



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es



# “Dispositivos y Medios de Transmisión Óptica”

M5: Enlaces en Comunicaciones Ópticas

Autor: Carmen Vázquez García

Revisado: José Manuel Sánchez Pena

Colaborador: Pedro Contreras

Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF)

Dpto. de Tecnología Electrónica

Universidad CARLOS III de Madrid



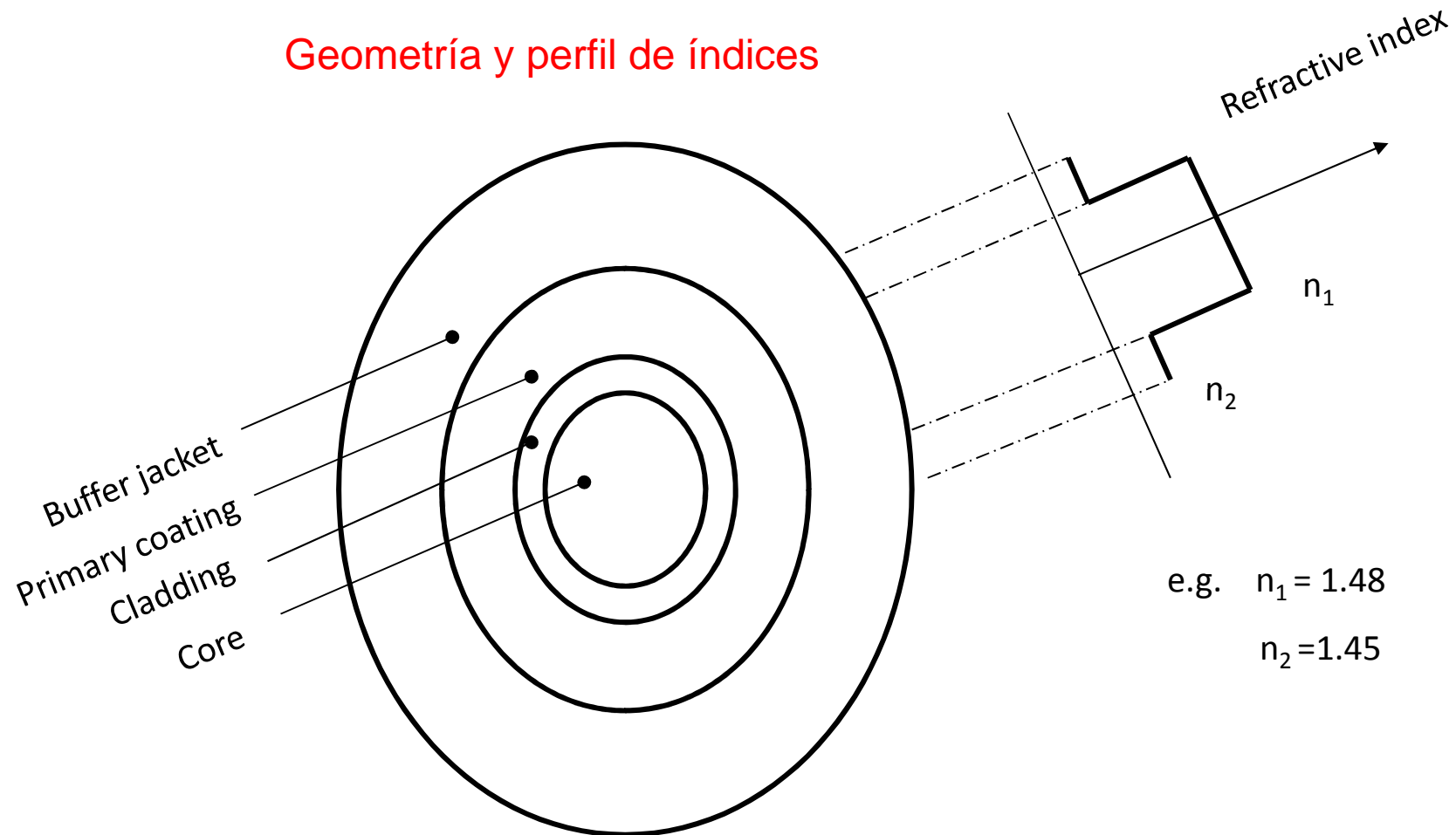


# Índice (clases y ejercicios)

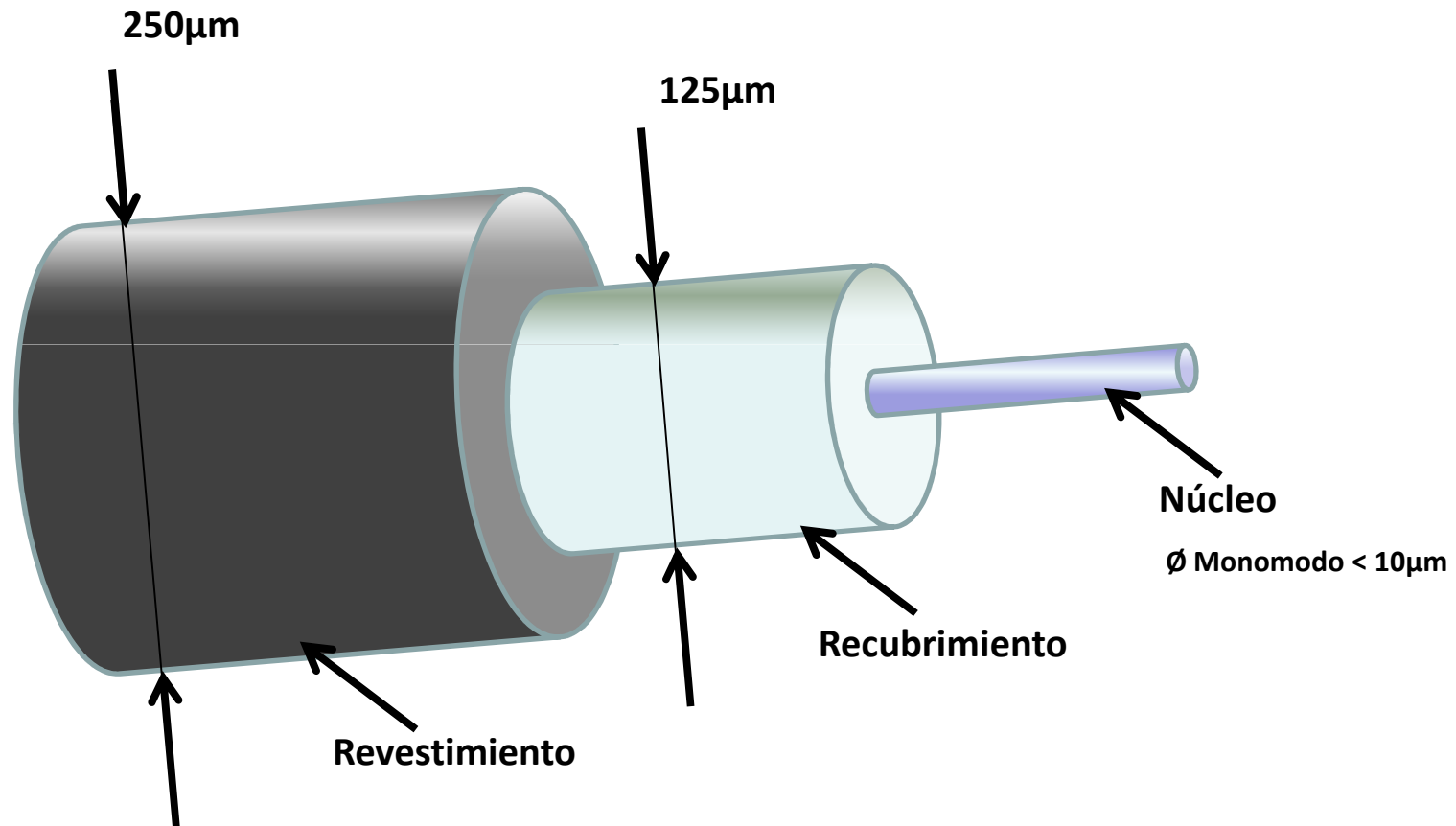
- M1. Emisores
- M2. Propagación en fibras ópticas
  - Introducción
  - Atenuación
  - Dispersión y ensanchamiento del pulso
- M3. Receptores.
- M4. Componentes pasivos, amplificadores ópticos y otros dispositivos en redes DWDM.
- **M5. Enlaces en comunicaciones ópticas**
  - Cables, uniones
  - Balance de potencia y balance de tiempos
- M6. Técnicas de multiplexación

# M5. Enlaces: Cables con FO. Elementos

## Geometría y perfil de índices

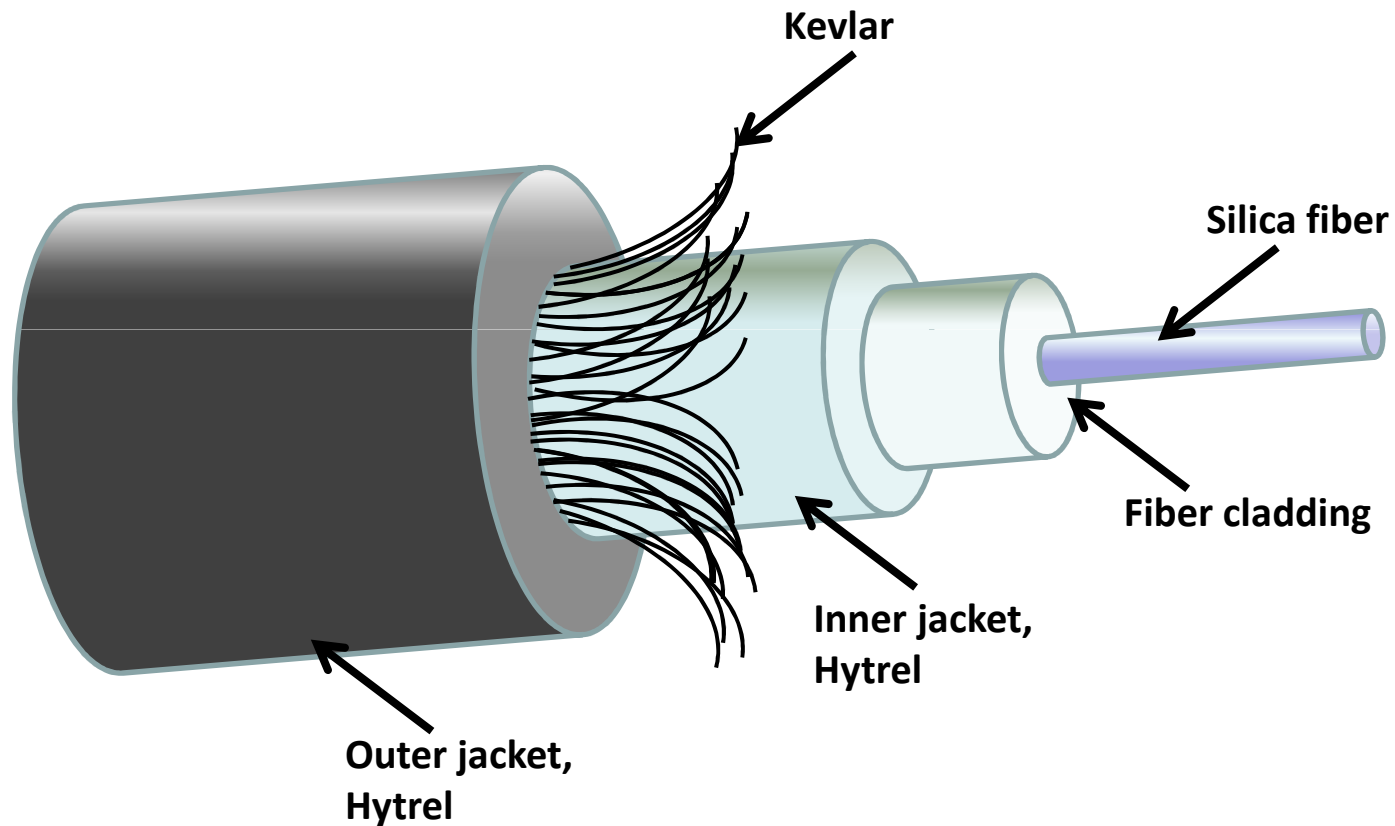


# M5. Cables. Estructura física



# M5. Cables con FO. Elementos

## Estructura de un cable comercial típico





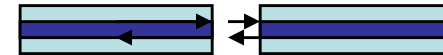
# M5. Empalmes, conectores y acopladores

- Unión permanente o semipermanente entre dos fibras: **EMPALME**
- Unión desmontable: **CONECTOR**

“En ambos casos llevan asociadas pérdidas interesa minimizar”.

- **¿Causa pérdidas?**

- ☞ **Pérdidas de Fresnel:** presentes interface dos medios distinto índice de refracción, si incidencia normal:  $R^{1/2} = (n_1 - n) / (n_1 + n)$ . R, fracción de luz reflejada por la superficie  $\Rightarrow$  Pérdidas  $_{Fresnel} = -10 \log_{10}(P_s/P_e) = -10 \log_{10}(1-R)$ .  
Ej:  $n_1=1.5, n=1; R=0.04 \Rightarrow 0.18 \text{ dB} \times 2 = 0.36 \text{ dB}$ .



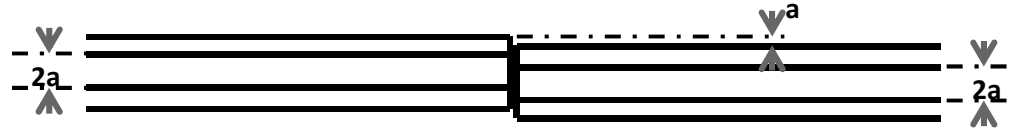
**Sol: líquido adaptador de índices (index matching). Eliminar “gap” aire.**

- ☞ **Desajustes en el alineamiento entre fibras:**

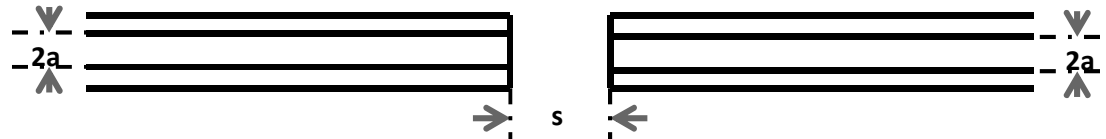
1. Fibras distintas: diferentes diámetros de núcleo o cubierta, AN ó  $\Delta$ , perfiles n, defectos fibras (elipticidad)
2. Offset lateral
3. Separación entre FO
4. Desajuste angular

# M5. Empalmes, conectores y acopladores

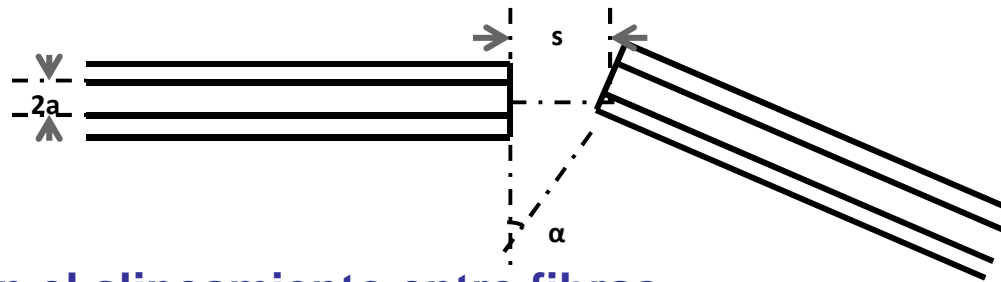
Offset:



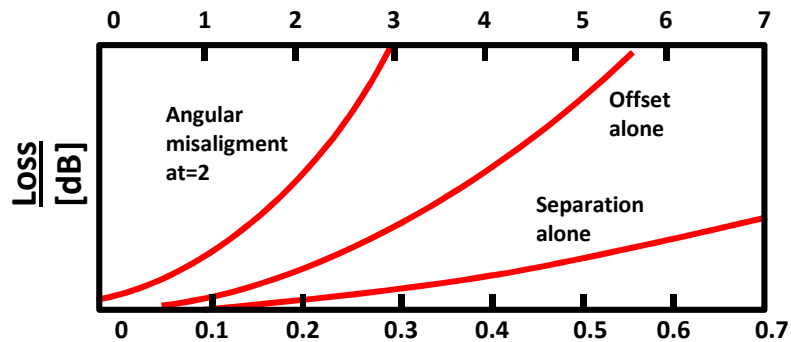
Separation:



Angular misalignment:



Desajustes en el alineamiento entre fibras



$$\frac{d}{a} \text{ or } \frac{a}{a_m} \quad \text{Where } \sin \alpha_m = NA = (n_o^2 - n_c^2)^{1/2}$$



## M5. Empalmes

### ■ EMPALME; “SPLICES”

¿Cuándo son necesarias?: instalación, mantenimiento (deterioro cables), montajes pruebas laboratorio.

### ■ ¿De qué formas se pueden llevar a cabo?

📄 **Automática:** A través de una descarga eléctrica se fusionan las FO, necesidad una maquinaria especial. Pérdidas < 0.1 dB, caperuza protección.

📄 **Manual:** Líquido adherente adaptador de índices. 0.2dB, reflejada<-40dB.

**Fundamentales: corte, pulido, limpieza en todos los casos**





# M5. Conectores

## ■ CONECTORES; “CONNECTORS”

¿Cuándo son necesarias?: **conectar fibras ETL, fibra a fibra.**

Frente a los empalmes deben:

- permitir un **alineamiento entre las fibras reproducible en las sucesivas conexiones**  $\Rightarrow$  mayor complejidad,
- terminales fibras **se deben proteger** para evitar el posible daño durante su manejo,
- **bajo coste, fácil manejo.**

## ■ ¿Tipos?

- 📄 **Butt jointed connectors:** Fibras muy próximas entre sí (*butt*)  $\Rightarrow$  ejes fibras coinciden.
- 📄 **Expanded beam connector:** Uso óptica (p.e. lentes), expanden haz para focalizarlo fibra receptora.



## M5. Conectores

### ■ “BUTT JOINTED *CONNECTORS*”

¿Elementos?:

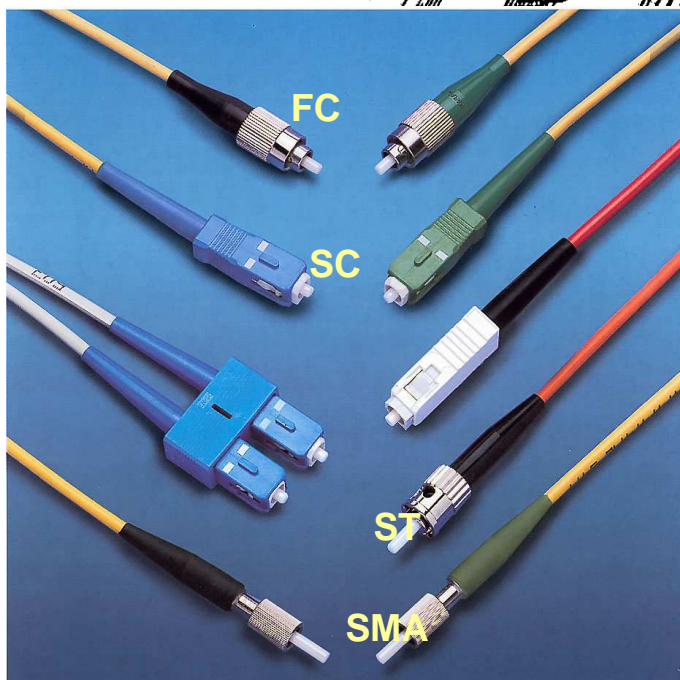
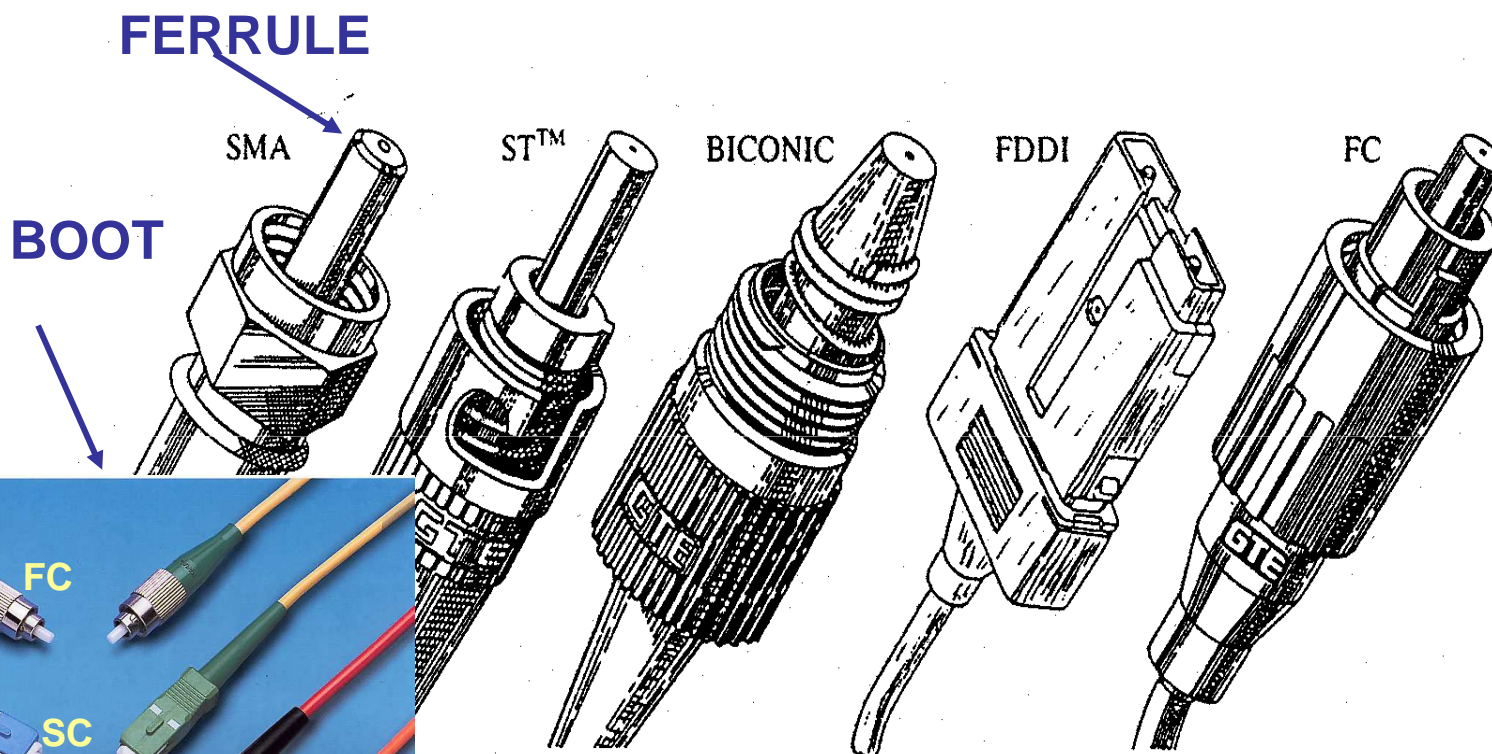
- Fibras pegadas forma permanente a un adaptador (hierro o cerámico): **FERRULE**, con un agujero central se ubica fibra pelada. “*BOOT*”: elemento goma cobre cable evitar tensiones laterales. Cubierta cilíndrica que permite el alineamiento.

. ¿Tipos comerciales más comunes?. PÉRDIDAS: 3dB (conservador)

<i>Tipo</i>	<i>ST</i>	<i>SMA</i>	<i>FC</i>	<i>PC</i>	<i>SC</i>	<i>HP</i>
<b><i>Nombre</i></b>	Straight tip	Subminiature Assembly	Fiber Connector	Physical Contact	Subscriber connector	Hewlett-Packard
<b><i>Fibra</i></b>	MM	MM	MM SM			Plástico
<b><i>Pérdidas</i></b>	0.5 dB	1	<0.5dB	APC: Angled, 0.2		≤ 3
<b><i>Caract.</i></b>	No rosca, 1/4 vuelta	Rosca, no contacto	Contacto p rosca	reflexiones mínimas	Plástico, snap-in	Plástico, Click-fit



# M5. Tipos Conectores

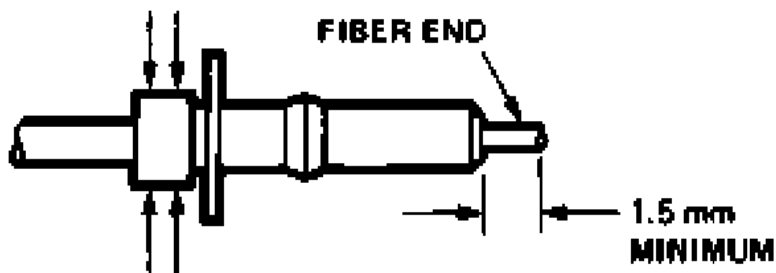


## M5. Conectores

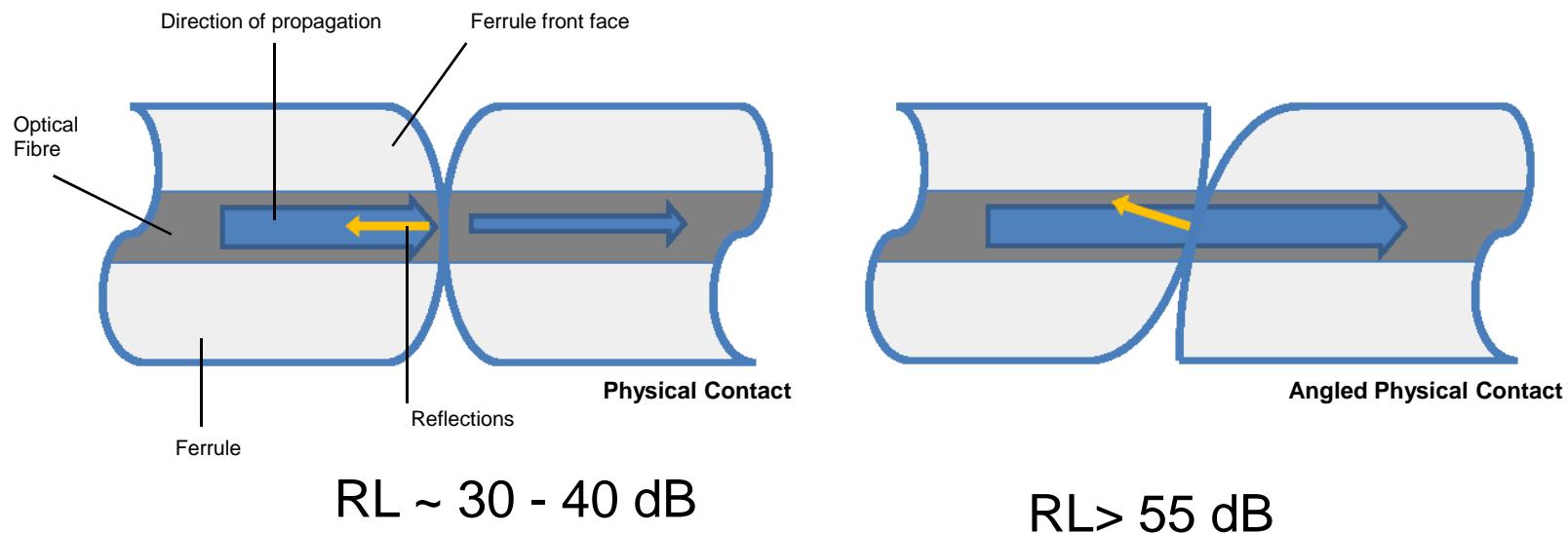


*Foto del latiguillo VF45 a VF45*

- Facilitar manejo FOP. Coste.
- Fotografía conectorización con 1.5dB (típicas)



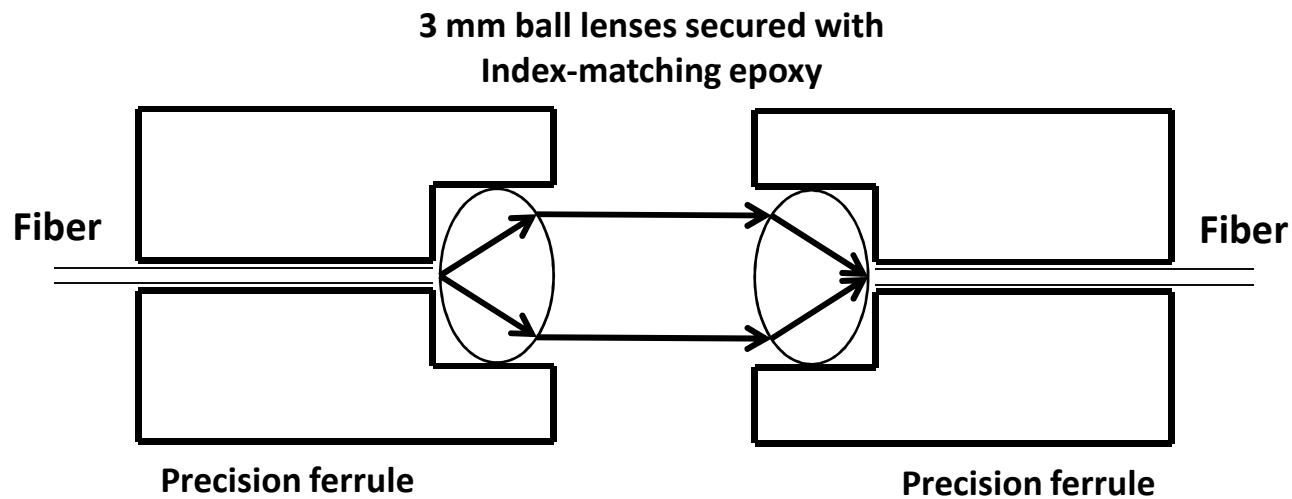
## M5. Conectores. Evitar reflexiones



Terminación **PC** (Physical Contact) y **APC** (Angled Physical Contact)  
Conectores FC/PC, FC/APC

# M5. Conectores

- Conectores expanden haz.



0.7 dB

Reduce tolerancia angular, aumenta mismo orden tolerancia offset lateral.

**Lentes GRIN.**



# M5. Acopladores conectores

## Couplers. (conector fibra-fibra)

- **¿Función?**

Conectar 2 conectores entre sí

- **Clasificación:**

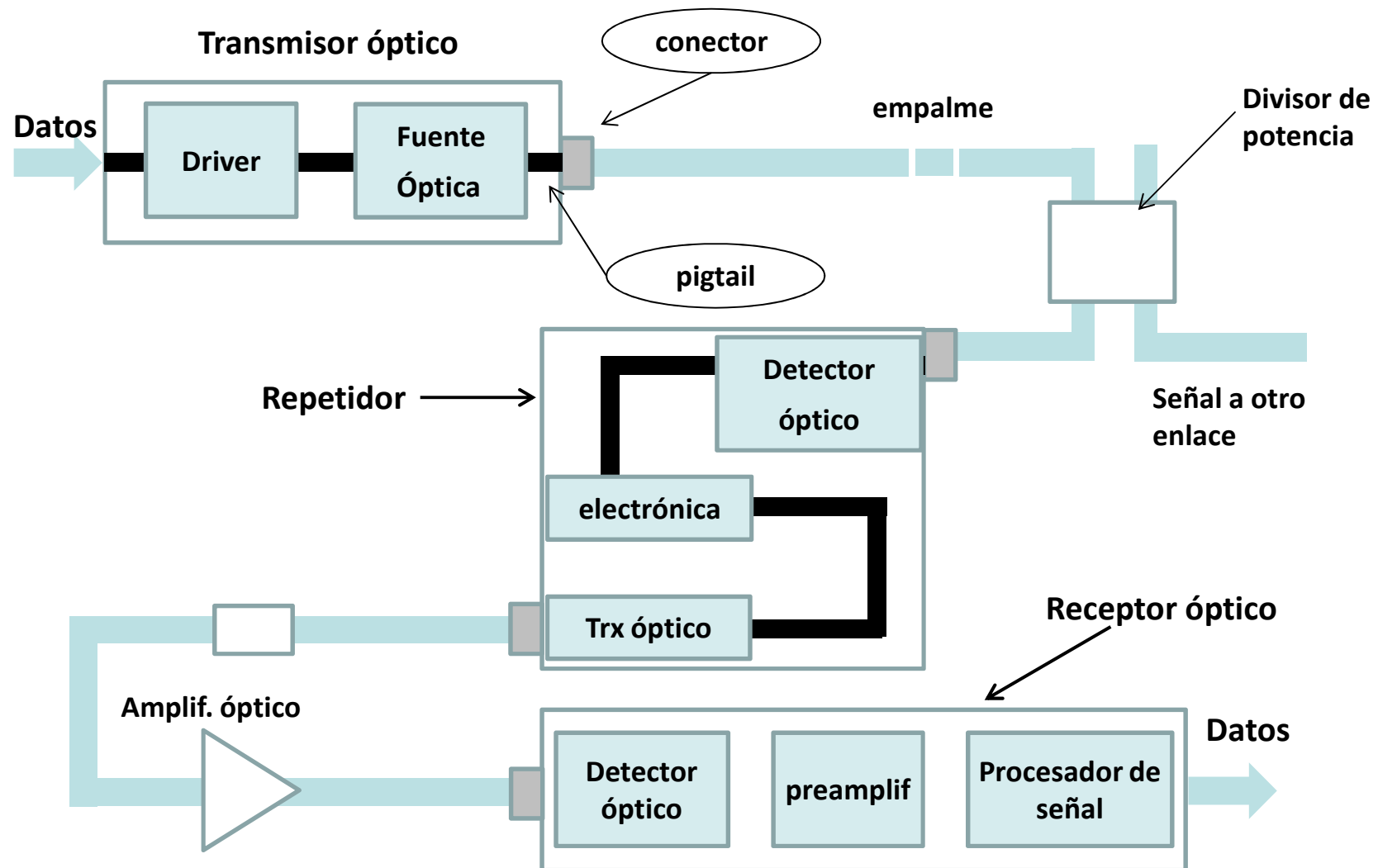
En función de los conectores que interconectan

ST/ST, FC/ST y otras combinaciones, MM ó SM,  
de plástico o metálicos

**Sólo PC/PC ó APC/APC**



# M5. Elementos de un enlace

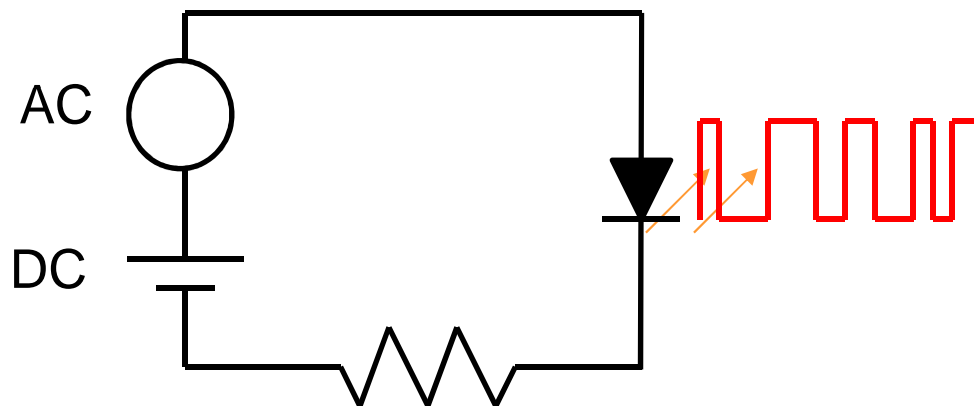




# M5. Enlace

- La luz (portadora óptica) se modula con la señal a transmitir.

Ejemplo digital:



$$P_{"1"} \gg P_{"0"} > 0$$

$$\frac{P_{"1"}}{P_{"0"}} \approx 10dB$$

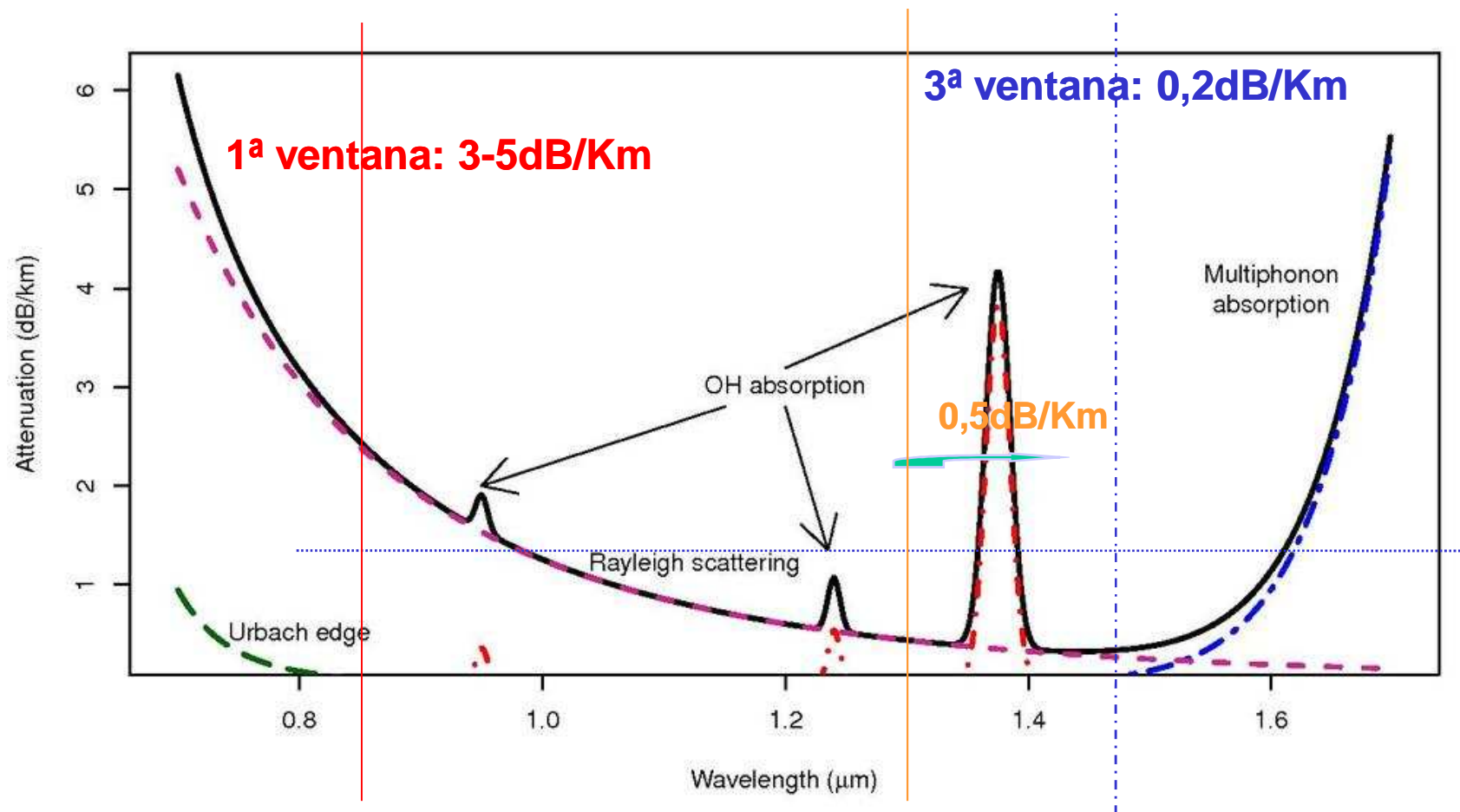
- La fibra óptica transmite esa información en forma de pulsos ópticos.



# M5. Parámetros Fibras Ópticas

## ■ Parámetros como medio transmisión

- **Atenuación.**  $A = -10 \log(P_{out}/P_{in})$ . dB/Km ó dB/m
  - Depende de  $\lambda$ , materiales.
  - Da nombre a las ventanas comunicaciones
- **Distorsión.** Ensanchamiento temporal experimentado pulso
  - Depende  $\lambda$ , materiales, distancia, fuente de luz.
  - Unidades: MHz x Km, GHz x Km x nm, otros





# M5. Cálculo de un balance de potencia.

*“Necesario considerar y sumar todas las pérdidas en dB que introducen todos y cada uno de los elementos del enlace”.*

- $L_f$ , **pérdidas fibra**;  $L_f = \alpha \cdot l_f$ ;  $l_f$  longitud de la fibra, desviación  $\sigma^2$
- variaciones en **Temperatura**  $\Rightarrow \Delta n_1 \Rightarrow \Delta \alpha(T)$  (v. medio),  $\sigma_T^2$  (varianza)
- variaciones por **envejecimiento**  $\Rightarrow \Delta \alpha(t)$  (v. medio),  $\sigma_t^2$  (varianza)
- variaciones  **$\lambda$  fuente óptica** (distinta a la que utilizó el fabricante en la caracterización)  $\Rightarrow \Delta \alpha(\lambda)$  (v. medio),  $\sigma_\lambda^2$  (varianza)

$$L_f = [\alpha + \Delta \alpha(T) + \Delta \alpha(t) + \Delta \alpha(\lambda)] l_f^*$$

$$\sigma_f^2 = [\sigma^2 + \sigma_T^2 + \sigma_t^2 + \sigma_\lambda^2]$$

$l_f^*$ , incluir la posible incertidumbre en la longitud total, n<sup>o</sup> repetidores.

$$l_f^* = (1+u) l + l_r; l = \text{longitud repetidores, } u = \text{incertidumbre, reserva}$$



# M5. Balance de potencias

## (Power budget)

**Margen de seguridad**

**Sensibilidad del receptor**

**Nivel de ruido aceptado (BER, SNR)**

**Potencia acoplada a la fibra**

**Pérdidas del enlace**

**Ejemplos**



## M5. Parámetros Fibras Ópticas

### ■ Parámetros como medio transmisión

- **Atenuación.**  $A = 10 \log(P_{in}/P_{out})$ , en dB/Km ó dB/m
  - Depende de  $\lambda$ , materiales.

Da nombre a las ventanas comunicaciones

- **Distorsión.** Ensanchamiento temporal experimentado por el pulso
  - Depende de:  $\lambda$ , materiales, distancia, fuente de luz.
  - Unidades: MHz x Km, GHz x Km x nm, otros



## M5. Ancho banda FO. Dispersión

- **Dispersión.** Ensanchamiento temporal de los pulsos. ISI comunicaciones digitales. “Impone un **límite en la velocidad de transmisión**”:

### Ancho banda FO

Suponiendo respuesta impulsiva FO tipo gaussiano :

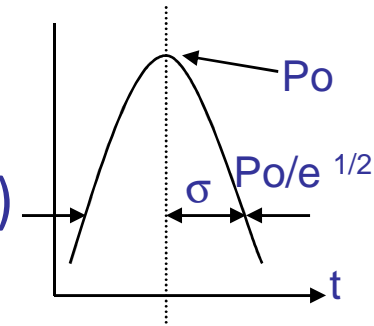
$$B_{\text{óptico}} \text{ (GHz)} = 0,187 / \sigma \text{ (ns)}$$

$\sigma \text{ (ns)}$ , dispersión total

## M5. Limitación práctica dispersión

- Suponiendo respuesta gaussiana fibra óptica

$$h(t) = 1/\sqrt{2\pi\sigma^2} (e^{-t^2/2\sigma^2}) \rightarrow H(\omega) = \sigma/\sqrt{2\pi} (e^{-\sigma^2 \omega^2/2})$$



Bw<sub>óptico</sub>;  $H(\omega_{3dB}) = 0.5H(\omega=0)$

$$\text{Bw}_{\text{óptico}} \text{ (GHz)} = 0,187 / \sigma \text{ (ns)}$$

A) Multimodo:  $\sigma \text{ (ns)} = (\text{ns Km}^{-1} * L \text{ (Km)})$

$$\text{BW (Mhz)} * L \text{ (Km)} = 187 / (\text{ns Km}^{-1})$$

Empíricamente, la dispersión intermodal no crece linealmente con L :

$$\sigma_{\text{modal}} (L) = \sigma_{\text{modal}} (1\text{Km}) * L^{\gamma} \text{ con } \gamma=1 \text{ (SI)}, \gamma=0.7-0.8 \text{ (GI)}$$

B) Monomodo:  $\sigma = D * L * \Delta\lambda$  (sin PMD)

$\text{BW} = 0,187 / (D * L * \Delta\lambda)$ ;  $\text{BW} * L * \Delta\lambda = 0,187 / D$  cálculo D según normativa rango  $\lambda$ ;

$$\text{BW (Mhz)} * L \text{ (Km)} * \Delta\lambda \text{ (nm)} = 187 / D \text{ (ps nm}^{-1} \text{ Km}^{-1})$$





## Límites CDC, D( $\lambda$ )

- G. 652 (límites CDC fibras SM, 1260nm-1360nm)

$$S_{0m\acute{a}x} = -0.093 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{Km})$$

$$D(\lambda) = \frac{S_{0m\acute{a}x}}{4} \left[ \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]$$

So: pendiente dispersión en D=0  
 $\lambda_0$ : y longitud de onda en D=0

- G. 653 (límites CDC fibras DSF rango 1525nm-1575nm, con  $\lambda_0=1550\text{nm}$   
D<3.5ps/nm Km) @ 1550nm

$$D(\lambda) = (S_0)[\lambda - \lambda_0]; \text{ valores típicos } S_0 = 0.085 \text{ ps}/\text{nm}^2 \cdot \text{Km}$$

- G. 655 (límites CDC fibras NZDSF, para rango 1530 a 1565nm,  
0.1 ps/(nm Km) <D< 3 ps/(nm Km))

Cálculos se supone una dependencia lineal con la longitud



## M5. Cuantificación dispersión total I

$$\sigma(\text{total}) = [(\Delta\lambda * \sigma(\text{cromática}))^2 + \sigma^2(\text{intermodal})]^{1/2}$$

**Unidades: ps Km<sup>-1</sup>**

MM SI: domina la dispersión intermodal

MM GI: ambos términos deben considerarse

**SM no existe intermodal y hay un término adicional por PMD**



## M5. Cálculo dispersión total SM

$$\sigma(\text{total}) = [(\Delta\lambda * \sigma(\text{cromática}) * L)^2 + (\sigma(\text{polarización}) * L^{1/2})^2]^{1/2}$$

**Unidades: ps.**

Normalmente domina la dispersión cromática

En fibras de dispersión cero, la dispersión cromática de segundo orden (S)

PMD afecta en los enlaces de alta capacidad >2,5Gb/s, no especificado en las fibras antiguas



## M5. Emisores y receptores. Conversión ts a BW

Conversión aproximada:

$$BW=0,35/ts ;$$

ts: tiempo de subida de 10% al 90% del valor final

**Nota: Suponiendo la respuesta del receptor y del emisor  
como un sistema de primer orden**



## M5. Balance de tiempos del sistema

Sistema compuesto emisor, enlace (fibra óptica, conexiones y elementos asociados) y receptor:

$$ts(\text{total}) = [(ts(\text{emisor}))^2 + (ts(\text{fibra}))^2 + (ts(\text{receptor}))^2]^{1/2}$$

$ts$  = tiempos de subida;  $ts(\text{FO}) = 1/\text{BW}(\text{FO})$

(aproximación: sólo es *estrictamente* válido si la respuesta de cada subsistema es gaussiana. Lo que no es cierto para el emisor y el receptor)

# M5. Otras expresiones cálculo B.

- Ensanchamiento temporal de los pulsos. **ISI comunicaciones digitales.**  
“Impone un **límite en la velocidad de transmisión**”:

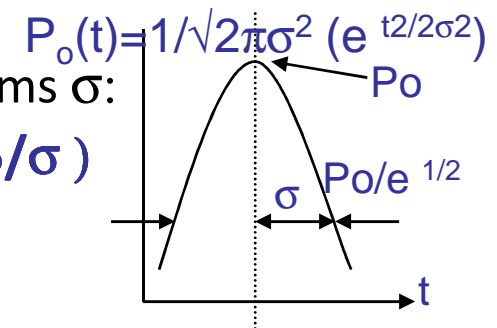
**Notación:**  $B_T$  = bit rate (bs/s);  $\tau$  = duración pulso inicial

1. Supone límite permitido, ensanchamiento salida FO igual ancho pulso:

- $B_T \leq 1/2\tau$

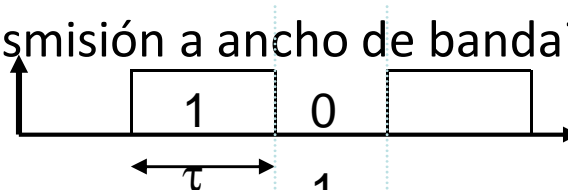
2. Menos restrictivo: haz salida gaussiano con anchura rms  $\sigma$ :

- $B_T$  (máx)  $\approx 0.2/\sigma$  bs/s (otros:  $\approx 0.25/\sigma$ )



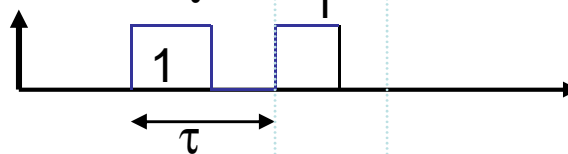
- ¿Pasar velocidad de transmisión a ancho de banda? f (tipo codificación)

- código NRZ.  $2B = B_T$



1 Hz, 2 bits

- código RZ.  $B = B_T$



1 Hz, 1 bit

$B = B_{\text{óptico}}$



## M5. Diseño enlace. Factores a considerar

Factores de diseño	Características/opciones
Tipo de fibra	monomodo/multimodo
Longitud de onda de trabajo	850, 1300, 1550 nm
Potencia de salida del transmisor	expresada en dBm
Tipo de fuente	LED o láser
Sensibilidad del receptor	expresada en dBm
Tipo de detector	PIN, APD
Código de modulación	NRZ, RZ, ...
Tasa de error	valores típicos $10^{-9}$ , $10^{-12}$
Velocidad de transmisión	Expresada en Mbs, Gbs
Relación señal a ruido	expresada en dB
Número de conectores	pérdidas en conectores
Número de empalmes	pérdidas por empalmes
Restricciones ambientales	humedad, temperatura, luz solar
Restricciones mecánicas	aplicaciones interiores o exteriores
Radios de curvatura	Pérdidas asociadas

**Calculado el balance de tiempos y de potencia, domina el más restrictivo**



# M5.Ejercicios