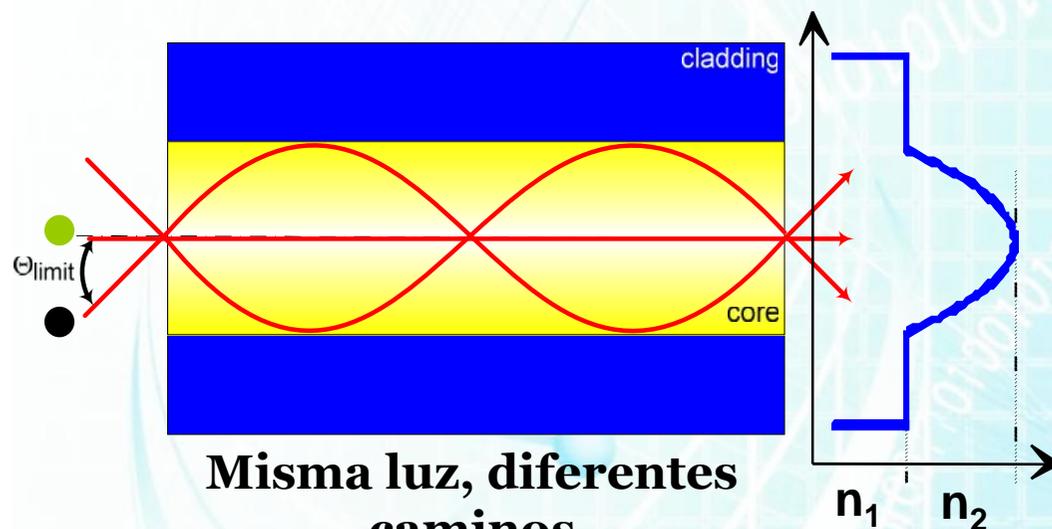
**Misma luz, diferentes caminos  
diferentes tiempos**

Fibra MM con perfil **step index** (SI)  
 $V$  = índice refracción escalonado  
**Retardos propagación elevados**  
**ancho de banda pequeño**  
p.e. PMMA SI-POF, DS-POF

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión por tipo GI

- **Graded Index** (núcleo con índice de refracción parabólico)
- La **velocidad de la luz** se hace **mayor en los márgenes del núcleo**
- Las **diferencias de tiempos** entre 'modos' (camino) **se minimiza.**



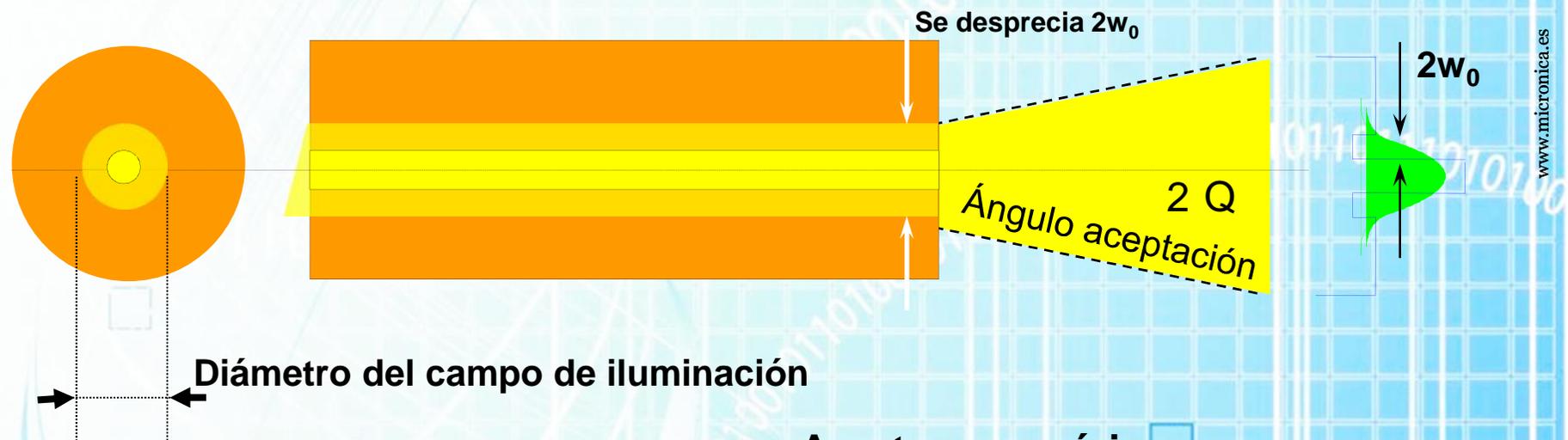
**Misma luz, diferentes caminos  
llegan a la vez**

Fibra MM con **graded index (GI)**  
 $V_2 > V_1$  índice parabólico  
“no” hay retardos de propagación ancho de banda mayor  
p.e. GI-GOF, GI-POF

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión en guiado de ondas

Esta dispersión (waveguide dispersion) se produce cuando **parte del haz de luz entra en el revestimiento**. Depende de la longitud de onda usada y del tamaño de la fibra.



**80% de luz en el núcleo**  
**20% de luz en revestimiento**

**Apertura numérica:**

$$NA = \sin \Theta = (n_2^2 - n_1^2)^{0.5} = \lambda / \pi w_0$$

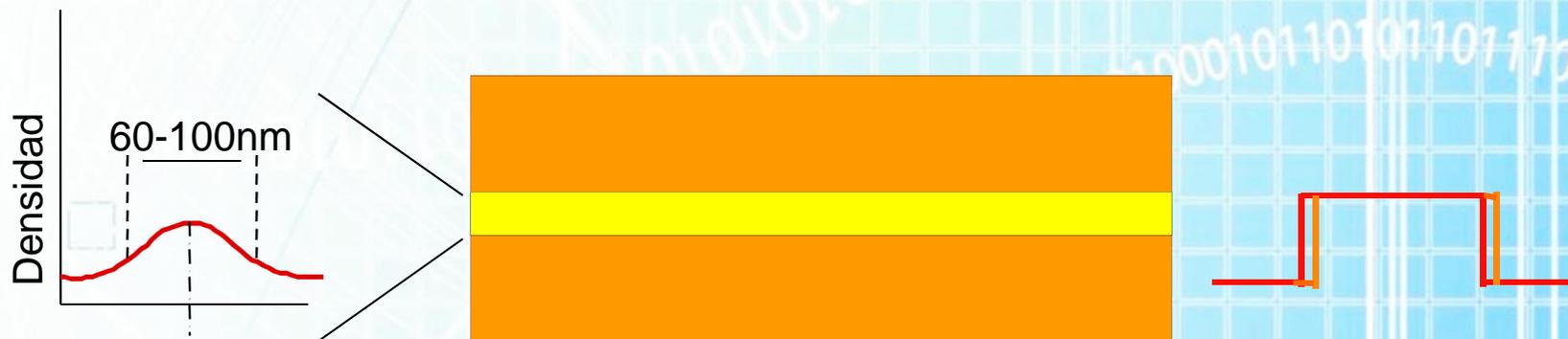
**Ejemplo:**  $NA = 0.17$  y  $\Theta = 9.8^\circ$

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión de material

Dado que la **fente de luz** tiene una **anchura de espectro** (diferentes longitudes de onda) y dado que **cada longitud de onda** tiene una **velocidad de propagación diferente** en un material homogéneo, los **pulsos de luz** se verán **'ensanchados'** por la **dispersión en el tiempo**.

Este efecto es **menor con láseres** al tener un **ancho de banda más reducido**.



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión cromática

### Dispersión cromática en fibra monomodo (SM)

Es la dispersión que domina en las fibras monomodo y es causada por los efectos dependientes de la **longitud de onda usada**.

La dispersión cromática es un **efecto acumulativo del material** y de la dispersión por **conducción del haz**

### Dispersión cromática en fibra Multimodo (MM)

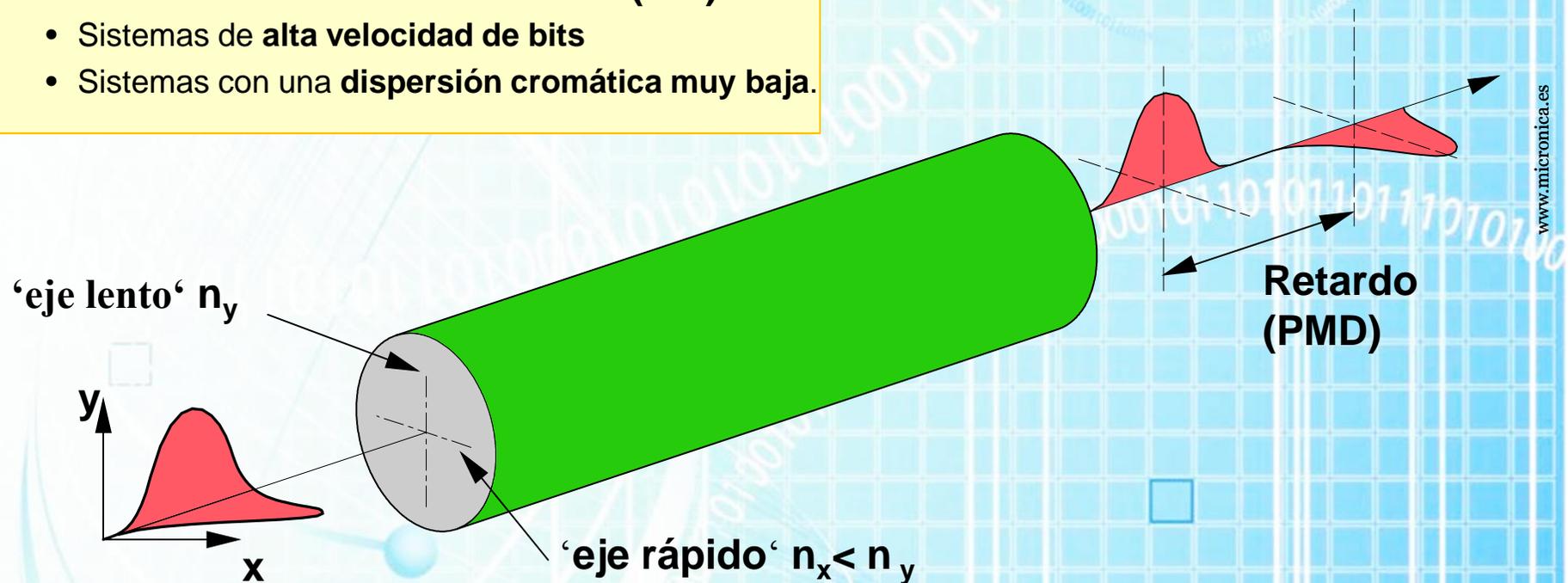
Como esta dispersión es **muy pequeña comparada con la dispersión por tipo de fibra**, puede **despreciarse**.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Dispersión por polarización de haz (Polarization Mode Dispersion - PMD)

### Ocurre en fibras monomodo (SM)

- Sistemas de **alta velocidad de bits**
- Sistemas con una **dispersión cromática muy baja.**



Un haz en fibra monomodo (SM) tiene dos polarizaciones a  $90^\circ$

# Medios transmisión: Fibra óptica

Producto ancho de banda / distancia  
(Bandwidth-distance product)

El ancho de banda describe el rango de frecuencia que se puede usar en un canal.

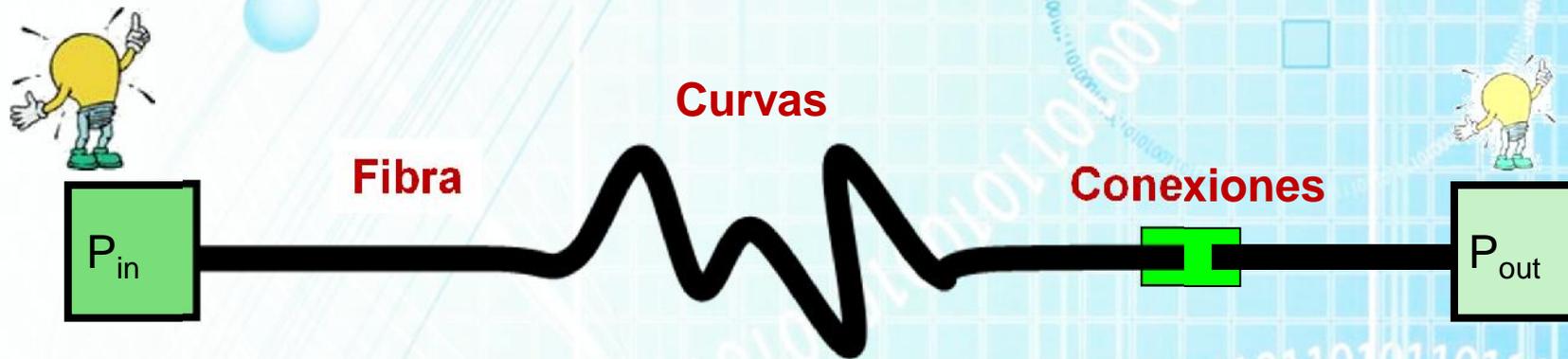
El ancho de banda posible también depende de la distancia por el 'ensanchamiento' de la señal (dispersión)

- El ensanchamiento de pulso **limita el ancho de banda  $B$**  y la **máxima tasa de transmisión ( $Mbps$ )**.
- El **ensanchamiento de pulso es proporcional a la longitud de la fibra  $L$** .
- ***No se puede garantizar Ancho de Banda ( $Gbps$ ) a cualquier distancia ( $Kms$ )***

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Atenuación

Atenuación es la **pérdida de energía** óptica debido a:



La atenuación se mide en decibelios (dB) y es acumulativa

**Fibra:** Por **características y calidades** de la fibra

**Conexiones:** Las **conexiones** siempre tienen **pérdidas**.

✓ Por **características** de fibra (intrínsecas).

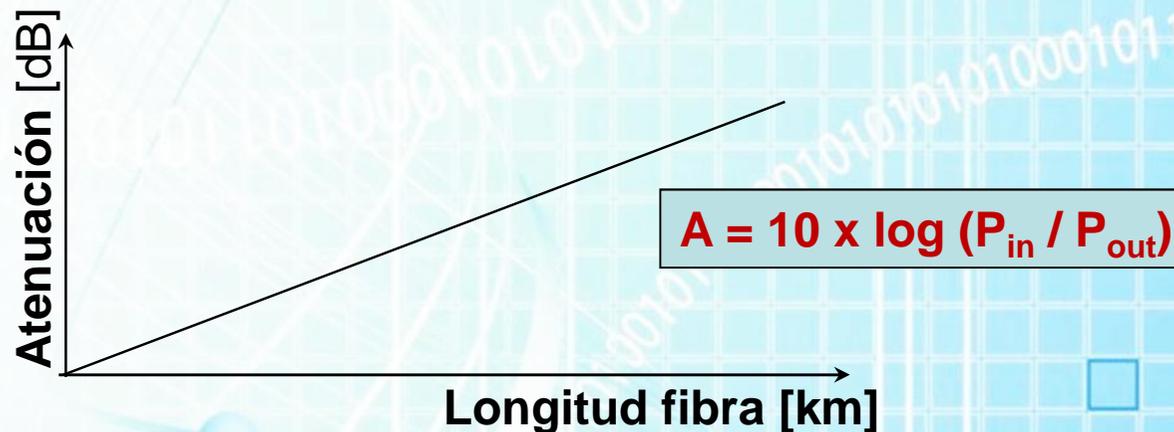
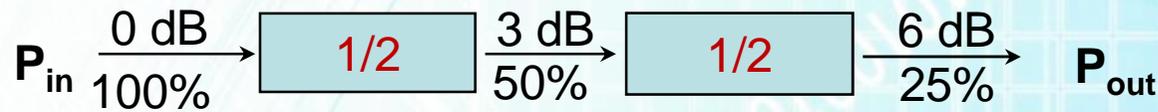
✓ Por **manipulación** del instalador (extrínsecas o externas).

**Curvas:** Las **curvas** en la fibra **alteran** su funcionamiento.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Decibelios

En las fibras ópticas la **atenuación o pérdidas** se producen por la **longitud de la fibra, por giros, conexiones** y por la longitud de onda empleada.



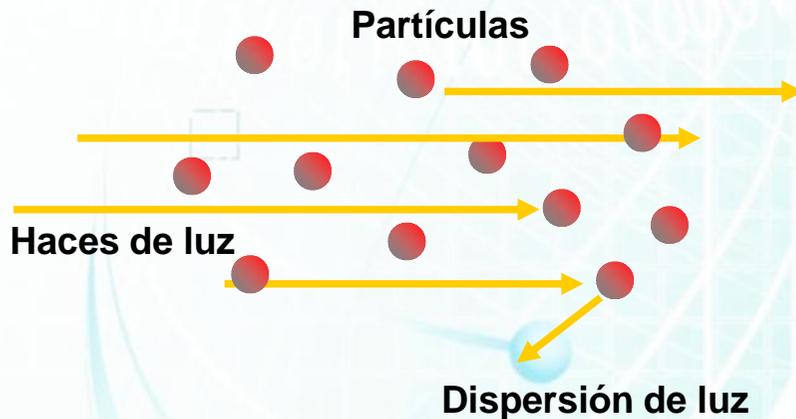
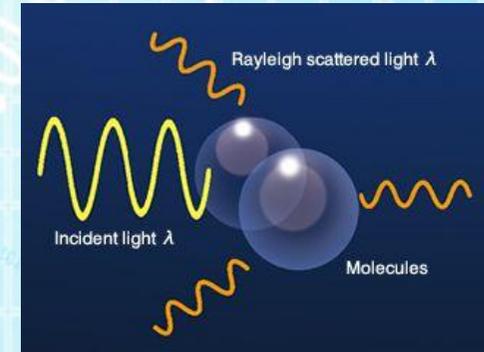
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Atenuación en fibra

### Absorción del material: 3 a 5% de atenuación

(el instalador no influye, es por fabricación)

- Impurezas en el proceso de dopado.
- Resúduos de OH (water peak).
- Absorción de energía y transformación en calor y vibración
- Mayor a longitudes de onda más cortas.



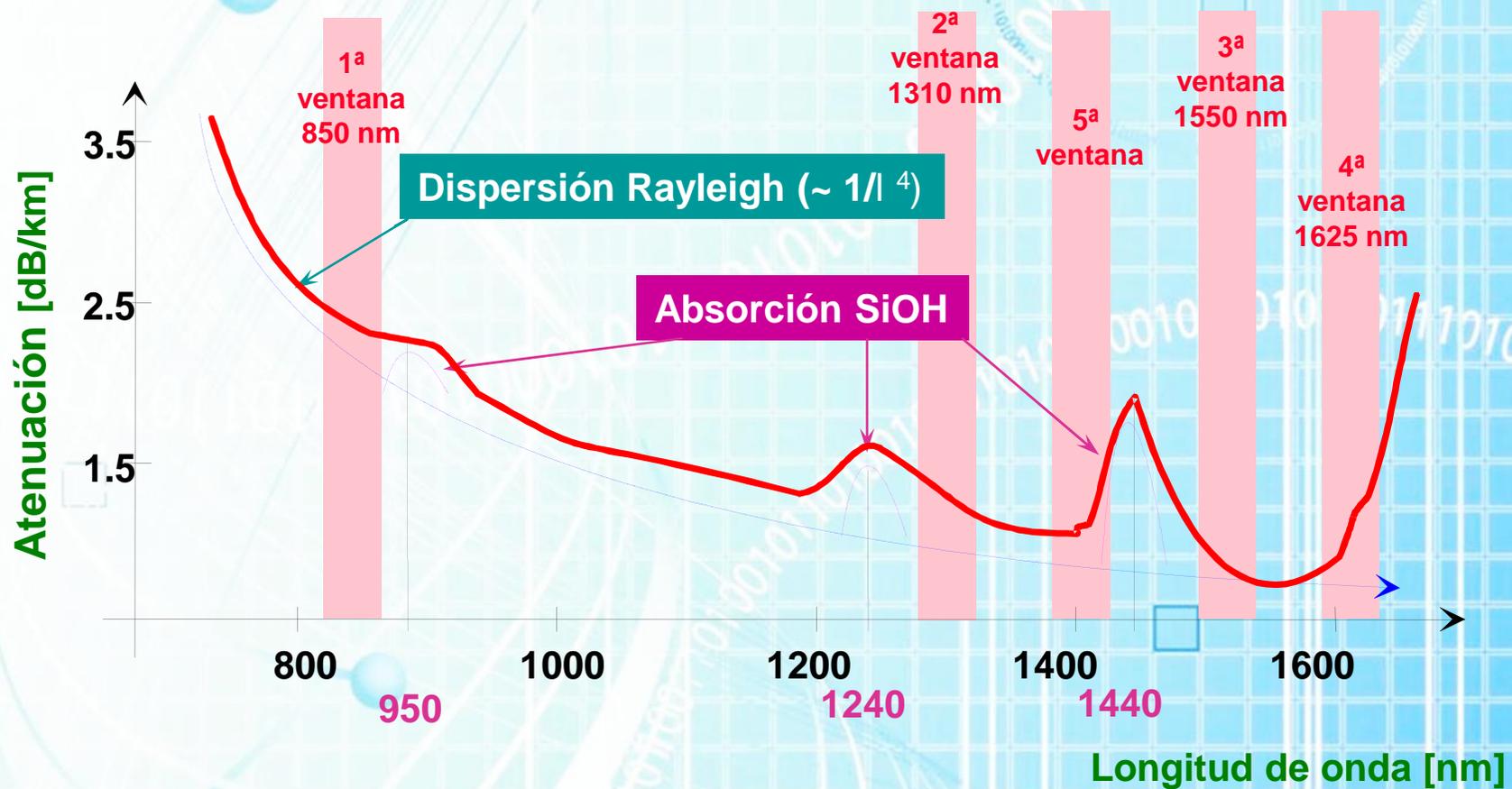
### Dispersión de Rayleigh (96% de atenuación)

(el instalador no influye, es por fabricación)

- Impurezas del vidrio
- Reflejos de luz en otra dirección
- Depende del tamaño de las partículas.
- Depende de la longitud de onda usada

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Espectro atenuación GOF (Glass Optic Fiber)

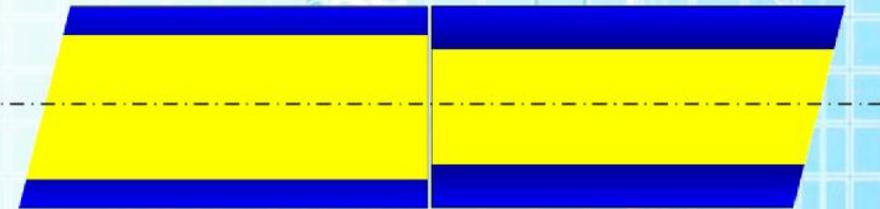


# Medios transmisión: Fibra óptica

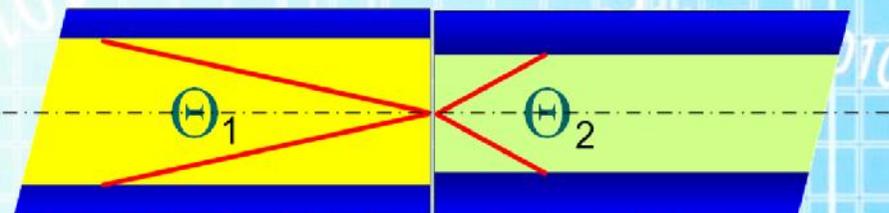
## Atenuación en conexiones

Pérdidas de inserción – por características internas fibra

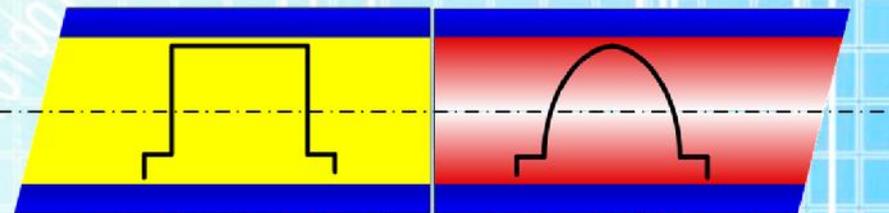
**Diferencias diámetro núcleo**



**Diferencias apertura numérica (NA)**



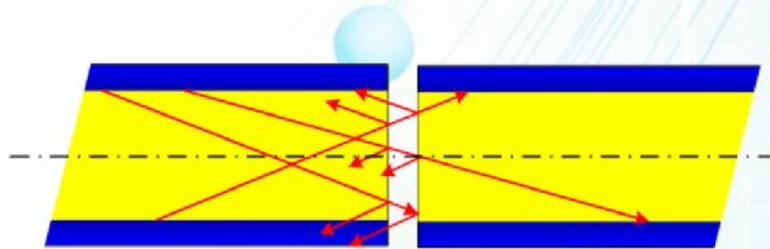
**Diferencias tipo difracción**



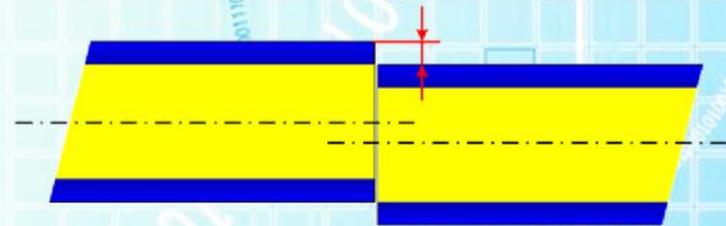
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Atenuación en conexiones

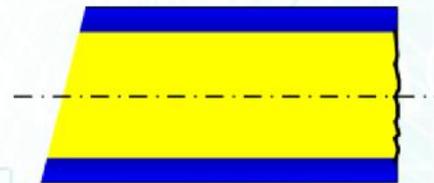
Pérdidas de inserción – causas externas (instalador)



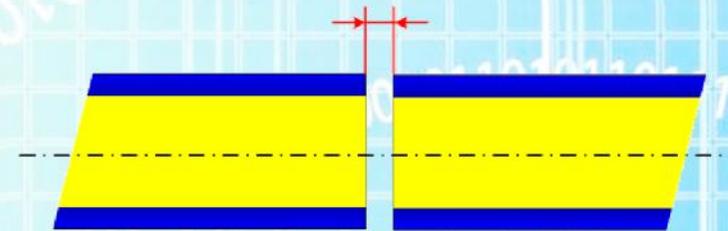
**Reflexión fresnel**



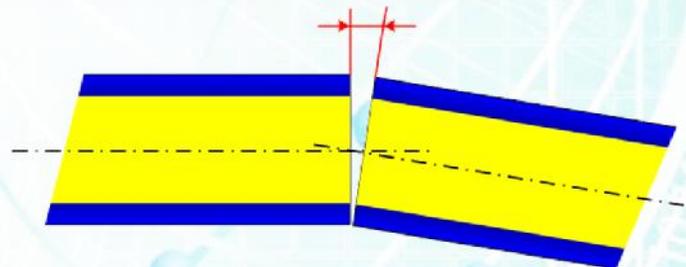
**Desplazamiento lateral**



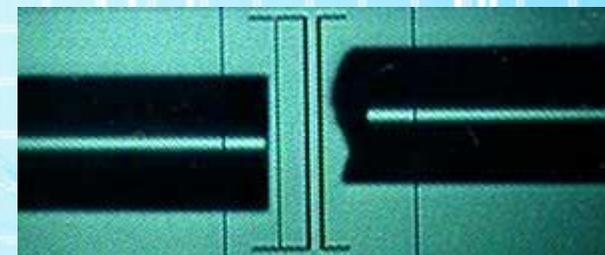
**Irregularidades superficie**



**Separación**



**Inclinación eje**

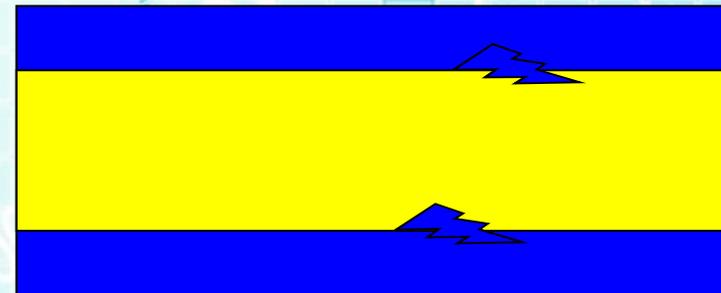


# Medios transmisión: Fibra óptica

## Atenuación por giro (bending)

### Micro-bending (el instalador no lo causa)

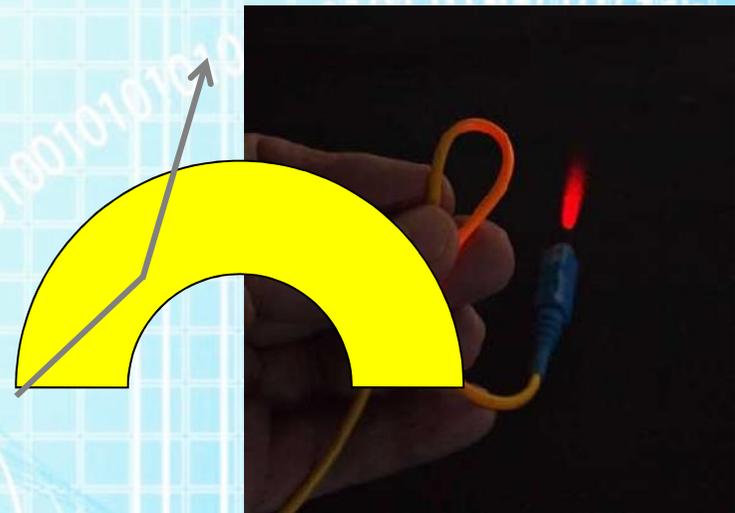
Imperfecciones en el proceso de fabricación en la zona de contacto núcleo/revestimiento.



### Macro-bending (proceso de instalación)

Se excede el radio de giro y hay pérdidas.

Este efecto no solo incrementa la atenuación, también acorta la vida de la fibra (micro cracks – micro roturas)



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Resumen

### Las comunicaciones usando fibra óptica están influidas por:

- **Atenuación**
  - Según características de la fibra.
  - Según la instalación y terminales.
- **Dispersión**
  - Según características de la fibra.
- **Efectos no lineales**
  - Dependiente de las tecnologías de transmisión usadas.

La **optimización de la transmisión** se consigue **minimizando estos factores** dentro de **nuestras posibilidades**, sobre todo en la **elección de la fibra, elementos de conexión** y en casos más especializados, los **equipos que generan y reciben** la señal óptica.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## De luz a transmisión de bits

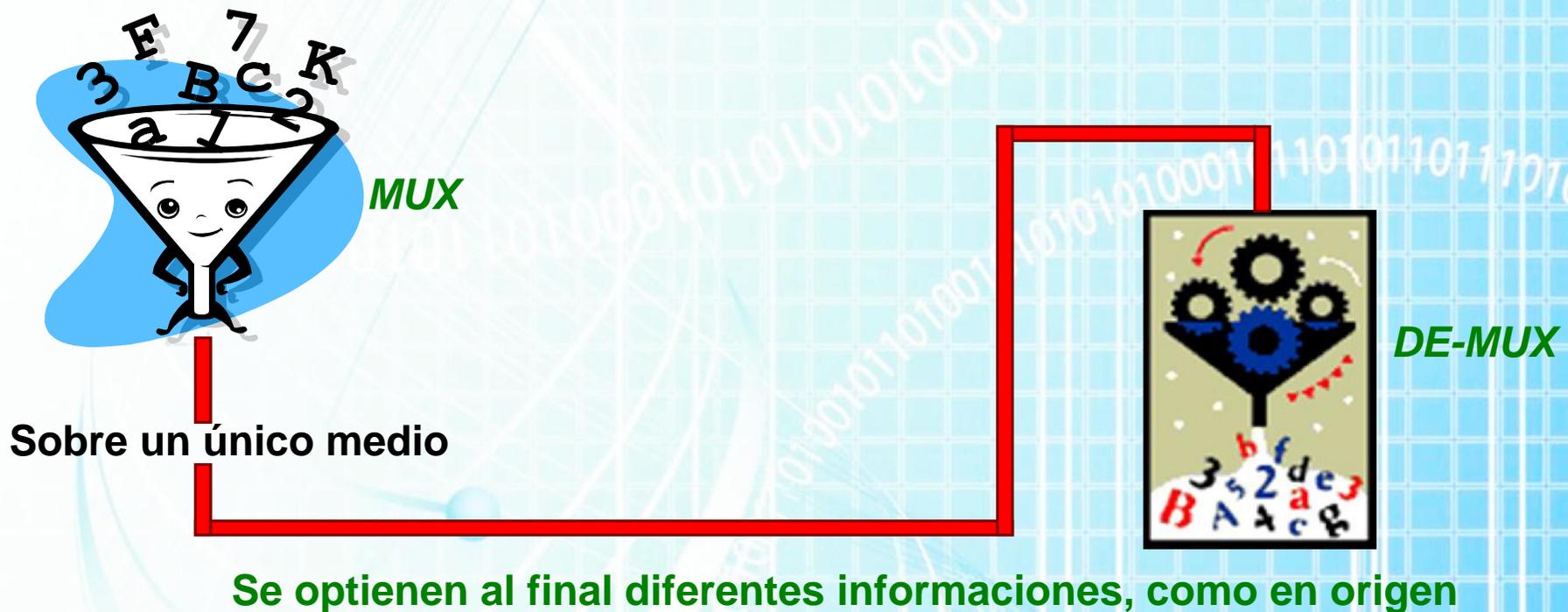
- **La velocidad de datos es fundamental**
  - ✓ Si no hay calidad de bits la velocidad no servirá de mucho.
- **Para mejorar el rendimiento del medio usado es importante mejorar el medio en si mismo (calidad fibra).**
- **A efectos de transmisión hay dos aspectos importantes**
  - ✓ **Hueco de tiempo** en el medio (slot) que se asigna a **cada transmisor**.
  - ✓ **Frecuencia del transmisor** (señal portadora).

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Multiplexar señales

**Multiplexar señales** consiste en aprovechar un **medio único** para incluir en él informaciones de orígenes diferentes, **enviarlas** y luego poder **recuperarlas** de nuevo **por separado**.

La **optimización** del medio se realiza con una operación llamada multiplexación (**MUX**) y la **separación** mediante la **demultiplexación (DE-MUX)**



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Multiplexación

Las señales eléctricas se multiplexan usando sus características físicas

**T**iempo **D**ivision **M**ultiplexing (TDM) – Asignación de tiempo

**F**recuencia **D**ivision **M**ultiplexing (FDM) – Diferentes frecuencias

En F.O. **FDM** se denomina **W**ave **D**ivision **M**ultiplexing (WDM)



Menos de 8 portadoras ( $< 8$ ) =

Coarse Wave Division Multiplexing

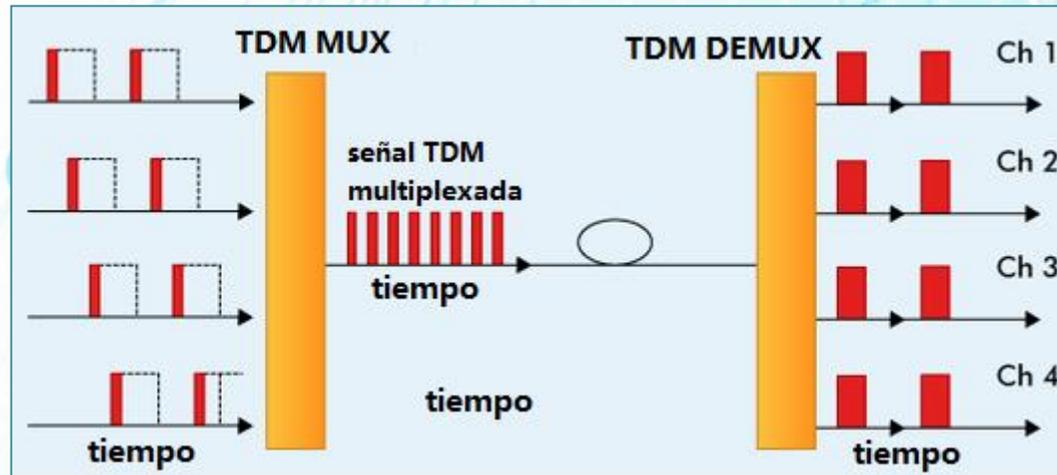
Más de 8 portadoras ( $> 8$ ) =

Dense Wave Division Multiplexing

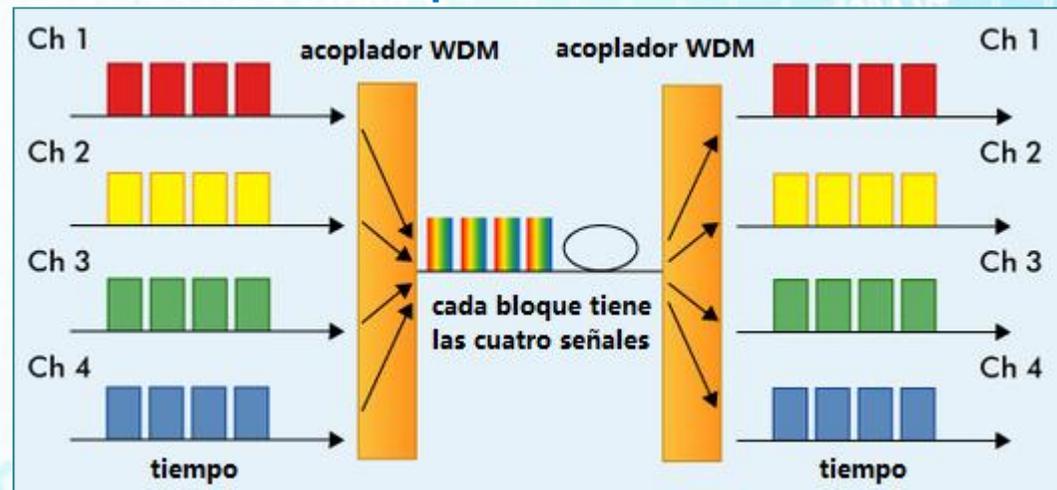
Cada señal de **diferente frecuencia se denominará** , haciendo referencia a '**lambda**' , es decir a su **longitud de onda**. Por eso diremos que una fibra transporta  $n$  (lambdas)

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Concepto de TDM



## Concepto de WDM



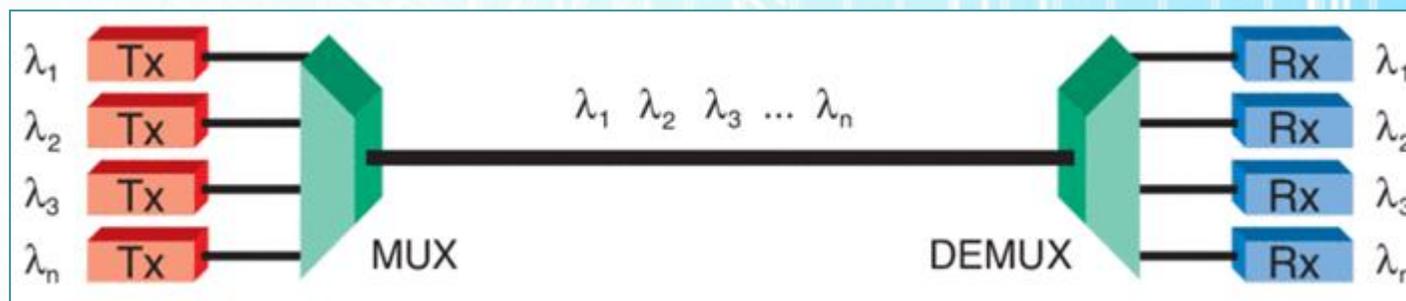
# Medios transmisión: Fibra óptica

## Concepto de WDM y DWDM (Dense WDM)

La **capacidad de una fibra** se incrementa **umentando el número de señales de longitud de onda diferente (color / lambda)** que incluimos, cada una de estas señales es capaz de llevar información diferente y de forma simultánea.

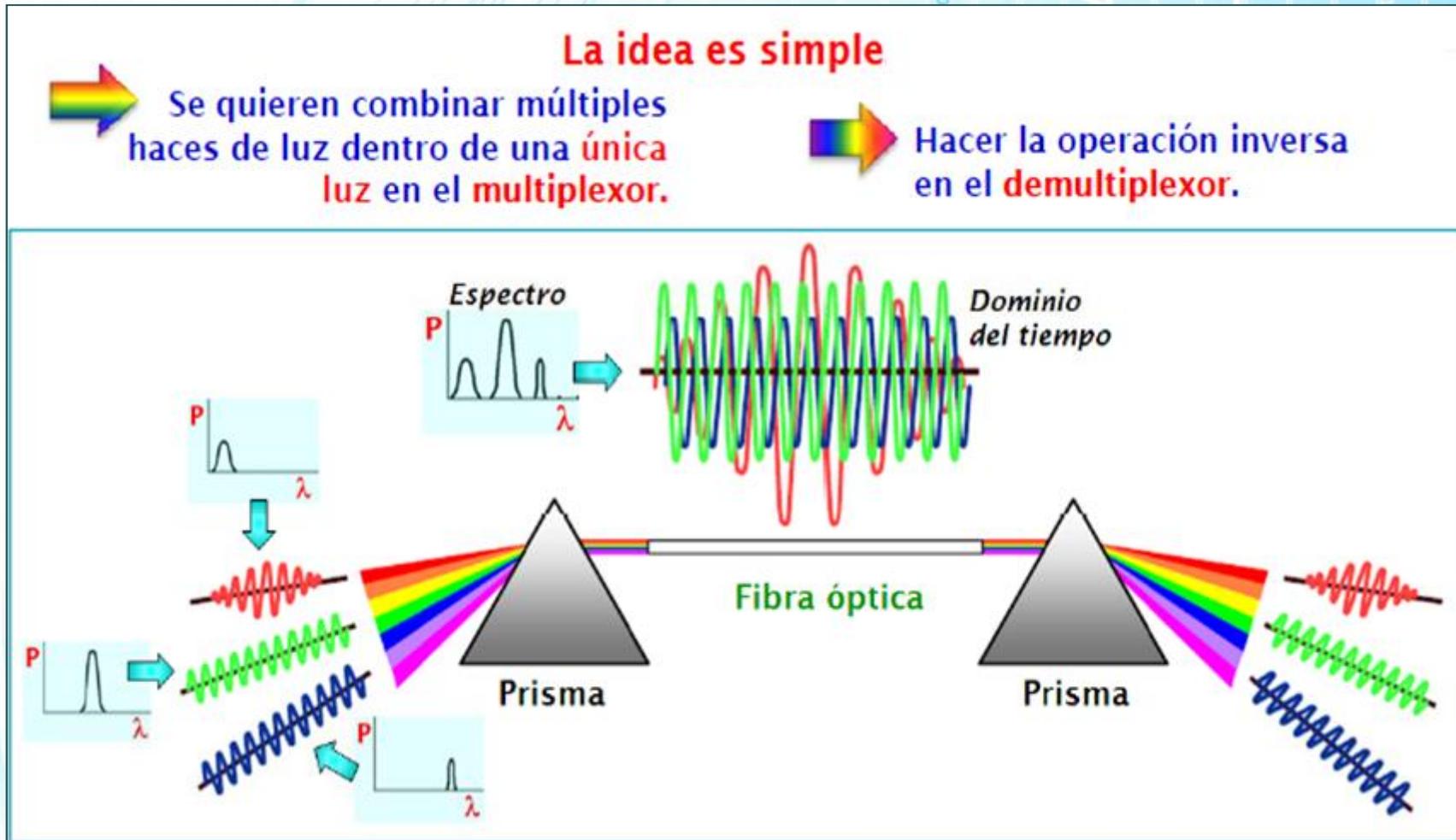
**DWDM agrupa canales de forma 'densa'**, con espaciamiento pequeño. Todavía no se ha alcanzado un máximo número de longitudes de onda en una fibra monocanal.

Actualmente se trabaja con tecnologías capaces de agrupar **256 lambdas de 10 Gbps**, permitiendo **2,56 Terabits** de velocidad en **una sola fibra**.



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Transmisión de datos con WDM



# Medios transmisión: Fibra óptica

## Transmisión de datos usando WDM

En **WDM** existe la posibilidad de trabajar en **dos direcciones en la misma fibra (transmisión bidireccional)**, lo cual amplía las posibilidades en su uso.

Existe la denominación **CWDM** (Coarse WDM) para cuando la fibra lleva **pocos canales** y ya se usa la denominación **UWDM** (Ultradense WDM) para indicarnos el uso de una **gran cantidad de canales**.

Estos '**canales**', **se están asignando con estándares** y se definen con su **ancho de banda y longitud de onda correspondiente** aunque no forma parte de este tema.

Las **ventajas** de este sistema son obvias

- ✓ Menor consumo energético.
- ✓ Soluciona los problemas de cuellos de botella aumentando la capacidad de una fibra.
- ✓ Hardware y costo operativo más barato referente a otras tecnologías de la misma familia.
- ✓ Anchos de banda más elevados.
- ✓ Es más sencillo referente al diseño de la red, implementación y operación.
- ✓ Mayor facilidad de instalación, configuración y mantenimiento de la red.
- ✓ Alto grado de flexibilidad y seguridad en la creación de redes ópticas metropolitanas.

# Medios transmisión: Fibra óptica

## Referencias y bibliografía

 **Reichle & De-Massari**

  
EXPERTISE REACHING OUT

  
www.internet2.edu

 **Optical Access**

  
The Conversion Technology Experts

### Videos

<https://www.youtube.com/watch?v=6xDIUGsyvBs>  
<https://www.youtube.com/watch?v=oOKCqnv4-mo>  
<https://www.youtube.com/watch?v=XcF1oW4yas8>  
<https://www.youtube.com/watch?v=kLDQLkiPfZQ>  
<https://www.youtube.com/watch?v=94Vg3pzjHNU>

### Wikipedia

[https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_%C3%B3ptica](https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_%C3%B3ptica)

### Textos

**Fundamentos y Tecnología de las Comunicaciones por Fibra Óptica**

José A. Pamies Guerrero y Pablo Luis López Espí

**Fibra òptica**

Antoni Mas

**Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas**

Jardón y Linares