

# EL CANAL ÓPTICO: LA FIBRA ÓPTICA

## Contenido

- 1.- Sistemas ópticos de comunicación.
- 2.- La fibra óptica.
- 3.- Modos de propagación en la fibra.
- 4.- Cable de fibra óptica.

## Objetivo

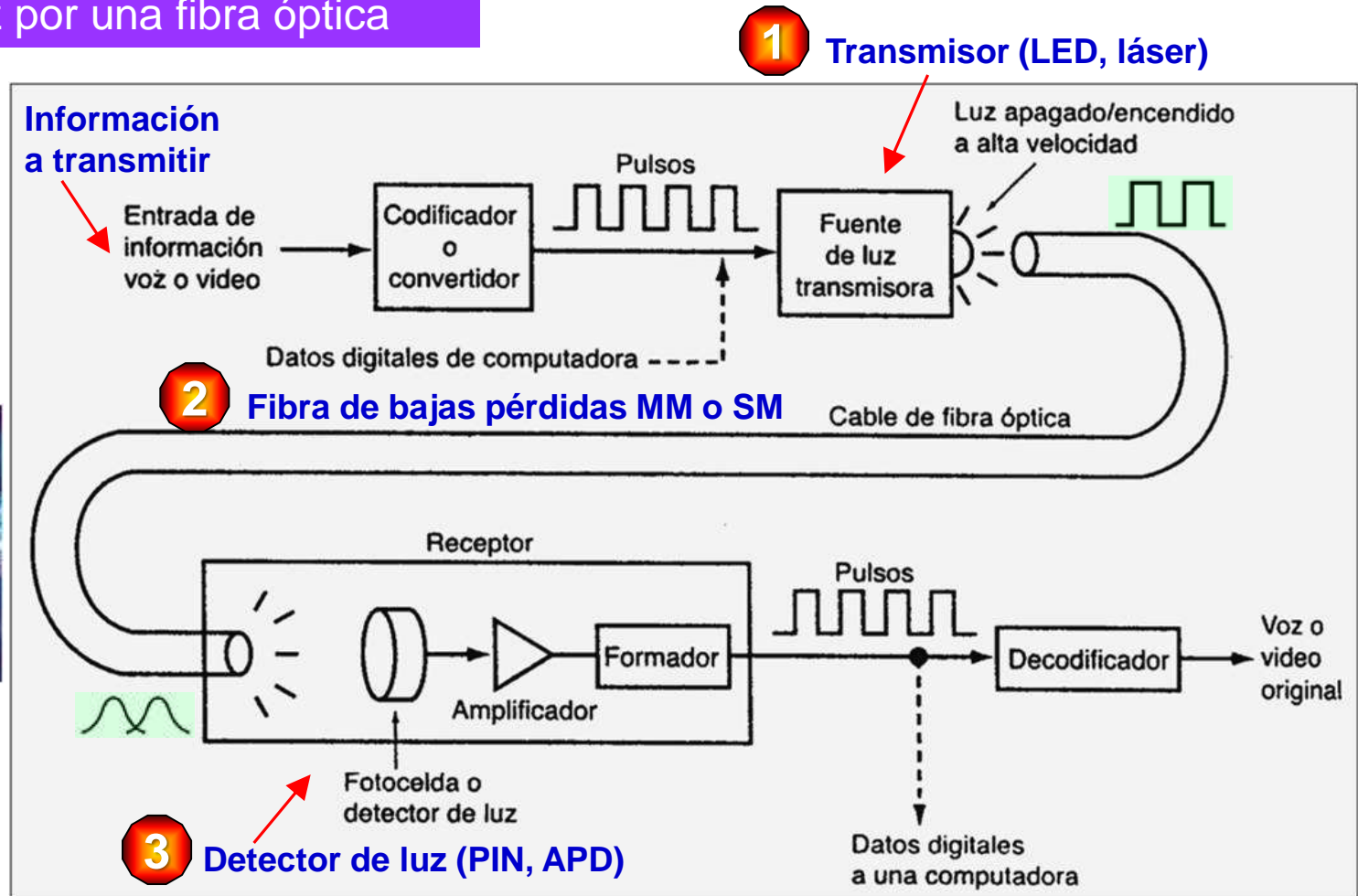
Describir el estado del arte de la comunicación por fibra. Explicar cómo se propaga la luz en una fibra y la operación de los 3 tipos de fibra, comparando su desempeño.



# 1.- Sistemas ópticos de comunicación

Transmiten luz por una fibra óptica

Sistema  
óptico  
básico



Sistema óptico bidireccional

Un **sistema óptico bidireccional** se forma implementando un segundo grupo idéntico de dispositivos de modulación y detección en sentido opuesto.

Los pulsos digitales se convierten a pulsos de luz

# Desarrollo de las tecnologías ópticas

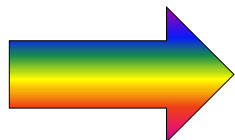
## Visión de la tecnología óptica

No existe un mejor medio físico conocido que la **fibra óptica**, y ninguna señal fuente mejor que la **luz** para resolver los nuevos y emergentes requerimientos de transmisión" ... "la fibra óptica es un medio de propagación a prueba de **futuro**" (Editorial Revista IEEE, marzo 2000).

## Estado del arte al 2010

● Un **láser** es capaz de emitir  $10^{16}$  fotones/s.

● Un buen **fotodetector** distingue un bit "1" con 10 fotones



Por tanto, se dispone de una **capacidad de transmisión** de  $10^{15}$  bps es decir, **1 Pbps**.

Esta **capacidad de transmisión** (ancho de banda) está limitada sólo por la **tecnología disponible** de generación y de recepción de la señal.

Además, la distancia de transmisión es significativamente grande por la **baja atenuación** que presenta la fibra. Una señal óptica se transmite a lo largo de muchos km sin necesidad de regeneración.



La fibra tiene un ancho de banda ilimitado.

# Desarrollo de las tecnologías ópticas

Garantizan al acceso a altas velocidades

Velocidades en el acceso

## Fibra óptica: la UPV coordina un proyecto europeo para ofrecer conexiones de 10 Gbps

*Fuente: EFE. 11 de octubre de 2010.*

La Universidad Politécnica de Valencia coordina un proyecto europeo para ofrecer conexiones a Internet de 10 Gbps a cada usuario y que dotará de "inteligencia" a la red de transmisión de datos a través de una "nueva arquitectura del entramado de fibra óptica".

Según ha informado la Politécnica en un comunicado, el desarrollo de este proyecto permitirá mejorar los servicios de Internet, telefonía convencional, televisión y conectividad sin cables (wi-fi), además de nuevos avances en servicios de seguridad y control en el hogar.

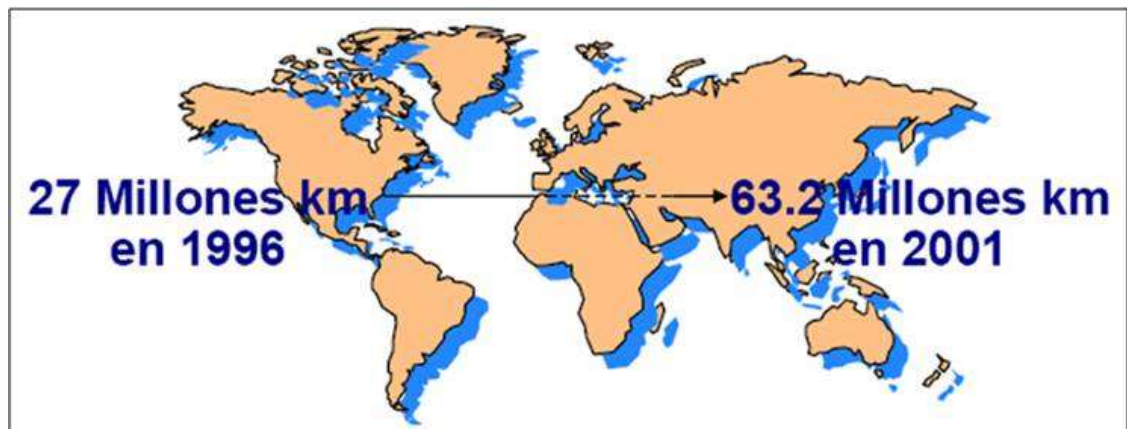


La red de transporte óptica muy pronto superará los 400 Gbps.



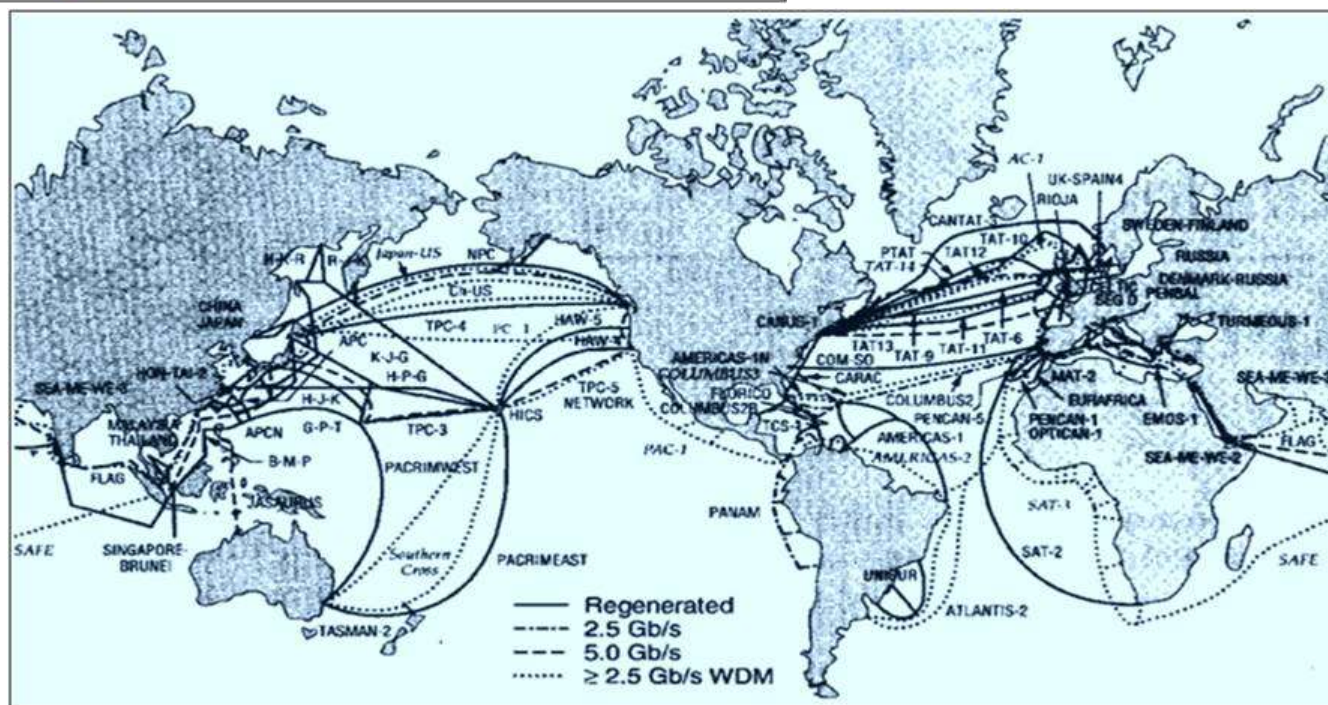
# Redes de fibra óptica

## Crecimiento a nivel mundial



Al 2010 sobrepasan los 100 millones de km.

## Cables ópticos submarinos



La ocupación del total de fibras no sobrepasa el 20%

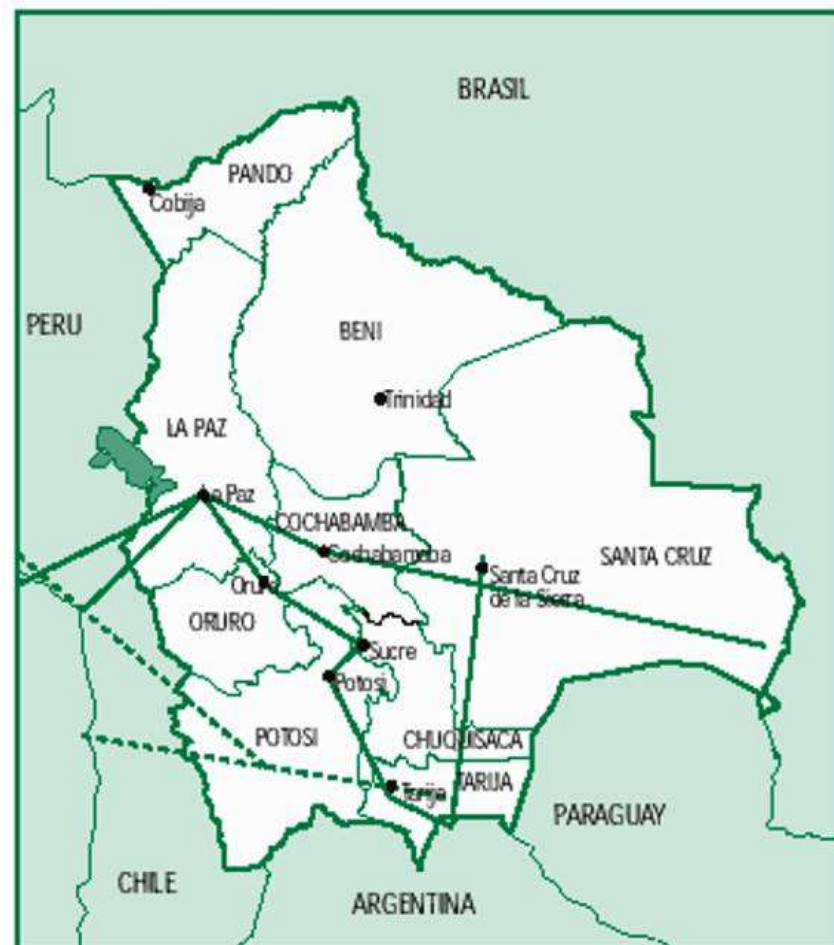
# Redes de fibra óptica

## América Latina y Bolivia

Cable submarino de fibra óptica  
**Proyecto Nautilus.**



Redes ópticas en Bolivia.



Los dueños son empresas proveedoras de fibra.

# Redes de fibra óptica

En una ciudad: Santa Cruz de la Sierra

Anillos ópticos  
de COTAS



Otros operadores como Entel y AXE también tienen anillos ópticos.



# Redes de fibra óptica

## Arquitectura óptica en EE.UU.

### Anillos ópticos principales





# Aplicaciones de los sistemas ópticos

## Redes troncales

Los cables de fibra óptica se encuentran a menudo en las **redes troncales (redes de transporte)** porque su gran ancho de banda es rentable frente al costo. Actualmente, con multiplexación por longitud de onda densa (**DWDM**), se pueden transferir datos a una velocidad de 160 Gbps. La red SONET/SDH proporciona esta troncal.

## Redes HFC

Las compañías de TV por cable usan una combinación de fibra óptica y de cable coaxial, creando una **red híbrida HFC**. Las fibras proporcionan la estructura troncal mientras que el coaxial proporciona la conexión a los domicilios de los usuarios. Esta configuración es rentable porque el bajo ancho de banda que necesita el usuario no justifica aún el uso de fibra óptica.

## Redes LAN

Las **redes de área local** (LAN) como las 100Base-FX (Fast Ethernet) y 1000Base-X también usan cables de fibra óptica.

## Redes de acceso

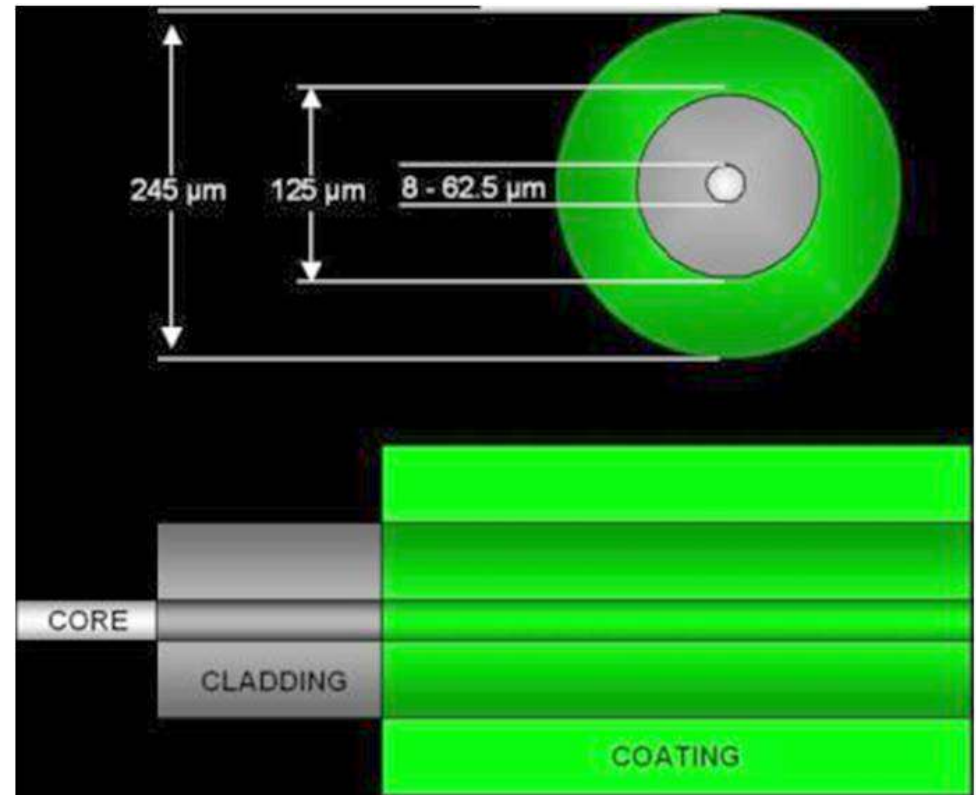
Las empresas de telecomunicaciones están definiendo avanzadas redes convergentes basadas en IP, que permiten ofrecer más servicios sobre la misma infraestructura. Entre las tecnologías más interesantes que están permitiendo esta convergencia cabe destacar, en la parte del bucle de abonado, a **GPON** (*Gigabit Passive Optical Network*), la tecnología de acceso mediante fibra óptica con arquitectura punto a multipunto.

## 2.- La fibra óptica

### ¿Qué es una fibra óptica?

La fibra óptica es un hilo de cristal o plástico compuesto por 3 capas concéntricas que difieren en propiedades.

- 1 Núcleo (core).** Es un hilo de cristal o plástico que conduce la luz. De 8 a  $62,5\text{ }\mu\text{m}$  de diámetro.
- 2 Revestimiento (cladding).** Es un tubo de cristal o plástico, de distinta densidad óptica ( $n$ ) que el núcleo. Sirve para confinar la luz en el núcleo.
- 3 Color (coating).** Es un buffer o recubrimiento de plástico que sirve como *amortiguador* para proteger de daños al núcleo y al revestimiento.



### ¿Qué tan gruesa es la fibra?

La fibra óptica tiene dimensiones similares a la del cabello humano, que tiene un diámetro de  $75\text{ }\mu\text{m}$ .

Por ser dieléctrica, el ruido electromagnético no le afecta.

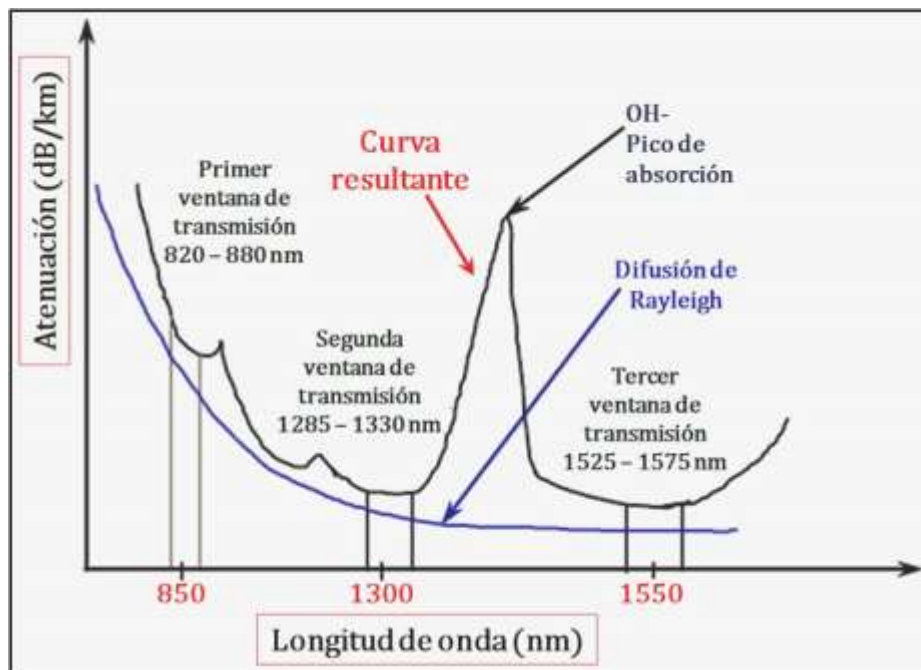
# La fibra óptica

## Ventanas de transmisión

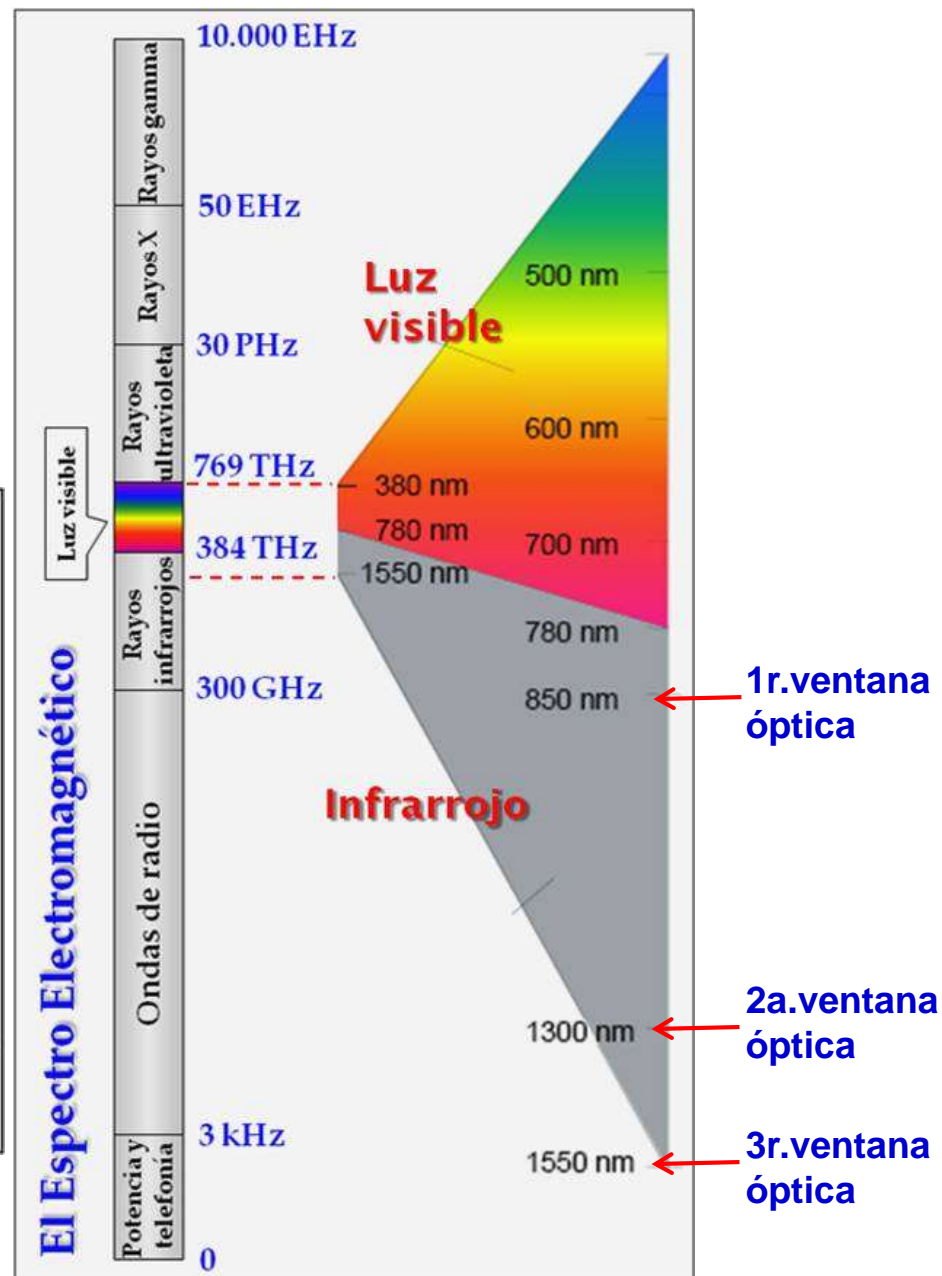
Las fibras operan dentro de un amplio intervalo de frecuencias de luz. Las longitudes de onda más comunes son **850**, **1.300** y **1.550 nm**.

## ¿Porqué estas longitudes de onda?

Porque en ellas, las fibras presentan una atenuación mínima.



Hay una cuarta ventana en desarrollo, de 1625 nm.





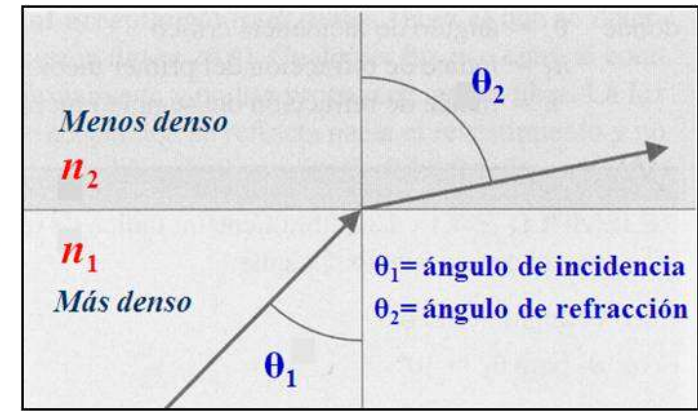
# La fibra óptica

## Física de la propagación de la luz

La luz viaja en línea recta mientras se mueve a través de un medio uniforme.

¿Qué pasa si viaja de un medio a otro diferente?

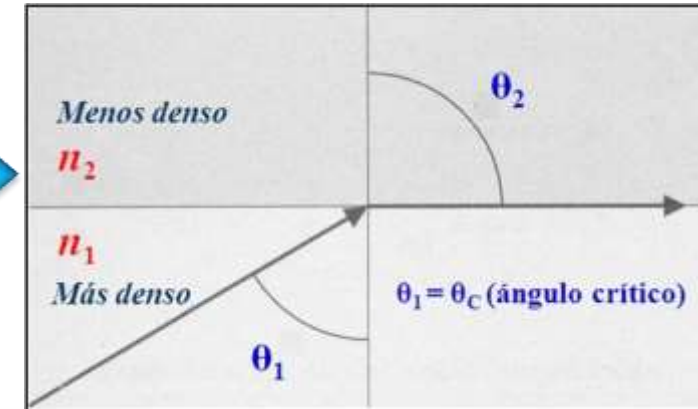
Si el rayo de luz entra a otro medio **menos denso**, cambia de dirección, sufre una **refracción**.



## El ángulo crítico

Para un determinado valor del **ángulo de incidencia** ( $\theta_1$ ) el rayo se propaga a lo largo de la frontera entre ambos medios. A este valor de  $\theta_1$  se denomina **ángulo crítico** ( $\theta_c$ ).

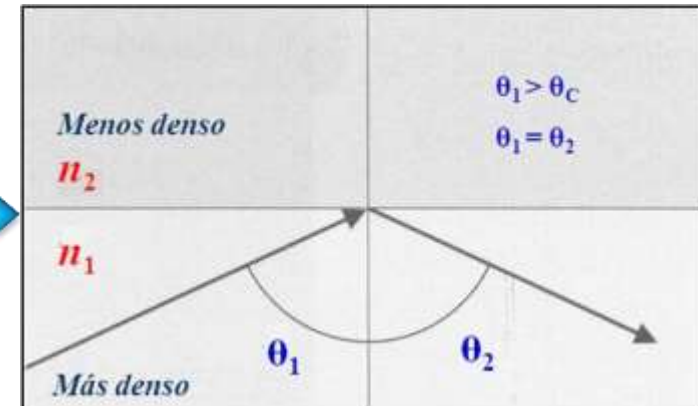
El ángulo crítico es una propiedad del medio, y su valor difiere de un medio a otro.



## Reflexión total interna

Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico ( $\theta_1 > \theta_c$ ), el rayo se **refleja** y viaja de nuevo a la sustancia más densa.

En este caso, el ángulo de reflexión es igual al incidente. Se produce la **reflexión total interna**.



# La fibra óptica

## El índice de refracción

El cambio de dirección de la luz al pasar de un medio más denso a otro menos denso, se debe a que su **velocidad aumenta**. Es común especificar el índice de refracción en vez de la velocidad.

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r}$$

$n$  = índice de refracción del medio.

$c$  = 300.000 km/s. Velocidad de la luz en el espacio libre.

$v$  = velocidad de la luz en el medio. En **km/s**.

$\epsilon_r$  = permitividad relativa del medio.

### Valores para sustancias comunes

Sustancia	Índice de refracción
Aire	1.000
Vidrio	1.523
Diamante	2.419
Agua	1.333

## Ley de Refracción de Snell

En 1626 se formula la **Ley de Snell** que establece la relación entre los **ángulos de incidencia** y de **refracción** de un rayo que incide en la frontera entre dos medios con diferentes **índices de refracción**.

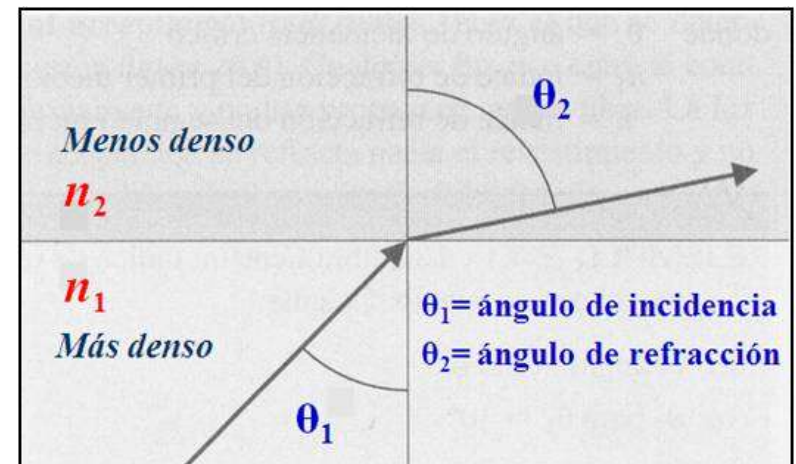
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$n_1$  = índice de refracción del medio 1.

$n_2$  = índice de refracción del medio 2.

$\theta_1$  = Ángulo de incidencia. En **°**.

$\theta_2$  = Ángulo de refracción. En **°**.



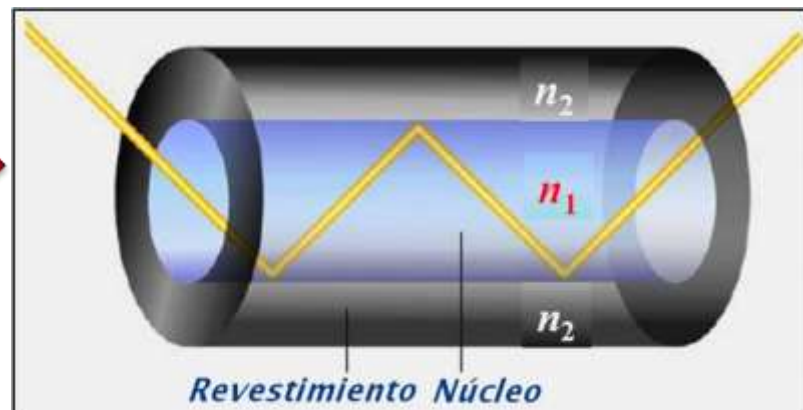
La Luz al pasar a un medio menos denso aumenta su velocidad

# La fibra óptica

## ¿Cómo trabajan las fibras ópticas?

Usan la **reflexión interna total** para llevar la luz a través del núcleo que se rodea con un revestimiento menos denso, de **menor** índice de refracción .

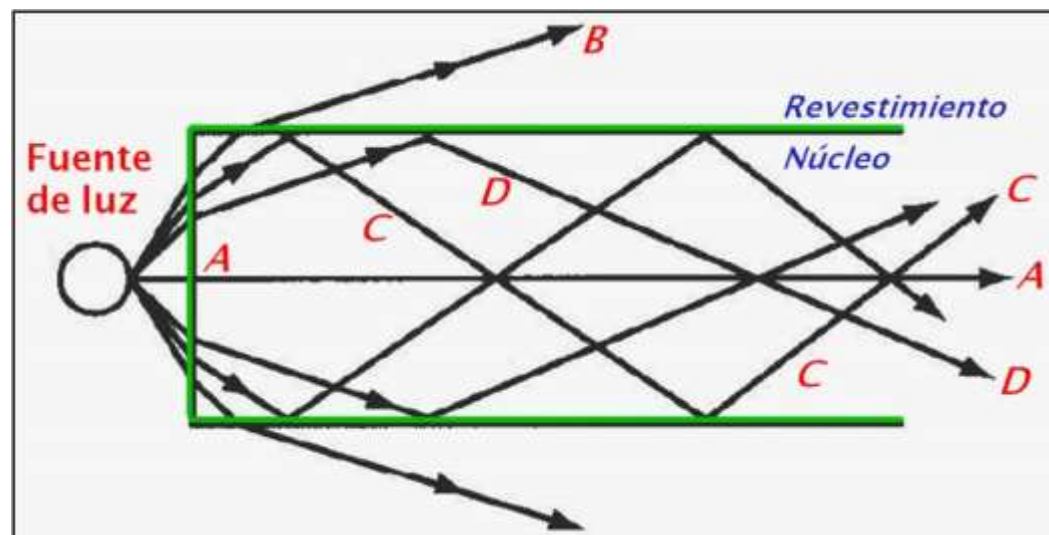
La diferencia de densidad debe ser tal que el rayo de luz que se mueve por el núcleo sea **reflejado** por el revestimiento en lugar de ser refractado.



## ¿Cómo entra la luz al núcleo de la fibra?

La **fuentes de luz** se puede posicionar de diversas maneras para que la luz entre al núcleo a diferentes ángulos.

- El **rayo A** entra en forma perpendicular a la superficie del extremo. Viaja en forma directa.
- El **rayo B** tiene un ángulo de incidencia menor que el ángulo crítico. Se produce la refracción.
- Los **rayos C y D** tienen ángulos de incidencia mayores que el crítico. Se produce la **reflexión interna total**. Los rayos rebotan entre las superficies hasta que salen por el otro extremo del núcleo.



El revestimiento confina la luz en el núcleo.

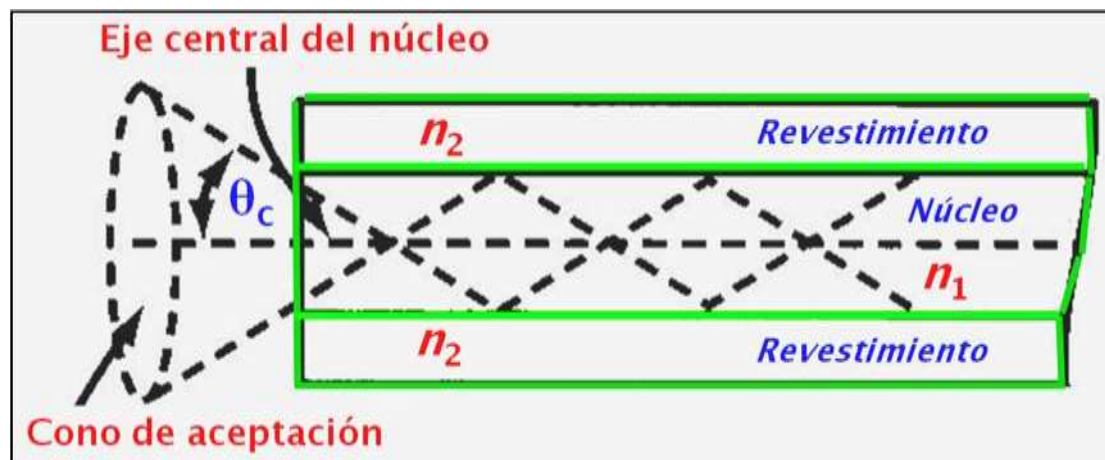


# La fibra óptica

## ¿Cómo se debe posicionar la fuente de luz?

La fuente de luz se debe posicionar de tal modo que todos los rayos entren por un **cono de aceptación** imaginario.

Si el **ángulo** del cono de aceptación, tomado a partir del eje de la fibra, es igual que el **ángulo crítico** ( $\theta_c$ ), los rayos se reflejarán internamente y se propagarán por el núcleo.



## La apertura numérica

El cono de aceptación define la **apertura numérica NA** de la fibra. Este es un número que indica el intervalo de ángulos dentro del cual trabaja la fibra.

$$NA = \sin \theta_c$$

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

**NA** = apertura numérica de la fibra.

$\theta_c$  = Ángulo crítico. En  $^\circ$ .

$n_1$  = índice de refracción del núcleo.

$n_2$  = índice de refracción del revestimiento.

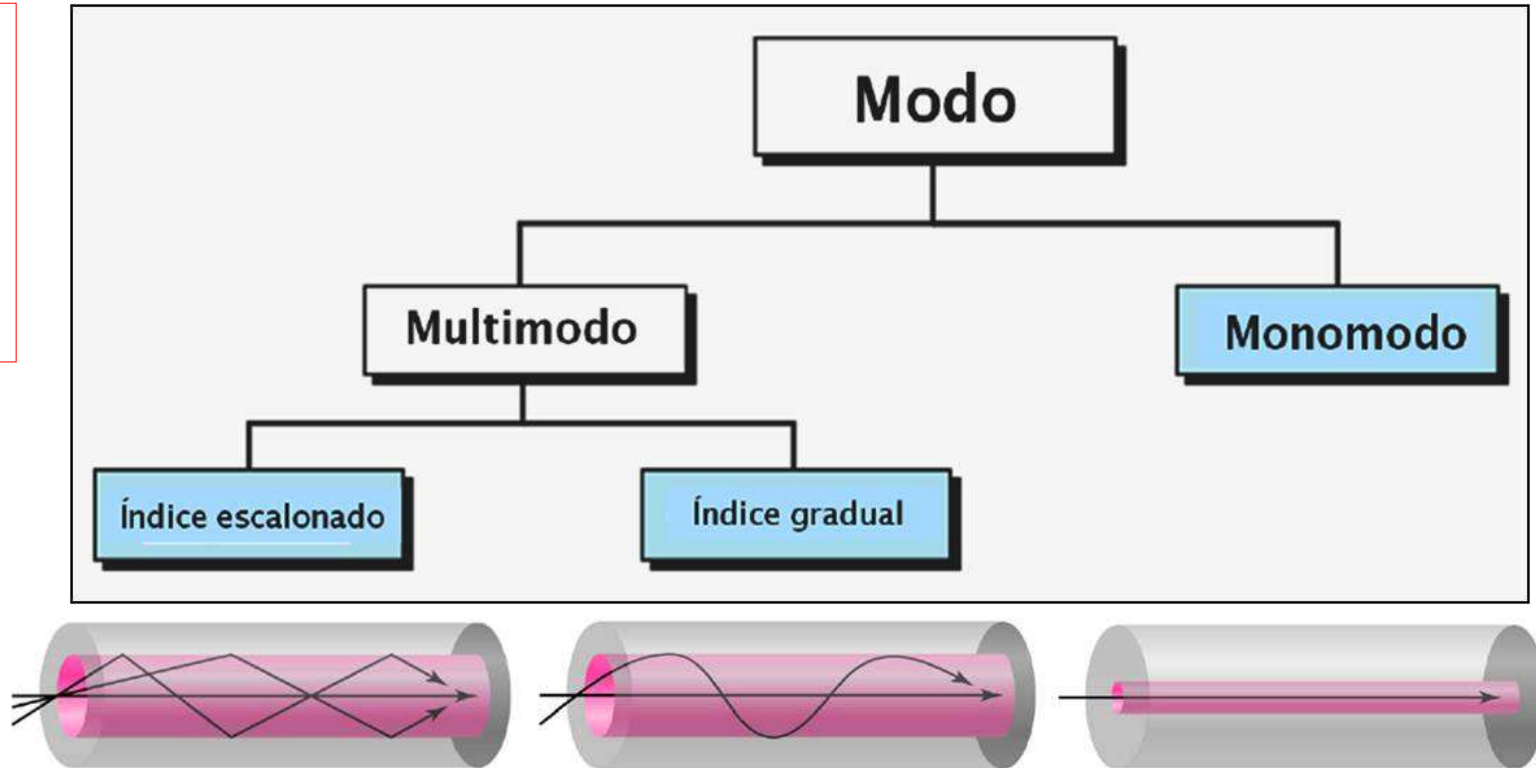
La NA típica para las fibras varía entre 0.1 y 0.5.

# 3.- Modos de propagación en la fibra

¿Cómo se propaga la luz en una fibra?

La tecnología actual proporciona dos modos de propagación de la luz a lo largo de canales ópticos: **multimodo** y **monomodo**, cada uno de los cuales necesita diferentes tipos de fibras con características específicas.

A su vez, el **multimodo** se implementa de dos maneras: índice **escalonado** e **índice gradual**.



Las fibras que posibilitan estos modos de propagación son conocidas con los **mismos nombres**.

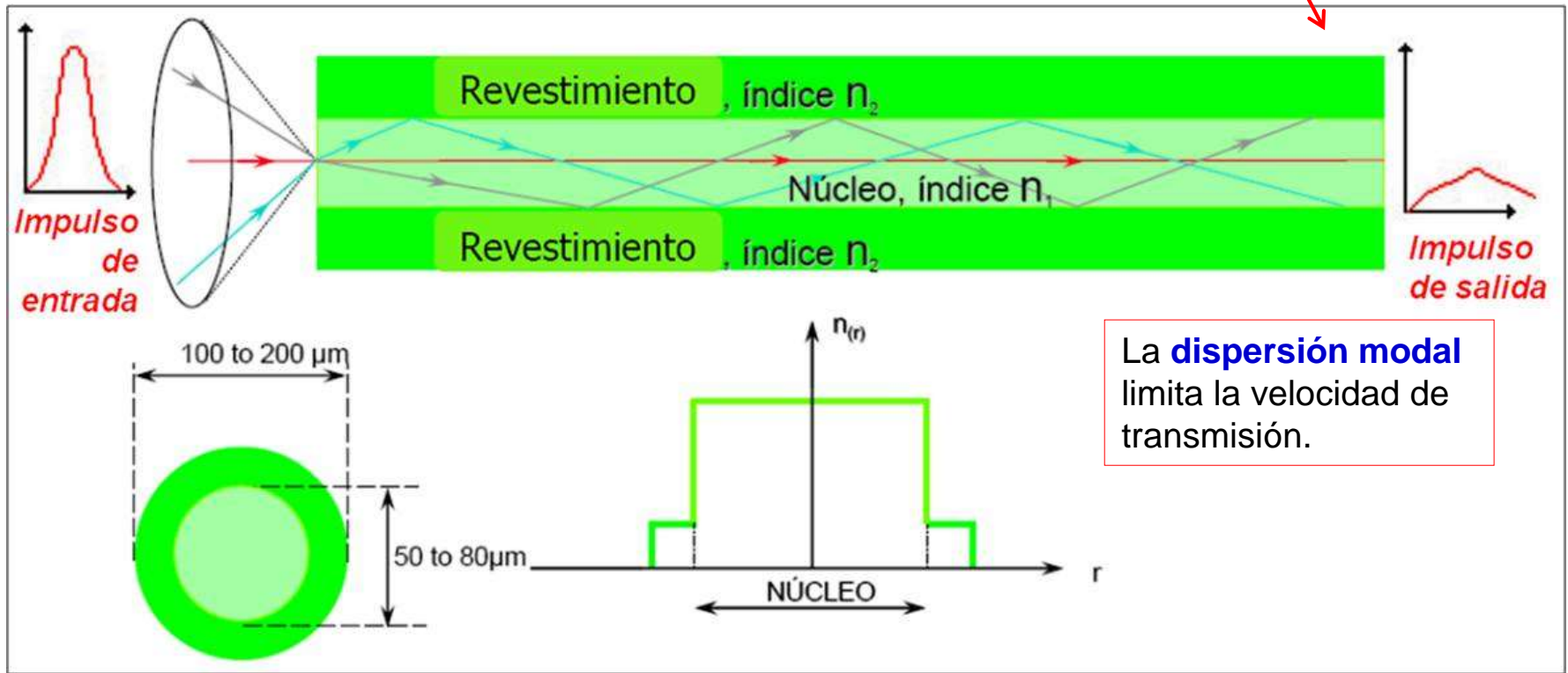
La multimodo se usa en distancias cortas.

La monomodo se usa en largas distancias.

# Fibras multimodo MM de índice escalonado

Los rayos de luz toman diferentes caminos (modos)

Los rayos de luz toman **diferentes caminos**, por eso llegan a destino en diferentes tiempos, produciendo la **dispersión modal**.



La **dispersión modal** limita la velocidad de transmisión.

La **densidad del núcleo** permanece constante desde el centro hasta sus bordes.

En la frontera el cambio es abrupto (**escalonado**) a una densidad más baja.

Esta fibra MM ya no se utiliza en telecomunicaciones.

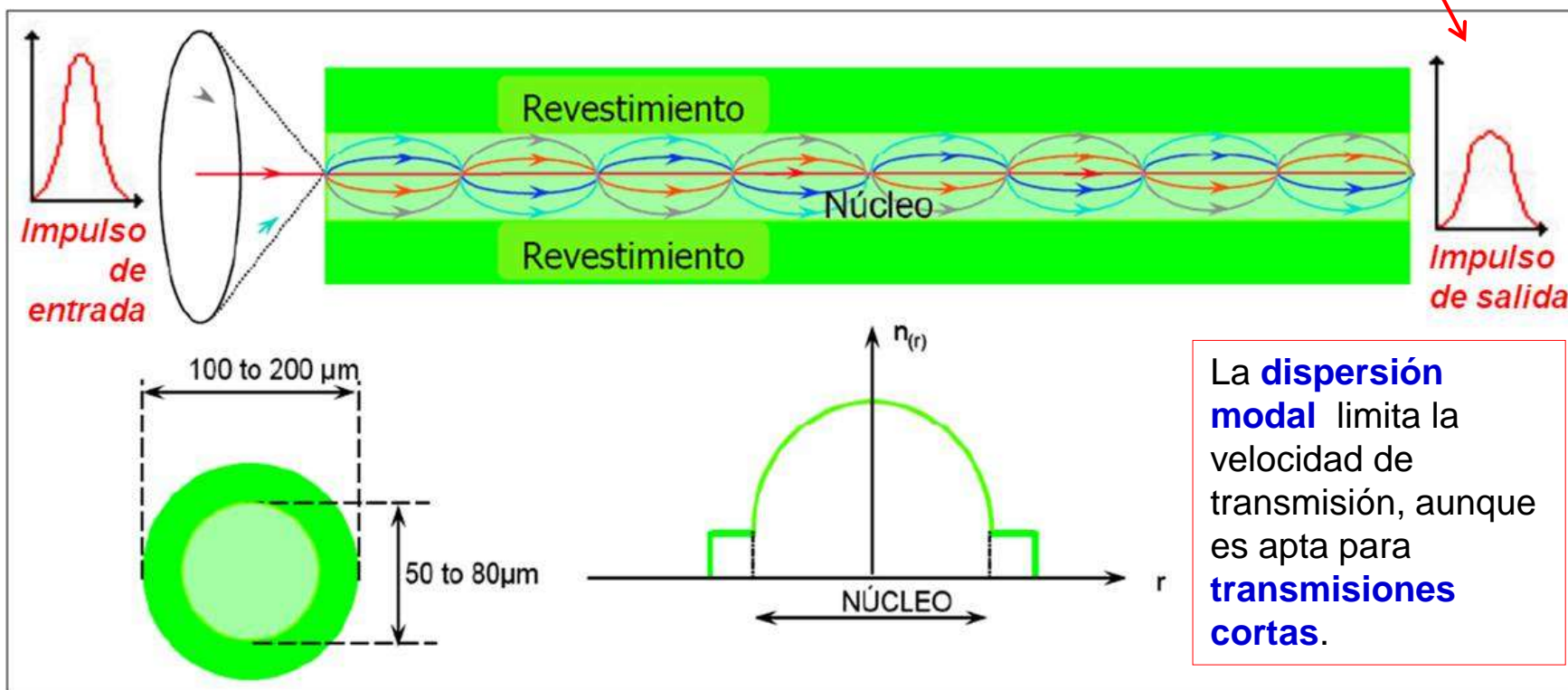
Los modos son caminos de luz.



# Fibras multimodo MM de índice gradual

Los rayos de luz toman diferentes caminos (modos)

Los rayos de luz toman **diferentes caminos** pero se mueven a diferentes velocidades, por eso llegan a destino casi al mismo tiempo, produciendo una **menor dispersión modal**.



La **densidad** es mayor en el centro del **núcleo** y decrece **gradualmente** hasta sus bordes.

En la frontera el cambio es suave (**gradual**) hacia una densidad más baja.

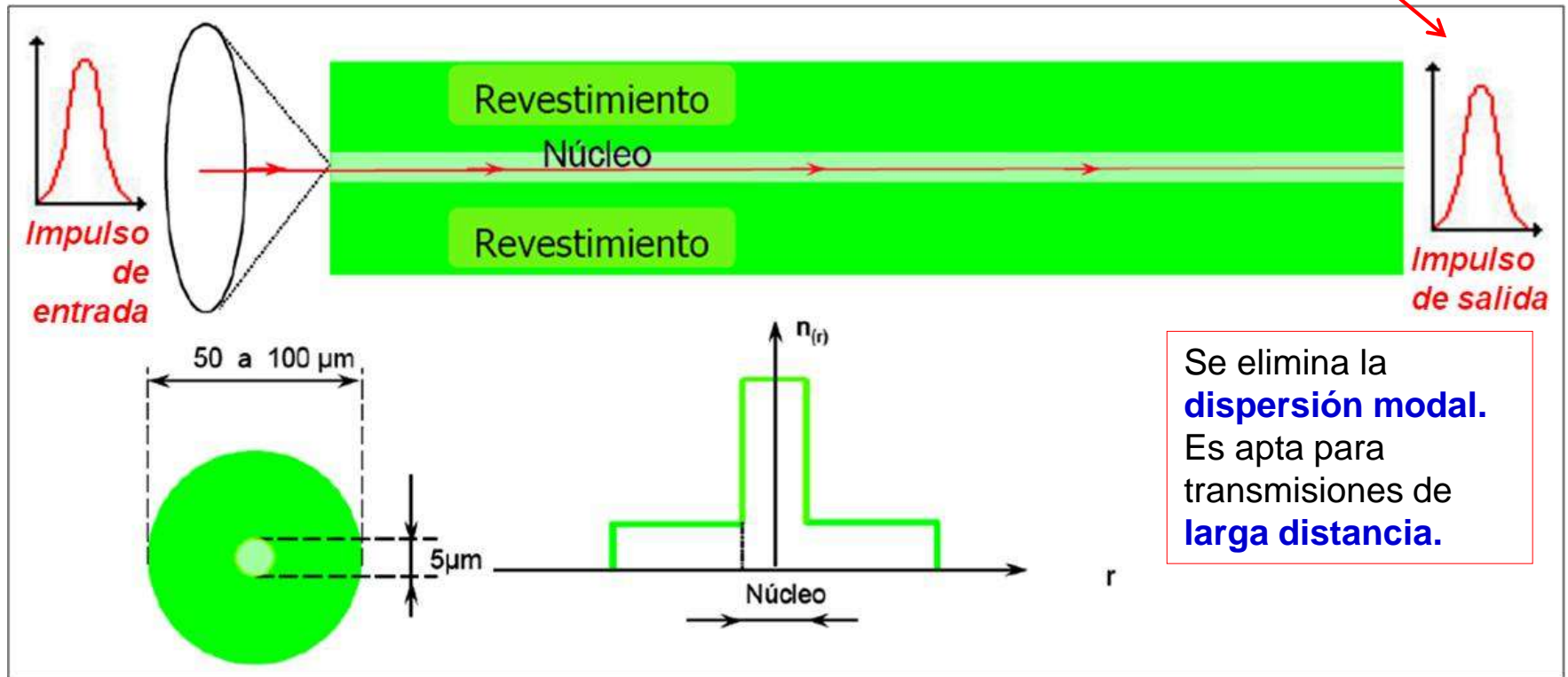
Esta fibra MM se utiliza en redes LAN y en el área industrial.

Los modos son caminos de luz.

# Fibras monomodo SM

Los rayos de luz siguen un único camino

Los rayos de luz siguen un **único camino**, por eso llegan a destino al mismo tiempo, eliminando la **dispersión modal**.



Se elimina la **dispersión modal**.  
Es apta para transmisiones de **larga distancia**.

El **diámetro** del núcleo es mucho más pequeño, y la diferencia de densidades también.

Esta menor diferencia de densidad da como resultado un ángulo crítico casi igual que **90°** para hacer que los rayos sean casi **horizontales**.

Esta fibra SM se utiliza en redes de larga distancia.

Siguen un único camino de luz.

# Especificaciones de fibra

## Fibras multimodo.

<b>FIBRAS MULTIMODO</b>			
Las fibras ópticas multimodo utilizadas en la fabricación poseen las características siguientes. Todas ellas de acuerdo con la Norma EN-188000.			
<b>CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS</b>			
<b>50-125 μm</b>			
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 ± 0,015	
<b>62,5-125 μm</b>			
Atenuación (dB/km)	850 nm (valor máximo)	3	
	1300 nm (valor máximo)	0,7	
Ancho de banda mínimo (MHz x km)	850 nm	200	
	1300 nm	600	
Apertura numérica		0,275 ± 0,015	
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>			
Diámetro de núcleo (μm)	50 ± 3	Excentricidad revestimiento	≤ 1%
	62,5 ± 2,5		
No de circularidad del núcleo	≤ 6%	Diámetro sobre 1ª protec. (μm)	245 ± 10
Diámetro del revestimiento (μm)	125 ± 2	Carga de rotura (Kpsi)	100

## Fibras monomodo.

FIBRAS MONOMODO 10-125 μm

Las fibras ópticas monomodo utilizadas en la fabricación poseen las características siguientes. Todas ellas de acuerdo con la Recomendación G-652 de U.I.T y Norma EN-188000.

CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS Y FÍSICAS

Atenuación (dB/km)		normal	máxima
	1310 nm	0,35	0,40
	1550 nm	0,21	0,25
Diámetro de campos de modo (μm)	1310 nm	9,1 ± 0,5	
	1550 nm	10,5 ± 1	
Longitud de onda de corte (fibra cableada) (nm)	≤ 1270		
Radio de curvatura mínimo (mm)	40		
Alargamiento con 700 gr/FO	≤ 1%		
PMD con fibra cableada (Ps/√km)	≤ 0,5		
Dispersión total máxima (Ps/nm x km)	1288 - 1339 nm	3,5	
	1271 - 1360 nm	5,3	
	1550 nm	18	

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS-MECÁNICAS

Diámetro revestimiento (μm)	125 ± 1	No circularidad del núcleo ca. mo. (μm)	≤ 1
No circularidad revestimiento	≤ 2%	Carga de rotura (Kpsi)	100
Concentricidad núcleo-revestimiento (μm)	≤ 0,6%	Adherencia con disolventes adecuados	
Diámetro sobre protección primaria (μm)	245 ± 10	Longitud de onda de dispersión cero (nm)	± 1311
No circularidad protección primaria	≤ 5%	Pendiente de dispersión cero (Ps/nm².km)	≤ 0,093
Error de concentricidad protección primaria (μm)	≤ 12	Long. de onda de corte (nm)	1150 - 1330

Son especificaciones de la UIT-T.

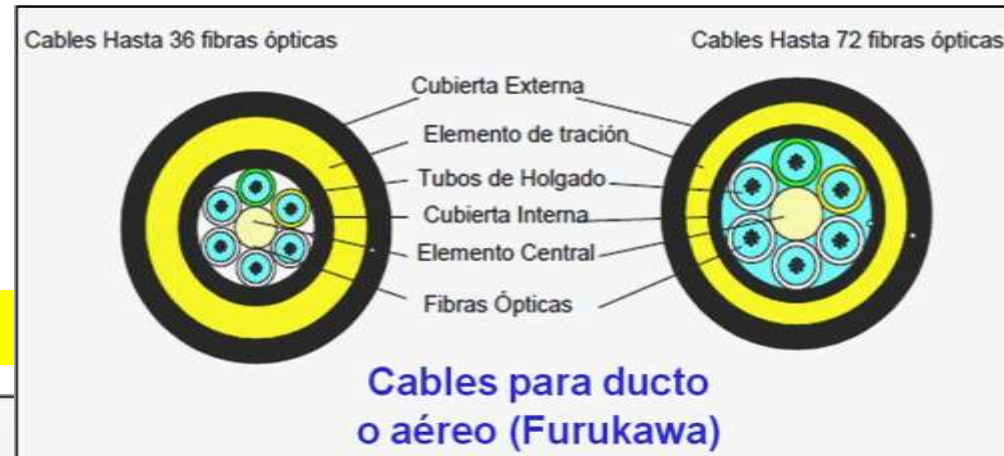
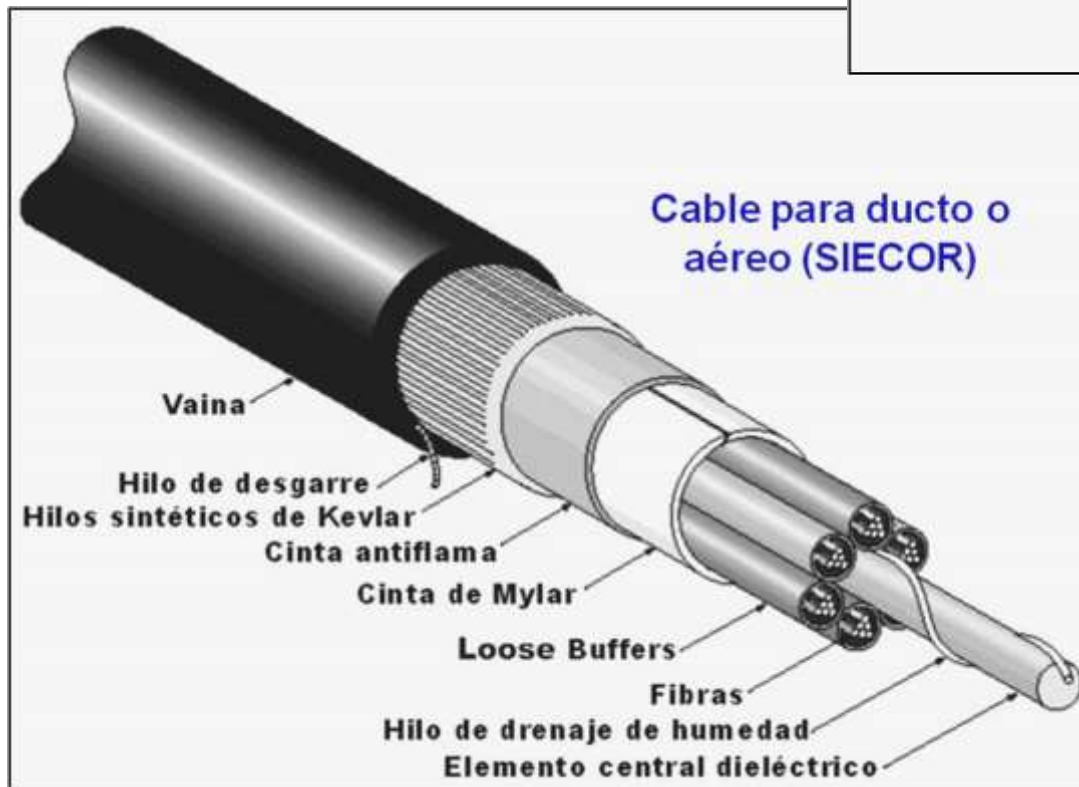


# 4.- Cable de fibra óptica

¿Cómo se construye un cable de fibra óptica?

A la **fibra óptica desnuda** (núcleo + revestimiento + color) se le agregan **protecciones** adicionales contra esfuerzos de tracción, aplastamiento y humedad.

Estructura del cable y número de fibras



El revestimiento primario que le da el **color** a cada fibra (coating) sirve como una primera protección y como elemento **identificador** de la fibra.

Cables para tendidos externos

# Código de colores para identificación

## ¿Cómo se identifican las fibras en un cable?

Para identificar cada fibra y cada grupo de fibras contenidas en los tubos buffer se utilizan diversos **códigos de colores** que varían de un fabricante a otro:

### Siemens/Corning Glasses

BUFFER	FIBRA Nº
VERDE	1 = VERDE
	2 = ROJA
	3 = AZUL
	4 = AMARILLA
	5 = GRIS
	6 = VIOLETA
	7 = MARRON
	8 = NARANJA
ROJO	9 = VERDE
	10 = ROJA
	11 = AZUL
	12 = AMARILLA
	13 = GRIS
	14 = VIOLETA
	15 = MARRON
	16 = NARANJA

Siemens/Corning utiliza 8 colores.

### Pirelli/Alcatel

	1 = AZUL
	2 = NARANJA
	3 = VERDE
	4 = MARRON
	5 = GRIS
	6 = BLANCO
	7 = ROJO
	8 = NEGRO
	9 = AMARILLO
	10 = VIOLETA
	11 = ROSA
	12 = CELESTE


Pirelli/Alcatel utiliza 12 colores.

# Código de colores para identificación

¿Cuántas fibras puede tener un cable?

En el caso de cables **Furukawa**, el código utilizado es el mismo que el de Pirelli/Alcatel. La Tabla especifica el número de fibras por tubo.



 <b>FURUKAWA INDUSTRIAL S.A. PRODUTOS ELÉTRICOS</b>		
Designación del cable	Cantidad de tubos	Número de fibras por tubo
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-06	01	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-12	02	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-18	03 (1 a 3)	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-24	04 (1 a 4)	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-30	05 (1 a 5)	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-36	06 (1 a 6)	06
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-48	04 (1 a 4)	12
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-60	05 (1 a 5)	12
CFOA-x-LV-AS-CMOy-S-72	06 (1 a 6)	12

Donde: x - corresponde al tipo de la fibra óptica (SM o NZD)  
CMO - Carga Máxima de Operación  
y - corresponde al valor de la carga máxima de operación en kN;

	1 = AZUL
	2 = NARANJA
	3 = VERDE
	4 = MARRON
	5 = GRIS
	6 = BLANCO
	7 = ROJO
	8 = NEGRO
	9 = AMARILLO
	10 = VIOLETA
	11 = ROSA
	12 = CELESTE

FIN

Un cable con 4 tubos tiene 24 fibras.

Estos cables Furukawa tienen hasta 72 fibras.