



BLOQUE	TÍTULO
<i>Tema 0</i>	Introducción a las Comunicaciones Ópticas
<i>BLOQUE I</i>	La transmisión de información por enlaces básicos de comunicación por fibra óptica
<i>I.1.-</i>	Generación de la portadora: fuentes de luz
<i>I.2.-</i>	Modulación de la portadora óptica con la información
<i>I.3.-</i>	Multiplexación de varias fuentes de información
<i>I.4.-</i>	Transmisión de información por la fibra óptica
<i>I.5.-</i>	La detección de la información: receptores ópticos
<i>I.6.-</i>	Componentes activos y pasivos



BLOQUE	I.4 Transmisión de información por fibra óptica
<i>Objetivos</i>	<p>Se pretende que el alumno:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sepa cuáles son los parámetros que caracterizan a una fibra óptica. • Entienda las ventajas y limitaciones de este tipo de guía. • Conozca las ventanas de transmisión y sepa por qué se utiliza cada una. • Identifique los factores que influyen en la dispersión y cómo afecta la fuente empleada. • Comprenda la no-linealidad del sistema y explique la diferencia en este sentido entre sistemas eléctricos y ópticos. • Sepa cuáles son los efectos no-lineales más perjudiciales. • Sea capaz de enumerar los distintos tipos de fibras ópticas y elegir la idónea para cada tipo de aplicación. • Pueda describir los procesos en la industria de manufactura y cableado de f.o. • Diferencie los conectores empleados para la conexión de f.o. y sepa cómo se hace y cómo se caracteriza una unión de fibras.
<i>Duración</i>	10 horas
 <i>Programa</i>	<p>Tema I.4.1: Características y atenuación en fibras ópticas Tema I.4.2: Propagación lineal de señales por la fibra óptica Atenuación, dispersión Tema I.4.3: Propagación no lineal de señales por fibra óptica SPM, XPM, FWM, SBS, SRS Tema I.4.4: Amplificación y compensación de dispersión Tema I.4.5: Aspectos comerciales y tecnológicos Fabricación, cableado, conexiones, oferta comercial Resumen y conclusiones</p>

- 
- Descripción de la fibra óptica
 - Atenuación en fibra óptica
 - Resumen y conclusiones



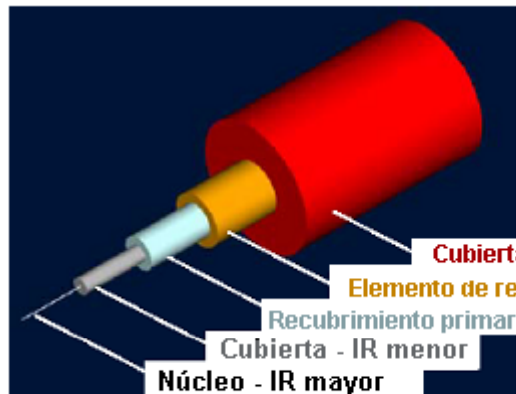
- 
- Descripción de la fibra óptica
 - Atenuación en fibra óptica
 - Resumen y conclusiones



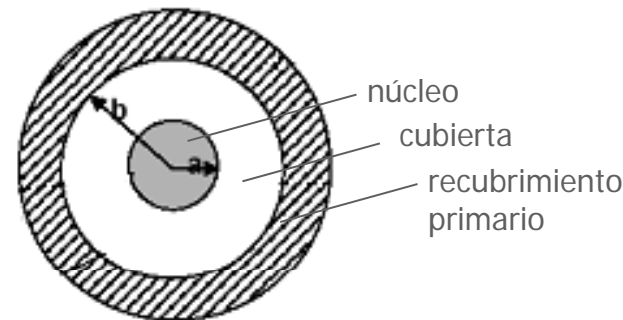
Ing. Telecom., CC.OO.: tx. por fibra óptica

Descripción de la geometría y parámetros de la fibra óptica

Una fibra óptica es una guía de ondas dieléctrica y cilíndrica, altamente flexible. Es capaz de guiar ondas electromagnéticas en el rango de las comunicaciones ópticas.



Corte transversal de una fibra óptica



Tiene dos zonas fundamentales, concéntricas, el **núcleo** en el interior y la **cubierta** más externa. El índice de refracción se hace máximo en el centro, para conseguir el guiado, es decir, la fo. está realizada de tal forma que la potencia óptica se propaga mayoritariamente por la región de núcleo.

Existen muchas clases de fibras ópticas. Se pueden clasificar según los materiales de fabricación (vidrio, plástico, ZBLAN), tamaños (monomodo, multimodo), aplicaciones (comunicaciones, sensores, iluminación), etc.

Nos centramos en **fibras de vidrio** (sílice) para aplicaciones en **sistemas de comunicaciones ópticas**

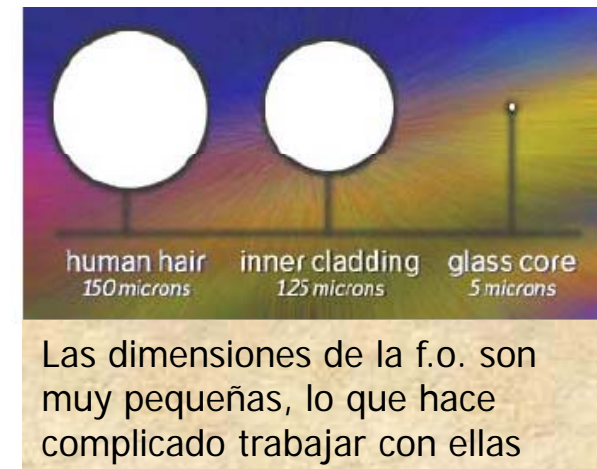
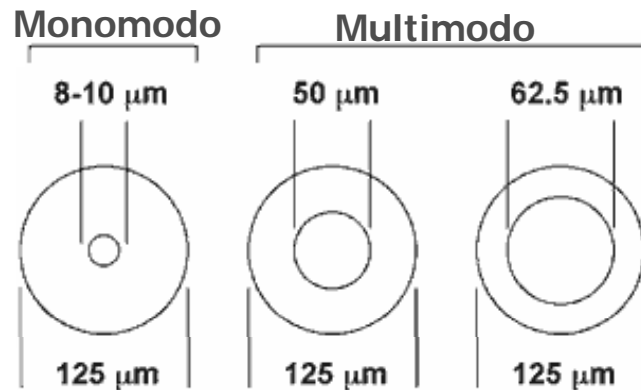
Ing. Telecom., CC.OO.: tx. por fibra óptica

Descripción de la geometría y parámetros de la fibra óptica

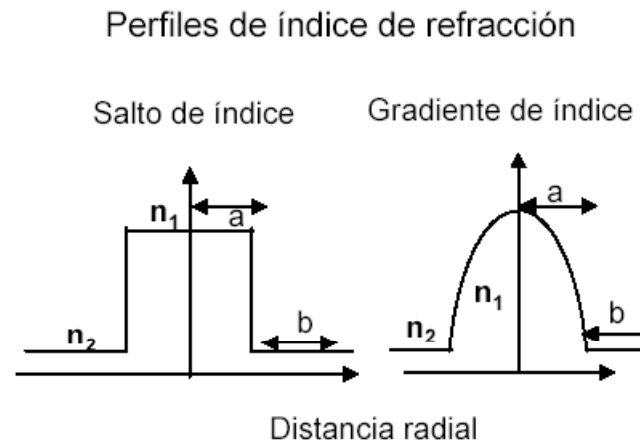
Los parámetros físicos fundamentales son las **dimensiones** y el **índice de refracción**

Para fibras de sílice el tamaño de la cubierta es fijo, con un diámetro de 125 micras y el índice de refracción en toda la cubierta constante. Es en el núcleo donde están las diferencias.

El tamaño del núcleo fija fundamentalmente el nº de modos



El índice de refracción dentro del interior del núcleo no siempre es constante. Su variación con la posición se llama perfil de índice de la fibra y fija básicamente la constante de propagación



Valores típicos para los índices de refracción

$n_{\text{núcleo(máx)}} = 1.461$

$n_{\text{cubierta}} = 1.460$

- El análisis de la propagación por la f.o. riguroso debe hacerse con la teoría electromagnética (ec. de Maxwell). Se buscan simplificaciones, de las que se explican en este tema dos:
 - Análisis basado en óptica geométrica
 - La propagación de la luz se describe con rayos
 - Sólo es válido con $\lambda \sim 0$
 - Análisis basado en teoría de ondas
 - Análisis electromagnético
 - Es habitual la aproximación de guiado débil, válida cuando los índices de refracción de núcleo y cubierta son similares
- Las características básicas de la f.o. como medio de transmisión son:
 - Ancho de banda: ~ 25 THz (en torno a $\lambda=1.2 \mu\text{m}$)
 - Atenuación: ~ 0.3 dB/km

- Análisis basado en óptica geométrica
 - Es una aproximación, no da soluciones exactas
 - Sólo es válido con $\lambda \sim 0$, cuando $\lambda \ll$ tamaño de los objetos por los que la luz se propaga

Dada las longitudes de onda que se emplean en fibra óptica de sílice, 0.85 – 1.55 micras, no es una aproximación correcta en fibras monomodo que tienen radios de 8-10 micras

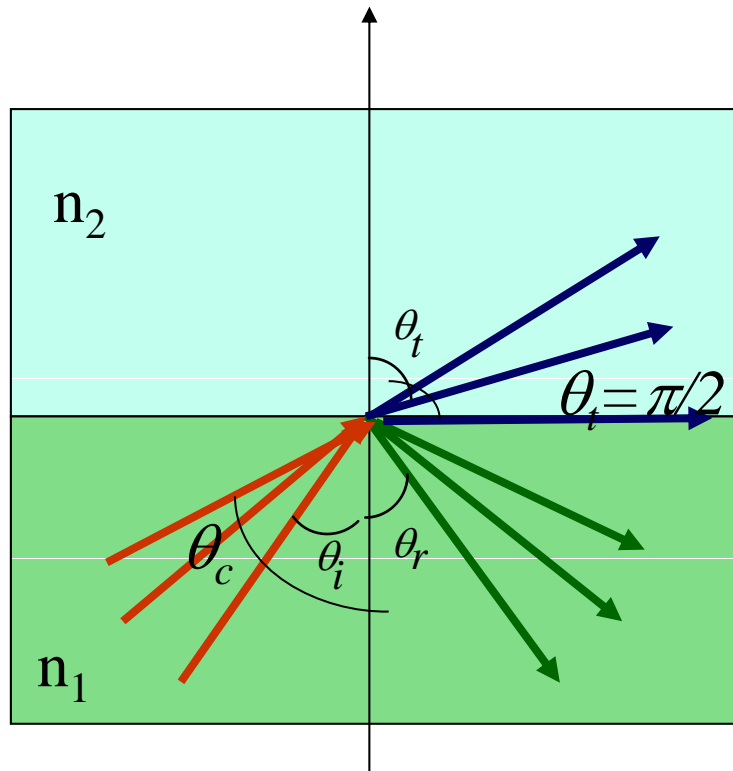
- Útil para entender de forma sencilla conceptos de GUIADO y TIR (reflexión total interna)
- No aporta información sobre el módulo y la fase del campo electromagnético guiado por la fibra

Guiado en las fibras: reflexión total interna, TIR

En fibras de
salto de índice

Leyes de Snell: luz incidente en una interfaz entre dos medios distintos se separa: parte se refleja, parte se refracta

$$\theta_r = \theta_i \quad n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$$



Por tanto, si $n_1 > n_2 \Rightarrow \theta_t > \theta_i$

Llevándolo al límite, se encuentra la relación entre los índices de los dos medios para que el áng. de tx. sea mayor o igual que $\pi/2$

Angulo crítico de incidencia

$$\theta_i = \theta_c = \text{Arcsen} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

si $\theta_i > \theta_c$

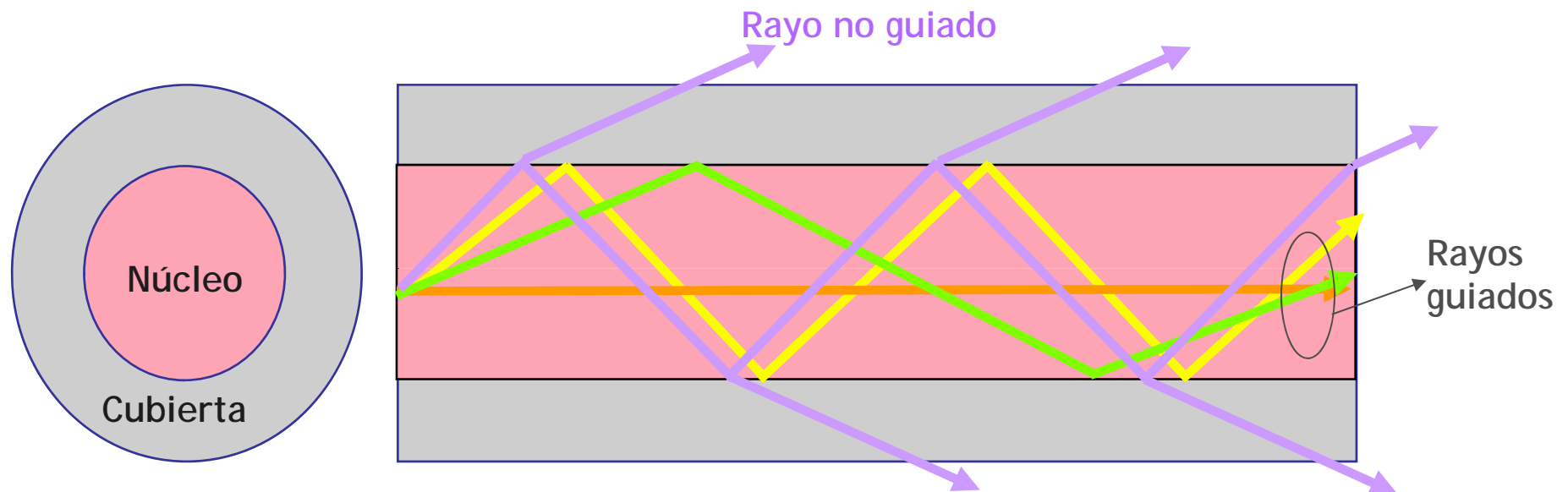
no hay señal transmitida
toda la señal se refleja
hacia el medio original

Reflexión total interna, TIR

Guiado en las fibras: reflexión total interna, TIR; modos

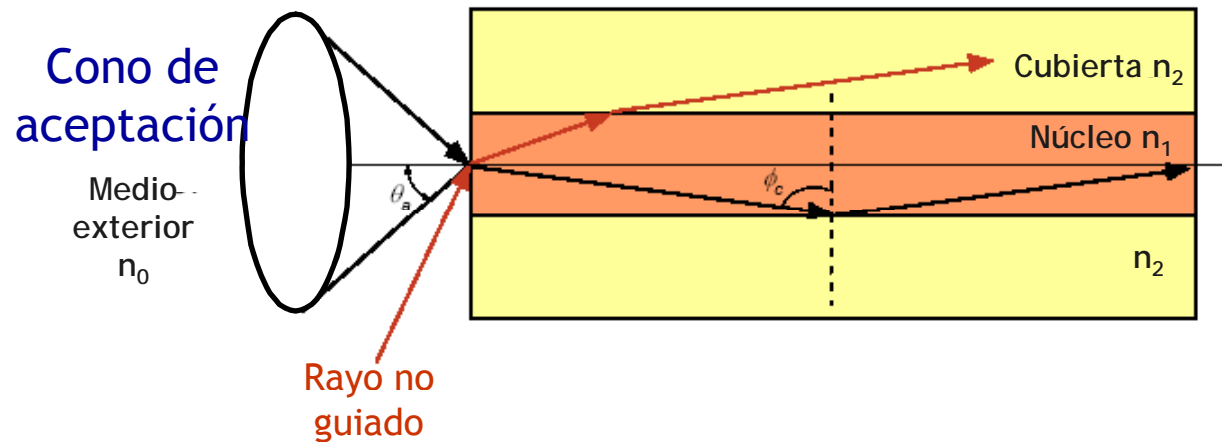
Fibras de salto
de índice

Si el índice de refracción del núcleo de una fibra es mayor que el índice de refracción en la cubierta y la luz incide con un ángulo mayor al ángulo crítico se produce la reflexión total interna y, por tanto, el guiado de la luz por sucesivas reflexiones completas en las interfaces núcleo-cubierta



Cada rayo guiado con un ángulo de inclinación diferente
se denomina MODO

Acoplamiento de la luz, apertura numérica



El máximo valor del ángulo de entrada desde el exterior, θ_a , se obtiene con la ley de Snell y resulta en: $\theta_a = \arcsin\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_0\right)$

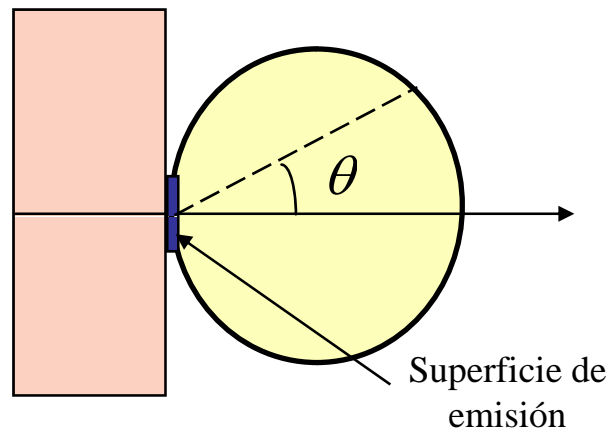
Se define un parámetro de la fibra óptica, la apertura numérica A.N., que da idea de cuánta potencia proveniente del exterior se acopla al interior de la f.o. en condiciones de ser guiada: $A.N. = n_0 \sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{2\Delta}$

siendo $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \left. \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right|_{n_1 \approx n_2}$

Δ : Salto de índice (indica si los índices de refracción de núcleo y cubierta son similares)

Acoplamiento de la luz, apertura numérica

Si la luz es emitida por una fuente externa con diagrama de radiación lambertiano (típico fuentes LED) $I(\theta) = I_0 \cos \theta$



Unos números:

$$n_0=1, \Delta=0.05, \text{A.N.}=0.46, P/P_0=0.21$$

$$n_0=1, \Delta=0.001, \text{A.N.}=0.065, P/P_0=0.004$$


Potencia total emitida por la fuente

$$P_0 = \int_0^{\pi/2} I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \pi I_0$$

Potencia que se acopla a la fibra óptica

$$P = \int_0^{\theta_a} I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \pi I_0 \sin^2(\theta_a) = \frac{P_0 \text{A.N.}^2}{n_o^2}$$

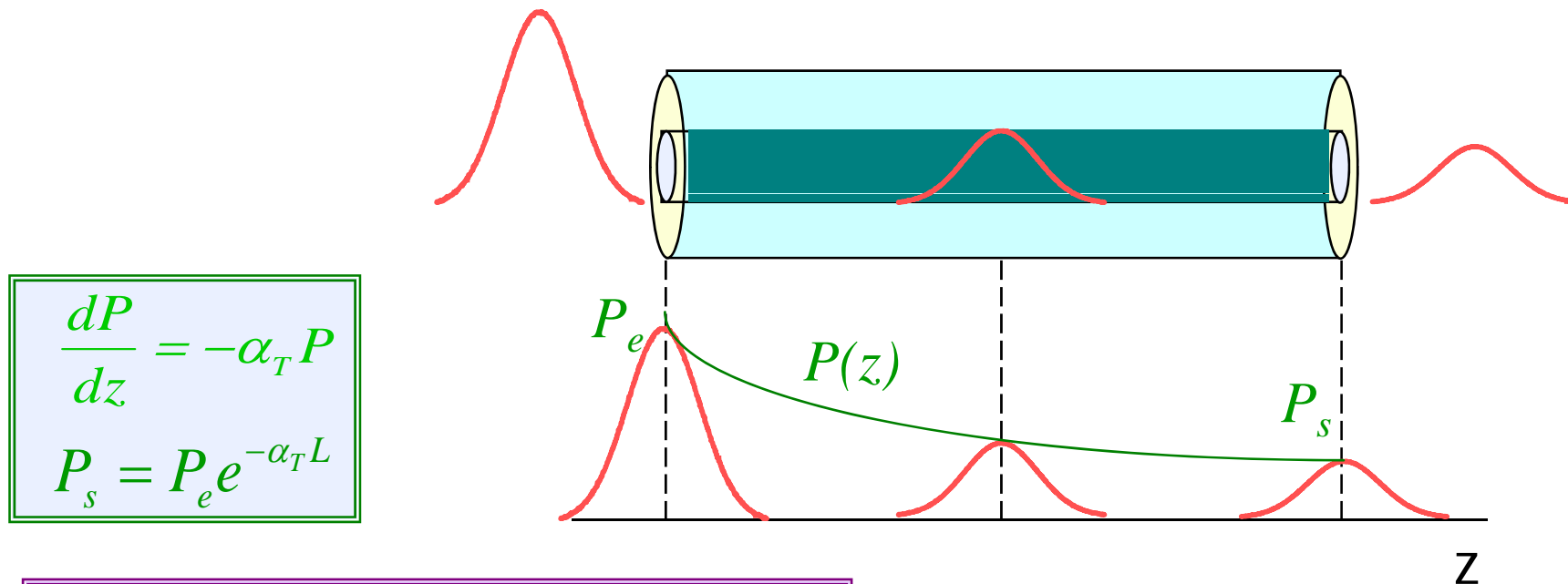
Interesa que la **A.N. sea alta** (los índices de refracción de núcleo y cubierta muy distintos) para que se **acople fácilmente la potencia** de la fuente exterior a la fibra óptica.

- 
- Descripción de la fibra óptica
 - Atenuación en fibra óptica
 - Resumen y conclusiones



Coeficiente de atenuación en Fibras Ópticas

Por el simple hecho de propagarse por la fibra óptica, la potencia óptica introducida a la entrada se va perdiendo paulatinamente. Para describir este fenómeno se define el coeficiente de atenuación α , normalmente en dB/km



$$\frac{dP}{dz} = -\alpha_T P$$
$$P_s = P_e e^{-\alpha_T L}$$

$$\alpha_T (\text{dB/Km}) = -\frac{10}{L} \text{Log}_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right) = 4.343 \alpha_T$$

En una fibra óptica la atenuación que ve la señal transmitida es aproximadamente independiente de la frecuencia

Espectro de la atenuación total en una fibra óptica de sílice

Mecanismos Intrínsecos

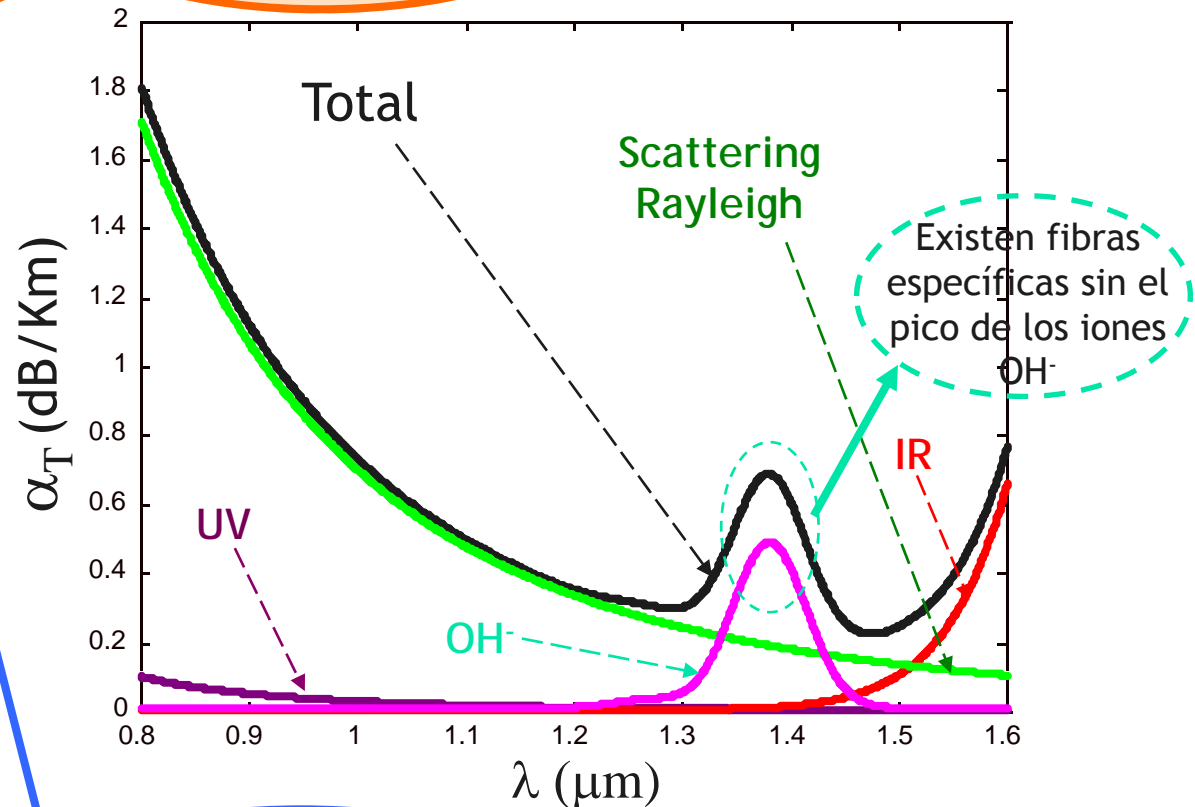
- Pérdidas por Scattering Rayleigh
- Absorción Infrarroja (I.R.)
- Absorción Ultra-Violeta (U.V.)

Mecanismos Extrínsecos

- Absorción por iones OH^- (humedad)
- Absorción por iones metálicos
- Hidrógeno
- Curvaturas

inherentes a la
utilización de sílice

INEVITABLES



debidos a impurezas en
fabricación, instalación

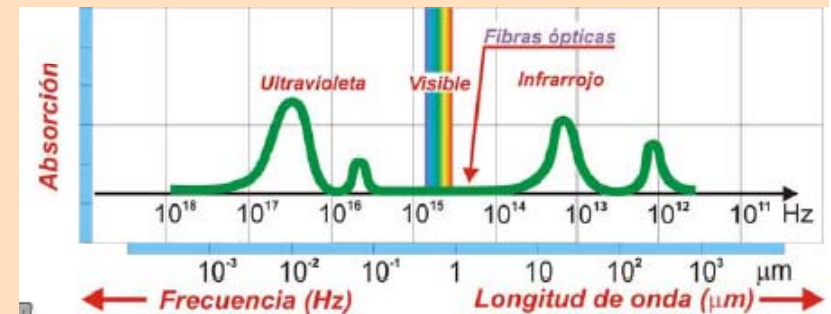
EVITABLES

Mecanismos intrínsecos de atenuación en una fibra óptica de sílice

Absorción del material (sílice): muy baja entre 0.8-1.6 μm

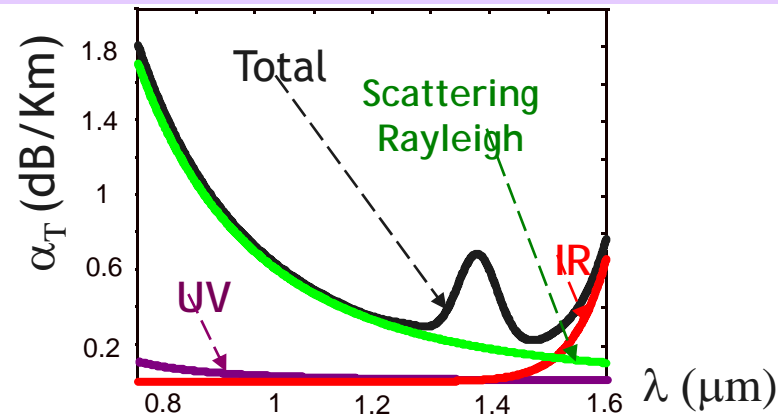
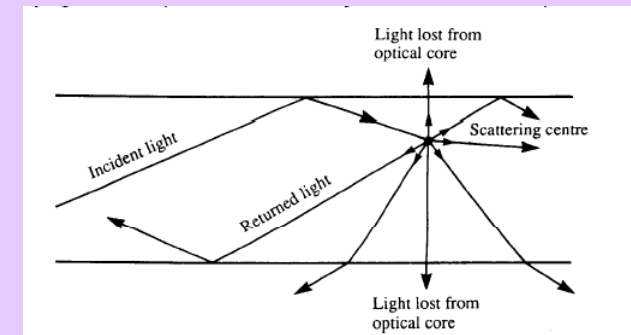
pico de absorción Infrarroja (I.R.): en long de onda altas, su influencia disminuye al disminuir la longitud de onda (dará problemas por encima de 1600 nm)

pico de absorción Ultra-Violeta (U.V.): en long de onda bajas, su influencia disminuye al aumentar la longitud de onda



Scattering (dispersión espacial) Rayleigh:

Imperfecciones en el índice de refracción y geometrías locales (tamaño menor que la long. de onda) hace que la luz incidente se disperse espacialmente. Su valor puede aproximarse como proporcional a $1/\lambda^4$. Limita a λ bajas

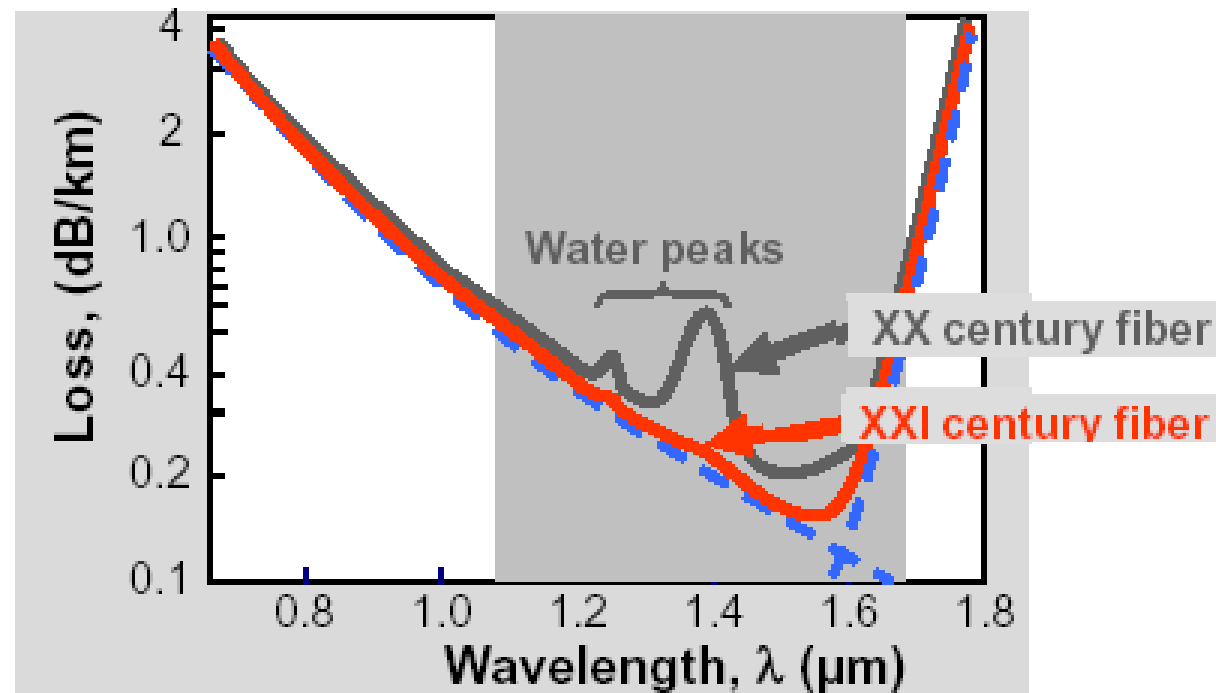


Mecanismos extrínsecos de atenuación en una fibra óptica de sílice

Absorción iones OH-

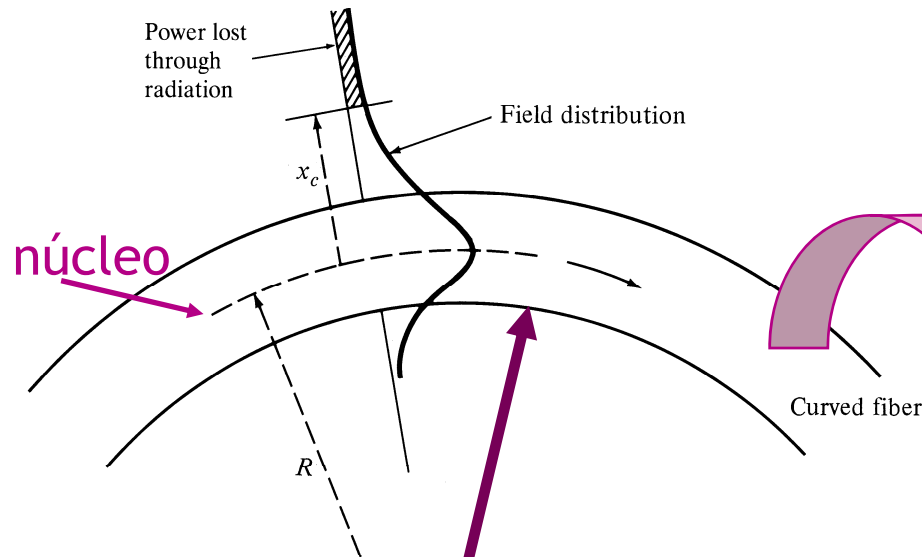
Tiene un pico de absorción en 1380 nm.

La presencia de estos iones se debe a restos de humedad durante el proceso de fabricación de la fibra: pueden reducirse si se controla mejor la fabricación (fibra *AllWave* y similares)



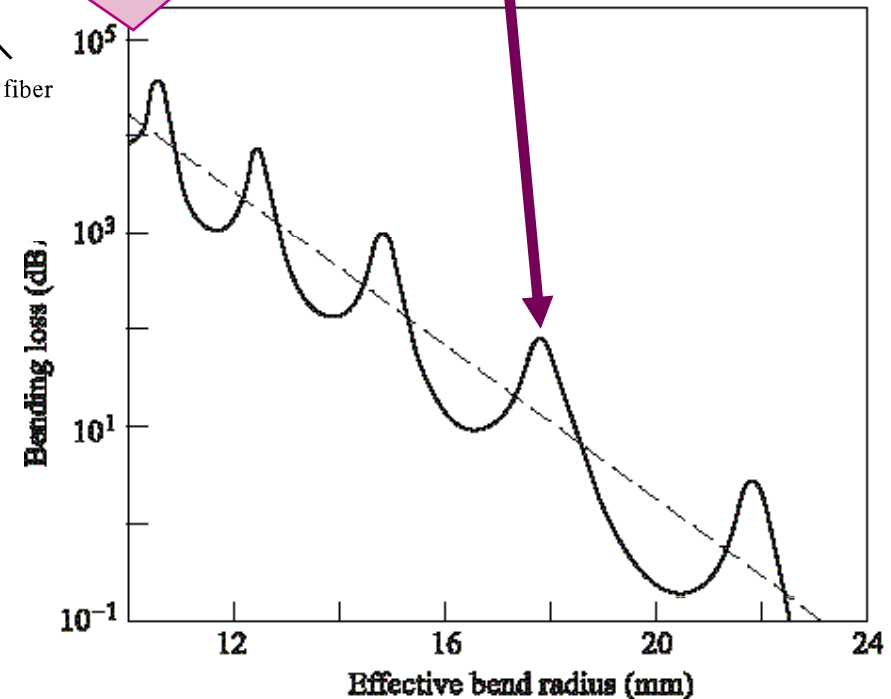
Mecanismos extrínsecos de atenuación en una fibra óptica de sílice

Pérdidas por macro-curvaturas



Fibra curvada

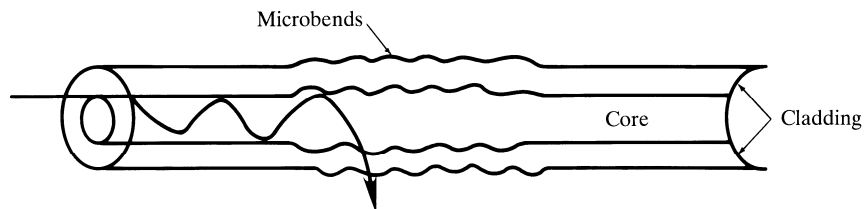
Atenuación como función del radio de curvatura



Mecanismos extrínsecos de atenuación en una fibra óptica de sílice

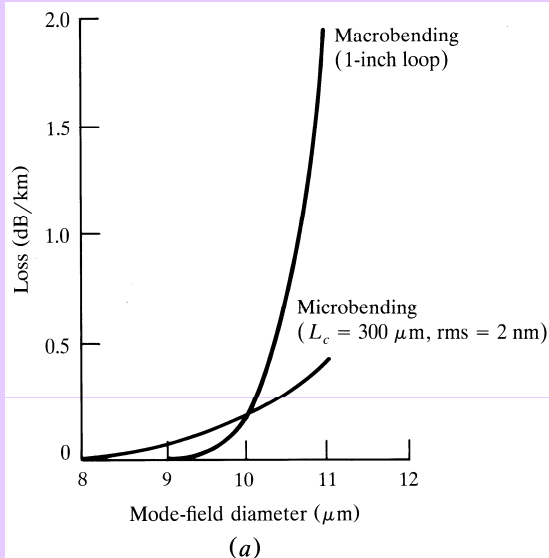
Las pérdidas por macro-curvaturas se evitan respetando lo indicado por el fabricante de cables en las especificaciones

Las pérdidas por micro-curvaturas se deben también a una mala manipulación (torsión, estiramiento, etc.) o cableado



Especificaciones / Specifications

Fibras / Fibres	Simplex	Duplex
Diámetro (mm) Diameter (mm)	3,0	3,0 x 6,5
Peso (Kg/Km) Weight (Kg/Km)	10	20
Tensión máxima de instalación (N) Tensile load short term (N)	500	1000
Tensión máxima permanente (N) Tensile load long term (N)	300	500
Radio de curvatura (mm) Bending radius (mm)	30	40



En ambos casos disminuyen con el confinamiento de la potencia en el núcleo (diámetro del modo)

Otras fuentes de “atenuación”:

U.Púb.Navarra

EL PAÍS, sábado 12 de julio de 2003

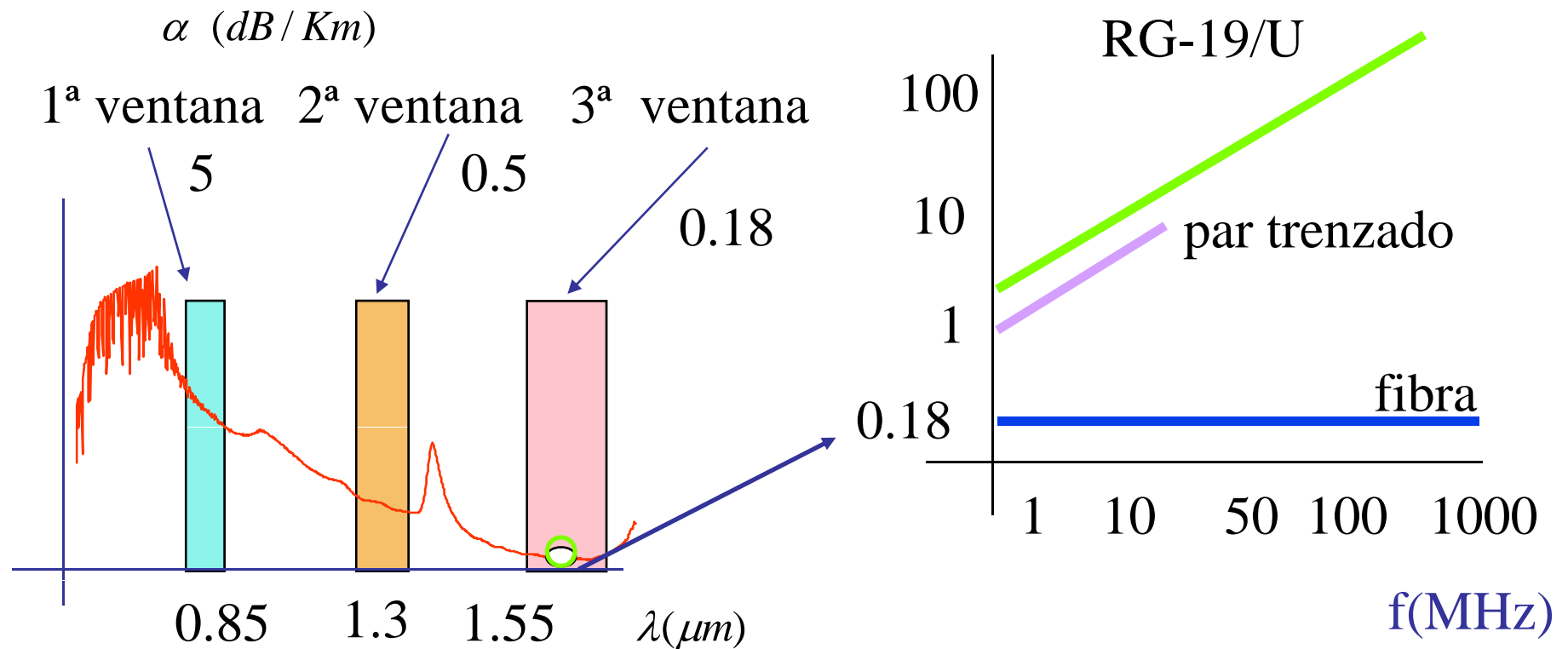
Tres excavadoras cortan la red de fibra óptica de Telefónica

EL PAÍS, Madrid
Telefónica tuvo ayer tres averías en otros tantos centros de cables de fibra óptica que sirven para la transmisión de datos, lo que provocó fallos entre Madrid y la zona Norte de España. Según fuentes de la operadora, el problema surgió por tres excavadoras, ajenas a Telefónica, que arrancaron ramales de cables en Aranda de Duero (Burgos), una localidad de Vizcaya y un pueblo de la Sierra Norte de Madrid. Esta situación dejó incomunicado a un número indeterminado de empresas y particulares que utilizan estos servicios para su operativa diaria.

La casualidad de que fueran

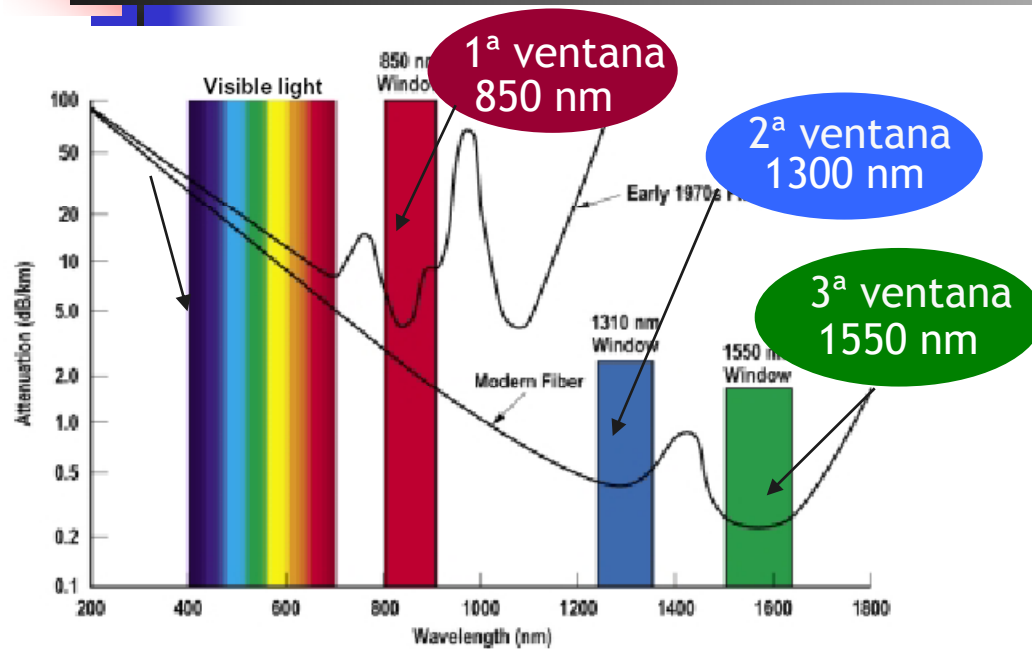


¿Depende la atenuación en la f.o. de la frecuencia?



Ing. Telecom., CC.OO.: tx. por fibra óptica

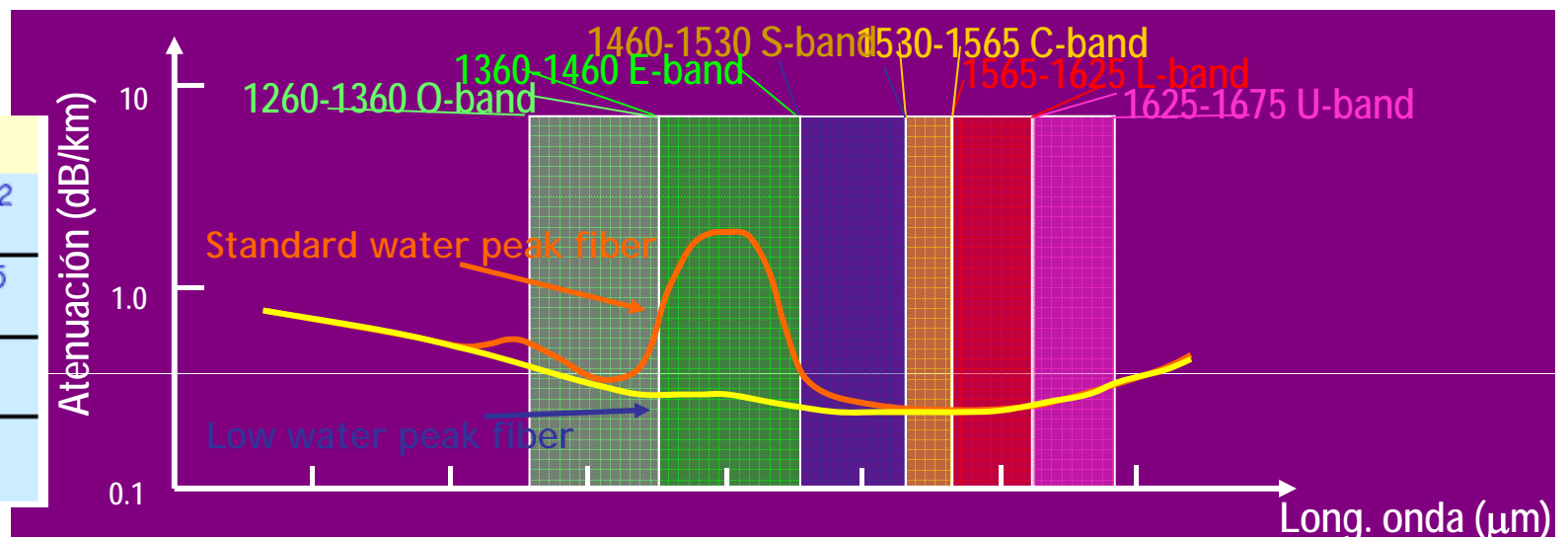
Atenuación: ventanas de transmisión





Banda Espectral Continua

Denominación	Descriptor	Rango (nm)
Banda-O	Original	1260 - 1360
Banda-E	Extendida	1360 - 1460
Banda-S	Corta (Short)	1460 - 1530
Banda-C	Convencional	1530 - 1565
Banda-L	Larga	1565 - 1625
Banda-U	Ultra-Larga	1625 - 1675

Valores típicos	
3ª ventana 1550 nm	0,15 - 0,2 dB/km
2ª ventana 1310 nm	0,4 - 0,5 dB/km
1ª ventana 1550 nm	2 - 3 dB/km
Plástico 800 nm	0,2-0,4 dB/m



- 
- Descripción de la fibra óptica
 - Atenuación en fibra óptica
 - Resumen y conclusiones
- 

- ❑ Una fibra óptica es una **guía de ondas dieléctrica y cilíndrica**, capaz de guiar ondas electromagnéticas en el rango de las comunicaciones ópticas (~cientos THz). Normalmente, hecha de sílice (cubierta) y sílice ligeramente dopada (núcleo)
- ❑ El guiado se consigue por **TIR**, haciendo la parte central -núcleo- de mayor índice de refracción que la parte externa -cubierta-
- ❑ El perfil de índice determina cuál es la dispersión de la fibra. Las más habituales son las de **salto de índice** (índice de refracción constante en el núcleo).
- ❑ Se emplean diferentes parámetros (**apertura numérica, diámetro del modo fundamental, birrefringencia, ...**) para caracterizar cómo es la propagación de potencia óptica por la fibra óptica. La atenuación supone pérdida de potencia, pero por ser constante en frecuencia -dentro de cada canal- no distorsiona la señal.
- ❑ La atenuación es básicamente la misma para todas las fibras ópticas (algo superior para MMF que para SMF)
- ❑ La fibra óptica presenta atenuaciones muy bajas (<1dB/km) en varias longitudes de onda que determinan las ventanas de tx.: 1ª, 850 nm; 2ª, 1300 nm, 3ª, 1550 nm. Con objeto de añadir más capacidad se han normalizado otras ventanas (S,L,U,E,O)