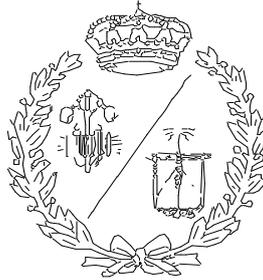


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



*Trabajo Fin de Grado*

# **‘FIBER TO THE HOME’ TECHNOLOGY**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**Autor: Javier de Celis Cuevas**

**2021/2022**



## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo profundizar y consolidar conocimientos sobre sistemas de comunicaciones ópticos, más concretamente redes de fibra óptica hasta el hogar.

El trabajo se estructura en cuatro bloques. En el primero, se desarrollarán los fundamentos y características principales de la fibra, así como los distintos tipos que se emplean en este tipo de redes. Concluyendo que, actualmente es el único medio de transmisión capaz de abastecer la demanda creciente de ancho de banda. Lo cual, nos muestra la importancia que tiene en la actualidad y sobre todo de cara al futuro.

En el segundo bloque profundizaremos en la arquitectura de redes FTTH, basadas en la tecnología GPON, es decir, empleando elementos pasivos. Explicaremos en que consiste la multiplexación de longitudes de onda, tan importante en estos sistemas de telecomunicación, permitiendo el flujo de datos de los canales de subida y de bajada entre OLT y ONT a través del mismo medio de transmisión (fibras bidireccionales).

En el tercer capítulo describimos los elementos que componen una red óptica, con el splitter como dispositivo estrella de este tipo de redes, permitiendo compartir el mismo cable en el tramo de aproximación desde la central telefónica a los usuarios, reduciendo así considerablemente los gastos.

Por último, nos centraremos en aspectos relevantes a la hora de diseñar una red, diferenciando entre diversas áreas de actuación, que determinará el tipo de arquitectura empleada, así como los tendidos del cableado más adecuados. Diseñar una red, como cualquier proyecto de ingeniería, consiste en hacerlo de la manera más eficiente posible, tratando de dar el mejor servicio al menor coste, por lo que siempre, se tenderá a utilizar infraestructura existente para reducir los enormes costes de inversión que suponen estas redes. En cualquier caso, es necesario realizar un buen estudio de mercado para reducir riesgos, y este entre otras cosas, nos indica que en el futuro cercano los sistemas de comunicaciones se basarán en FTTH, por lo que, tenemos que considerar siempre la posibilidad de que la red vaya a crecer, y anticiparnos a ello, dejándola preparada para posibles ampliaciones futuras. Este aspecto es principalmente el que determina a las redes arboladas generalmente como la mejor opción, debido a su flexibilidad.

## **ABSTRACT**

The purpose of this Bachelor's thesis is to deepen and to consolidate knowledge about optical communication systems, in particular, fiber-optic networks to the home.

The work is divided in four blocks. In the first one the fundamentals and main characteristics of the fiber optic are explained. Additionally, It is also described the different types of fiber used in this type of networks, getting to the conclusion that fiber optic is currently the only transmission medium capable of satisfying the growing demand in broadband. This fact shows us the present and future importance of the fiber optic.

In the second block we will get into the architecture of FTTH networks, based on GPON technology, that is, the ones using passive elements. We will explain what is the multiplexing of wavelengths, a technique of high importance in these telecommunication systems because allows the data flow of the up and down channels between OLT and ONT by the same transmission medium (bidirectional fibers).

In the third chapter we will describe the elements that form an optical network, with the splitter as the essential device of this type of networks since allows the cable sharing in the approaching section from the telephone exchange to the users, thus considerably reducing expenses.

Finally, we will focus on relevant aspects when designing a network. We will distinguish among the different areas of action which determine the type of architecture used, as well as the most appropriate wiring lines. Designing a network, like any other engineering project, must be done in the most efficient way possible, trying to give the best service at the lowest cost. So whenever it is possible, the existing infrastructure should be used to reduce the enormous costs of investment these networks imply. Anyway, it is necessary to conduct a good market study to reduce risks. The market study of this thesis indicates, among other things, that in the near future communication systems will be based on FTTH, so we must always consider the possibility that the network grows, and we must anticipate to this fact by preparing the network for possible extensions. This aspect mainly determines the tree networks as the best option in general due to its flexibility.

## **RESUME**

Lo scopo di questo progetto di laurea è quello di approfondire e consolidare la conoscenza dei sistemi di comunicazione ottica, in particolare delle reti in fibra ottica per la casa.

Il lavoro è strutturato in quattro blocchi. Nel primo verranno sviluppate le basi e le caratteristiche principali della fibra, nonché i diversi tipi utilizzati in questo tipo di reti, concludendo che attualmente è l'unico mezzo di trasmissione in grado di soddisfare la crescente domanda di banda larga. Il che ci mostra l'importanza che ha oggi e soprattutto per il futuro.

Nel secondo blocco approfondiremo l'architettura delle reti FTTH, basate sulla tecnologia GPON, ovvero utilizzando elementi passivi. Spiegheremo che cos'è il multiplexing delle lunghezze d'onda così importante in questi sistemi di telecomunicazione, consentendo il flusso di dati dei canali su e giù tra OLT e ONT dallo stesso mezzo di trasmissione (fibre bidirezionali).

Nel terzo capitolo descriviamo gli elementi che compongono una rete ottica, con lo splitter come dispositivo stellare di questo tipo di reti, che consente di condividere il cavo nella sezione di approccio dalla centrale telefonica agli utenti, riducendo così notevolmente le spese.

Infine, ci concentreremo sugli aspetti rilevanti nella progettazione di una rete, differenziando le diverse aree di azione, che determineranno il tipo di architettura utilizzata, nonché il percorso del cavo più appropriato. Progettare una rete, come qualsiasi progetto di ingegneria, consiste nel farlo nel modo più efficiente possibile, cercando di fornire il miglior servizio al minor costo, quindi, quando possibile, tenderà a utilizzare l'infrastruttura esistente per ridurre gli enormi costi di investimento che queste reti implicano. In ogni caso, è necessario condurre un buon studio di mercato per ridurre i rischi, questo tra l'altro indica che nel prossimo futuro i sistemi di comunicazione saranno basati su FTTH, quindi dobbiamo sempre considerare la possibilità che la rete vada a crescere, e anticiparlo, lasciandolo pronto per eventuali future espansioni. Questo aspetto è principalmente quello che determina generalmente le reti ad albero come l'opzione migliore, grazie alla sua flessibilità.



## ÍNDICE

<b>LISTA DE ACRÓNIMOS.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1. EL CANAL DE TRANSMISIÓN. LA FIBRA ÓPTICA.....</b>	<b>14</b>
1.1 INTRODUCCIÓN A LOS MEDIOS GUIADOS .....	14
1.2 PARTES DE LA FIBRA ÓPTICA .....	17
1.3 FUNDAMENTOS DE LA FIBRA ÓPTICA .....	19
1.4 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA.....	24
1.5 PÉRDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA.....	28
<b>2. TECNOLOGÍA FTTH.....</b>	<b>34</b>
2.1 INTRODUCCIÓN AL SISTEMA FTTx.....	34
2.2 ARQUITECTURA FTTH. ....	38
2.3 MULTIPLEXACIÓN .....	46
2.4 SISTEMA OPEN FIBER.....	49
2.5 HERRAMIENTAS DE DISEÑO .....	56
<b>3. ELEMENTOS DE LA RED ÓPTICA .....</b>	<b>58</b>
3.1 TRANSMISORES Y RECEPTORES ÓPTICOS .....	58
3.2 CONEXIONES Y EMPALMES ÓPTICOS .....	65
3.3 SPLITTERS .....	71
3.4 AMPLIFICADORES Y FILTROS ÓPTICOS .....	73
3.5 OTROS ELEMENTOS DE LA RED .....	76
<b>4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA RED .....</b>	<b>81</b>
4.1 ÁREA DE ACTUACIÓN.....	81
4.2 TENDIDO DE LA RED .....	86
4.3 PERMISOS Y DERECHOS DE PROPIEDAD .....	91
4.4 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE F.O. EN EL EDIFICIO .....	93

<b>4.5 BALANCE DE POTENCIA .....</b>	<b>97</b>
<b>4.6 MEDICIONES Y MANTENIMIENTO DE LA FIBRA .....</b>	<b>99</b>
<b>4.7 SERVICIOS DE ABONADO .....</b>	<b>104</b>
<b>4.8 ESTUDIO DE MERCADO Y EVALUACIÓN FINANCIERA .....</b>	<b>106</b>
<b><i>Estándares de fibra óptica .....</i></b>	<b>109</b>
<b><i>AGRADECIMIENTOS .....</i></b>	<b>111</b>
<b><i>BIBLIOGRAFÍA .....</i></b>	<b>112</b>

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL: Asymmetric Digital Subscriber Line. (Línea de abonado digital asimétrica)

ADSS: All Dielectric Self Supported (Todo dieléctrico autosoportado)

AES: Advanced Encryption Standard (Esquema de cifrado por bloques)

AMD: Advanced Micro Devices (Compañía estadounidense de semiconductores)

AN: Numerical Aperture (Apertura Numérica)

APC: Angled PC (Contacto físico de ángulo)

APD: Avalanche Photodiode (Fotodiodo de avalancha)

A-PON: Asynchronous Transfer Mode PON (Modo de transferencia asíncrona)

BIF: Bend Insensitive Fiber (Fibra insensible a las curvaturas)

BPON: Broadband PON (Red óptica pasiva de banda ancha)

CPM: Critical Path Method (Método del camino crítico)

CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por división aproximada de longitud de onda)

DSF: Dispersion Shifted Fiber. (Fibra de dispersión desplazada)

DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexado denso por división de longitudes de onda)

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier (Amplificador de fibra dopada de erbio)

EIA: Electronics Industry Association (Alianza de industrias electrónicas)

EPON: Ethernet PON. (Red óptica pasiva para Ethernet)

FBT: Fused Biconic Taper (Acoplador/ divisor de fibra)

FC: Ferrule Connector. (Conector de Férula)

FO: Fiber Optical. (Fibra óptica)

FTP: File Transfer Protocol. (Protocolo de transferencia de ficheros)

FTTA: Fiber To The Antenna. (Fibra hasta la antena)

FTTB: Fiber To The Building. (Fibra hasta el edificio)

FTTC: Fiber To The Curb. (Fibra hasta la acera)

FTTCab: Fiber To The Cabinet. (Fibra hasta la cabina)

FTTH: Fiber To The Home. (Fibra hasta el hogar)

FTTN: Fiber To The Node. (Fibra hasta el nodo)

FTTO: Fiber To The Office. (Fibra hasta la oficina)

FTTP: Fiber To The Premises. (Fibra óptica hasta las instalaciones)

FTTU: Fiber To The User. (Fibra para el usuario)

FTTx: Fiber To The x. (Genérico que designa cualquier acceso de banda ancha sobre fibra óptica que sustituya total o parcialmente el cobre del bucle de acceso)

FWA: Fixed Wireless Access (Acceso inalámbrico fijo)

FWM: Four Wave Mixing (Mezcla de cuarta onda)

GARR: Grupo per l'Armonizzazione delle Reti della Ricerca (Red informática italiana para universidades e investigación)

GPON: Gigabit PON. (Red óptica pasiva con capacidad de Gigabit)

HDTV: High Definition Television (Televisión de alta definición)

HFC: Hybrid Fiber-Coaxial. (Fibra híbrida coaxial)

ICT: Infraestructura Común de Telecomunicaciones

IEEE: Institute of electrical and electronics engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y de Electronicos)

Intel: Integrated Electronics (Electrónica Integrada)

ISO: International Standards Organization (Organización internacional para la estandarización)

ITU: International Telecommunication Union (Unión internacional de telecomunicaciones)

ITU-T: International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Union

LAN: (Redes de área local)

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

LC: Lucent Connector. (Conector pequeño)

LEAF: Large Effective Area Fiber (Fibra de gran área efectiva)

LED: Light Emitting Diode. (Diodo emisor de luz)

LNA: Launch Numerical Aperture (Apertura numérica de lanzamiento)

LTE: Long Term Evolution. (Evolución a largo plazo)

LWPF: Low Water Peak Fiber (Fibra con el pico de agua reducido)

MAN: Metropolitan Area Network (Redes de área metropolitana)

MMF: Multi-mode Optical Fiber (Fibra multimodo)

NZ-DSF: Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (Fibra desplazada por dispersión no nula)

ODF: Fiber Optic Distributor (Distribuidor de fibras ópticas)

ODN: Optical Distribution Networ. (Red de distribución óptica)

OLT: Optical Line Termination. (Terminal de línea óptica)

ONT: Optical Network Termination. (Terminal de red óptica)

ONU: Optical Network User (Unidad de red óptica)

OTDR: Optical Time Domain Reflectometry (Reflectómetro de dominio temporal óptico)

P2P: Point-to-point Communication (Red punto a punto)

P2MP: Point-to-Multipoint Communication (Red punto a multipunto)

P-OLT: Provider OLT (Proveedor OLT)

PAU: Punto de Acceso al Usuario

PC: Physical Contact (Contacto físico)

PFP: Punto di Flessibilità Primario

PIN: Positive-Intrinsic-Negative (Positivo-Aislante-Negativo)

PLC: Power Line Communication (Comunicaciones mediante línea de potencia)

PMD: Polarization Mode Dispersion. (Dispersión por polarización del modo)

PMMA: Polimetilmetacrilato. (Metacrilato óptico)

PNI: Physical Network Inventory

POF: Plastic Optical Fiber. (Fibras ópticas plásticas)

PON: Passive Optical Network. (Red óptica pasiva)

PoP: Point of Presence (Punto de presencia/ conexión de línea telefónica)

PPV: Pay Per View (Pago por visión)

PTA: Punto di Terminazione Avanzato  
PVC: Policloruro de vinilo  
QGIS: Quantum GIS (Sistema de Información Geográfica)  
RITI: Recinto de Infraestructura de Telecomunicación Inferior  
SBS: Stimulated Brillouin Scattering (Dispersión de Brillouin)  
SC: Subscriber Connector. (Conector de suscriptor)  
SFP: Small Formfactor Pluggable transceptor (Transceptor de factor de forma pequeña conectable)  
SMA: Sub. Miniature A. (Conector sub. miniatura A)  
SMF: Standar Single Mode Fiber. (Fibra monomodo)  
SNR: Signal to Noise Ratio (Relación señal ruido)  
SOA: Semiconductor Optical Amplifier (Amplificador óptico basado en dispositivos semiconductores)  
SPM: Self Phase Modulation. (Modulación de fase cruzada)  
SRS: Stimulated Raman Scattering (Dispersión de Raman)  
ST: Straight Tip. (Punta recta)  
STP: Spanning Tree Protocol. (Protocolo de árbol de expansión)  
TDM: Time Division Multiplexing. (Multiplexación por división de tiempo)  
TDMA: Time Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de tiempo)  
UI: Unità immobiliare (Unidad inmobiliaria)  
UPC: Ultra Physical Contact (Contacto ultra físico)  
UTP: Unshielded Twisted Pair. (Par trenzado no blindado)  
UV: Ultravioleta cercana  
V-OLT: Video OLT  
VCR: Video Cassete Recorder (Grabador de cintas de video)  
VoD: Video on Demand (video a la carta)  
VOIP: Voice Over Internet Protocol (Voz sobre Protocolo de Internet o Telefonía IP)  
WDM: Wavelength de longitud de onda. (Multiplexación por división de longitud de onda)  
WLAN: Wireless Local Area Network (Red de Área Local Inalámbrica)

## INTRODUCCIÓN

Comenzaremos haciendo una breve descripción de lo que se conoce como FTTH (Fiber To The Home) o fibra hasta el hogar, sobre la que escuchamos hablar a menudo en los anuncios de las grandes compañías telefónicas.

La denominada FTTH es la tecnología empleada actualmente por las operadoras de telecomunicaciones para ofertar a sus usuarios los servicios de internet de banda ancha, telefonía y televisión, de la forma más avanzada hasta el momento. Esto surge de la creciente demanda de mayor volumen de información (datos, video, streaming...) y el deseo de navegar a mayor velocidad. Para satisfacer estas necesidades de los usuarios se empieza a suplantar el ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) que emplea cable de pares simétricos de cobre, por la fibra óptica. Esto ha sucedido sobre todo en las ciudades, y se está desarrollando actualmente en los pequeños municipios.

Como indica su nombre, las FTTH se basan en el uso de la fibra óptica como canal para la transferencia de datos, el cual se emplea desde la central de la operadora hasta el router de nuestro hogar. Esto último es lo que la diferencia de otras arquitecturas que emplean también fibra óptica pero no en toda la red global, y sobre las que hablaremos posteriormente.

De esta manera se consigue que los servicios ofrecidos con FTTH cumplan perfectamente con las exigencias actuales y tengan capacidad para permanecer siendo útiles en el futuro próximo. Además, será la única solución de las conocidas actualmente, a la demanda de servicios que se tendrá en el futuro cercano, de aquí la gran importancia del estudio y desarrollo de las redes FTTH.

A continuación, vamos a ver cómo se encuentra el panorama actual de la fibra en Europa. En la siguiente gráfica podemos observar el porcentaje de utilización de la fibra óptica entre las distintas opciones, en los países europeos donde más implantada está. Diferencia por colores los usuarios de la fibra hasta el hogar con los usuarios de fibra que llega hasta el edificio.

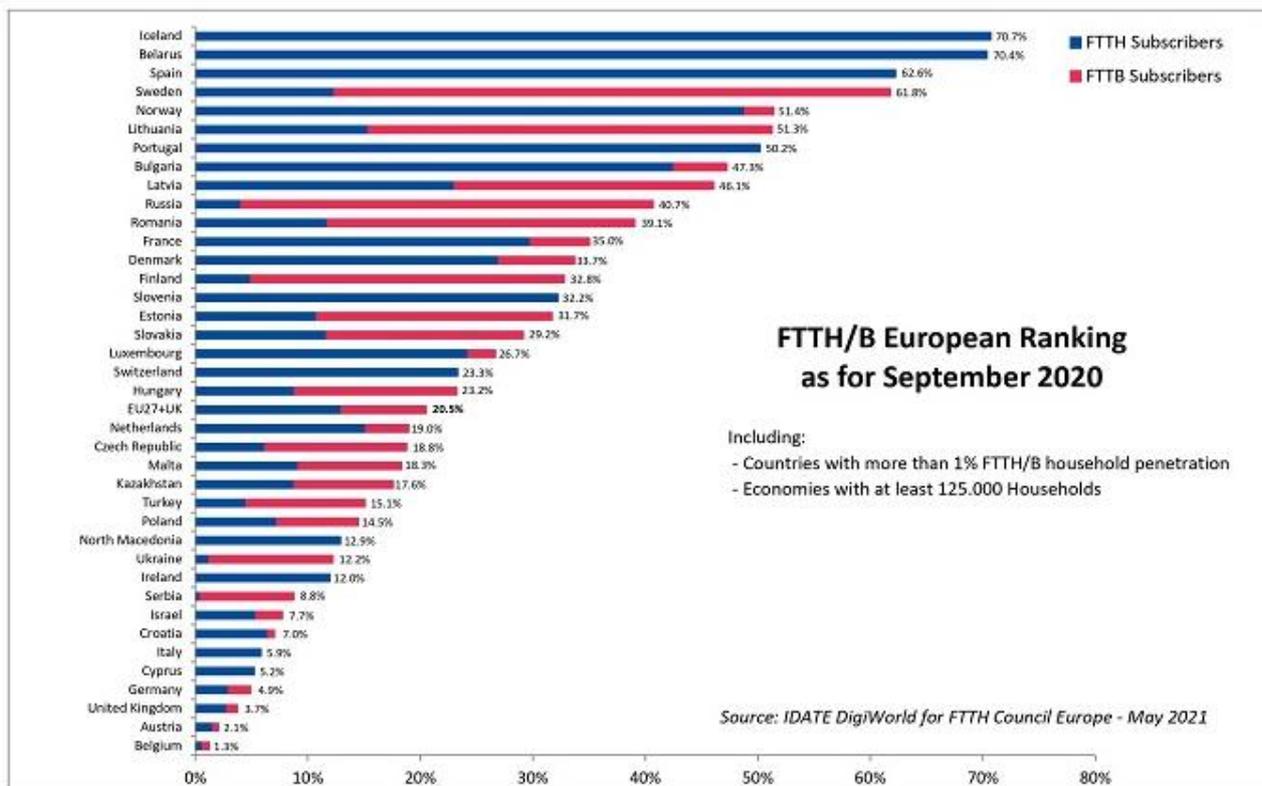


Figura 1. Gráfico estadístico de los países europeos con mayor índice de penetración de la fibra

Cabe tener en consideración que, la gráfica es de septiembre de 2020, por lo que, en general han aumentado dichos porcentajes debido a la expansión actual de este canal de transmisión. Como ya sabemos, el mundo de las tecnologías evoluciona de manera muy rápida.

En términos absolutos aproximadamente 182,6 millones de hogares de la Unión Europea tienen cobertura de fibra, superando así la mitad del total de hogares actualmente.

Podemos ver que en España aproximadamente el 62.6% de los hogares están ya abonados a la banda ancha de fibra, y que en su totalidad les llega el cable hasta su hogar. Se espera por otra parte tener una cobertura de fibra total en el país en el 2022.

Mientras que países históricamente fuertes en cobre como Italia, Alemania o Reino Unido no superan el 6% de penetración con fibra. No obstante, en los últimos años están teniendo un gran crecimiento, e irá aumentando considerablemente su uso de redes FTTH/B.

Para mejorar la situación actual de Italia, se ha apostado por las redes de banda ancha basadas en fibra, a través del proyecto Open Fiber del que hablaremos.

## 1. EL CANAL DE TRANSMISIÓN. LA FIBRA ÓPTICA

El canal de transmisión es la parte fundamental de una red de telecomunicaciones, debido a que, se encarga de transportar la información desde el emisor al receptor. Las características más importantes para tener en cuenta serán el ancho de banda, la velocidad de transmisión (Kbps), las pérdidas, el nivel de ruido y las interferencias que sufre. Las interferencias aparecen cuando hay dos señales trabajando en frecuencias muy próximas, por lo que, conviene apantallar el cable.

Como ya hemos dicho, la fibra óptica es el medio de transmisión más avanzado que tenemos hasta el momento, debido principalmente por el gran ancho de banda que tiene, lo cual permite una mayor velocidad de transmisión. El ancho de banda es la capacidad de transmisión de información (limitado por la dispersión o ensanchamiento del pulso).

### 1.1 INTRODUCCIÓN A LOS MEDIOS GUIADOS

Confrontaremos las características para ver las diferencias entre los tres tipos de medios guiados más utilizados actualmente: fibra, cable coaxial y par trenzado.

- **Cable Coaxial:** Transporta señales eléctricas de alta frecuencia. Se compone de un conductor central (núcleo), formado por un alambre sólido o varios hilos de cobre retorcidos, una capa aislante (dieléctrico), una malla conductora que sirve de referencia de tierra y retorno de las corrientes, y una cubierta aislante para protección.

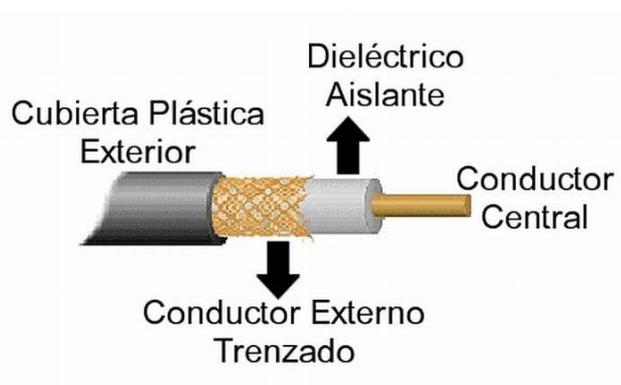


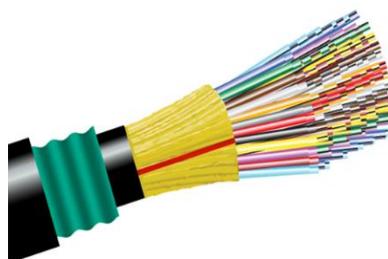
Figura 2. Composición genérica de cable coaxial

- **Par Trenzado:** Son dos alambres, generalmente de cobre, aislados y trenzados de forma helicoidal. Esta forma trenzada es la que facilita la reducción de las interferencias eléctricas, ya que se cancelan las ondas de diferentes vueltas. Un cable normalmente está formado por cuatro pares trenzados. En función del apantallamiento existen varios tipos:
  - UTP: Par trenzado sin blindaje, no tienen ninguna pantalla conductora, son los más sencillos.
  - FTP: tiene un apantallamiento global para protegerse contra campos magnéticos externos.
  - STP: Par trenzado blindado, además del apantallamiento global, contiene 4 apantallamientos individuales para cada uno de los pares.



*Figura 3. Tipos de cable de par trenzado*

- **Fibra óptica:** Es un filamento muy fino de vidrio o materiales plásticos, que transmite la información mediante rayos ópticos. Por lo tanto, no sufre de interferencias electromagnéticas. Posteriormente profundizaremos más en este canal.



*Figura 4. Aspecto de un cable de fibra*

A continuación, comparamos algunas características de estos medios de transmisión guiados, de una forma más visual. Los valores indicados son aproximativos, ya que dependen de varios factores como el material, el ancho de banda, tamaño del núcleo, etc.

Tabla 1. Comparación de las principales características de los medios guiados

	Cable	Par Trenzado			Fibra
	Coaxial	UTP	FTP	STP	Óptica
<b>Tipo transmisión</b>	Electricidad	Electricidad	Electricidad	Electricidad	Luz guiada
<b>Longitud máx.</b>	Medianas	Cortas	Cortas	Cortas	Largas
<b>Inmunidad a interferencias electromagnéticas</b>	Si	No	Baja	Si	Si
<b>Resistente y robusta al manipulado</b>	Si	Si	Si	Si	No
<b>Velocidad</b>	10 Mbps	100 Mbps	100 Mbps	100 Mbps	2.5 Gbps
<b>Precio</b>	~0.60 €/m	~0.5 €/m	~0.55 €/m	~0.60 €/m	~0.80 €/m

### Ventajas y desventajas

Las principales ventajas que presenta la fibra con respecto a los otros medios guiados son el gran ancho de banda que tiene, la transmisión de datos de alta velocidad o la posibilidad de conexión directa entre la central y los usuarios finales. Además, el cable de fibra es más ligero, flexible y ocupa menos espacio. Como vemos en la tabla anterior, es inmune a las interferencias electromagnéticas y puede transportar grandes cantidades de tráfico agrupando hilos de F.O. Por último, se debe destacar que es un canal seguro, donde una intrusión se detecta fácilmente debido al debilitamiento de la intensidad luminosa en el receptor, y no radia nada al exterior posibilitando su uso en aplicaciones que requieran confidencialidad.

En cuanto a las desventajas que presenta este canal, encontramos el alto costo que requiere, la fragilidad de las fibras y la dificultad tanto para empalmar, como para reparar un cable roto.

## 1.2 PARTES DE LA FIBRA ÓPTICA

Definiremos la fibra óptica de una forma sencilla como un hilo transparente de vidrio o plástico por el cual se envían pulsos de luz. Estos son los que representan la señal que se desea transmitir.

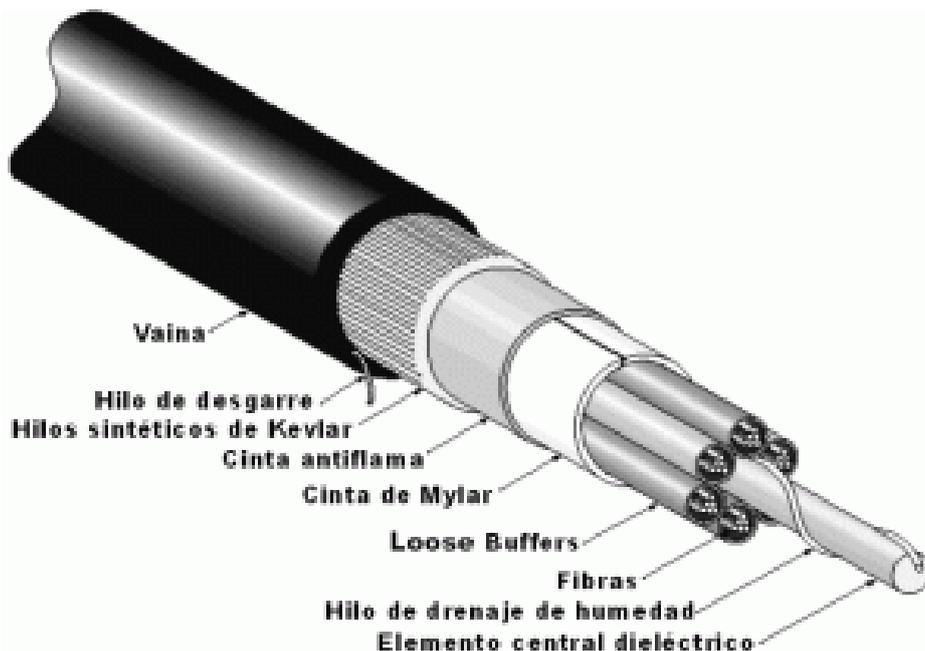
Cada hilo de fibra está compuesto por tres partes generales que todos contienen, y cada cable de FO puede contener una o más fibras de vidrio. Al tratarse de cilindros, para el dimensionamiento de estas partes se utiliza el diámetro.

- Núcleo (Core): es la sección central, por donde se propaga la luz. Tiene el mayor índice de refracción y su tamaño es del orden de  $\mu\text{m}$ .
- Revestimiento (Cladding): es la parte que recubre el núcleo y evita que los haces de luz salgan de este, debido a que tiene un índice de refracción menor al del núcleo.
- Cubierta (Buffer): parte externa que envuelve al revestimiento con el objeto de proteger a la fibra, frente a daños mecánicos o circunstancias ambientales que puedan dañarla, como por ejemplo la humedad.

Acabamos de ver los tres bloques en los que se puede dividir la FO de forma general, pero cada tipo de fibra puede mostrar variaciones no solo de tamaño, sino también en la presencia de diferentes componentes que vamos a enumerar a continuación. El orden de estos es según nos los podemos encontrar desde el interior del cable óptico hasta el exterior.

1. Dieléctrico: Filamento central que no conduce la electricidad, ayuda a dar consistencia al cable.
2. Hilo de drenaje de humedad: Tiene el objetivo de recoger la posible humedad que haya en el cable para que no afecte a las fibras.
3. Fibras: La parte fundamental del cable, transporta la información y pueden ser de vidrio o materiales plásticos muy procesados.
4. Loose Buffers: Son pequeños tubos en cuyo interior se encuentran las fibras, evitan que los rayos de luz no se dispersen hacia afuera del cable en caso de pérdidas.

5. Cinta de Mylar: capa fina de poliéster que funciona como aislante.
6. Cinta antillama: protege al cable del calor.
7. Hilos Kevlar: Aportan gran protección y consistencia al cable, ya que son muy resistentes, soportan el estiramiento, y sobre todo aguantan muy altas temperaturas sin descomponerse (material ignífugo).
8. Hilo de desgarro: Hilos que ayudan a la consistencia del cable.
9. Vaina: La parte más externa del cable que proporciona el aislamiento al interior.



*Figura 5. Composición de un cable de fibra óptica*

En función de las condiciones en las que se va a instalar y la aplicación que se quiera dar a la fibra, será necesario o no, que contengan algunos de estos componentes mencionados anteriormente. Para poner un ejemplo, no es lo mismo que se vaya a instalar una fibra en un ambiente exterior (tendido aéreo), donde necesitarás unas determinadas protecciones que aseguren ciertas posibles amenazas como la caza o la lluvia, a que sea una instalación en interior, donde a priori algunas de estas protecciones pueden ser prescindibles.

## 1.3 FUNDAMENTOS DE LA FIBRA ÓPTICA

### Ley de Snell

Cuando la luz pasa de un medio homogéneo a otro con un índice de refracción diferente, parte de ella varía su trayectoria, es decir, cambia el ángulo con el que incide en el segundo medio, y la otra parte rebota y permanece en el primer medio, produciéndose el fenómeno de reflexión. El rayo reflejado forma un ángulo con respecto a la normal, igual al de incidencia.

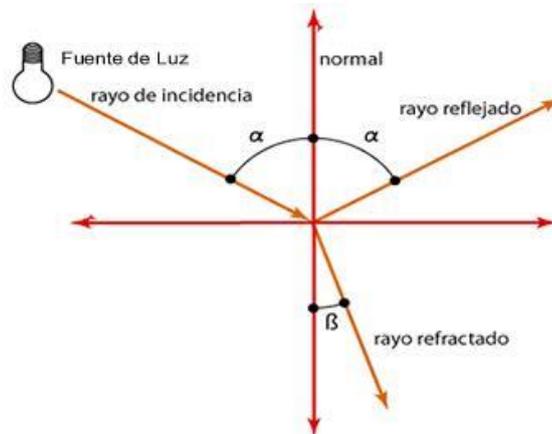


Figura 6. Representación de la ley de Snell

El rayo refractado, además de sufrir un cambio en la dirección, variará su velocidad de propagación, aumentando si el índice del segundo medio es menor, o disminuyendo en caso contrario. Este índice de refracción vendrá determinado por la composición del medio. En función de lo denso que sea permitirá una mayor o menor velocidad de propagación de la luz.

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

Donde 'c' es la velocidad de propagación de la luz en el vacío ( $3 * 10^8$  m/s) y 'v' es a la velocidad que se propaga en el medio del que se quiere calcular el índice.

El índice de refracción en el vacío es 1, en el aire es 1.003, aunque en muchas ocasiones se redondea también a 1, y el índice del vidrio que es el material más común del núcleo de la fibra, es de 1.5.

A consecuencia de variar la velocidad de propagación cambia también la longitud de onda ( $\lambda$ ) atendiendo a la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{v_{propagación}}{f}$$

### Reflexión total

Cuando el rayo de luz incide sobre la frontera entre dos medios homogéneos, y el segundo de ellos tiene un índice de refracción menor al del primer medio ( $n_1 > n_2$ ), se puede dar un fenómeno llamado reflexión total. Para ello es necesario que se cumpla otra condición, que el ángulo de incidencia supere un determinado valor, que se denomina ángulo crítico ( $\theta_c$ ). Para ángulos de incidencia mayores a este valor crítico, la luz no atraviesa la superficie y es reflejada totalmente manteniéndose en el primer medio.

La reflexión total es el fenómeno en el que se basa la propagación por fibra óptica. El material interno tiene un índice superior al material externo que lo cubre, inyectándose la luz con un ángulo de incidencia que garantice la reflexión interna total, este fenómeno se reproducirá una y otra vez durante todo el recorrido del cable, consiguiendo así, propagar la luz desde el inicio hasta el receptor sin producirse pérdidas de energía.

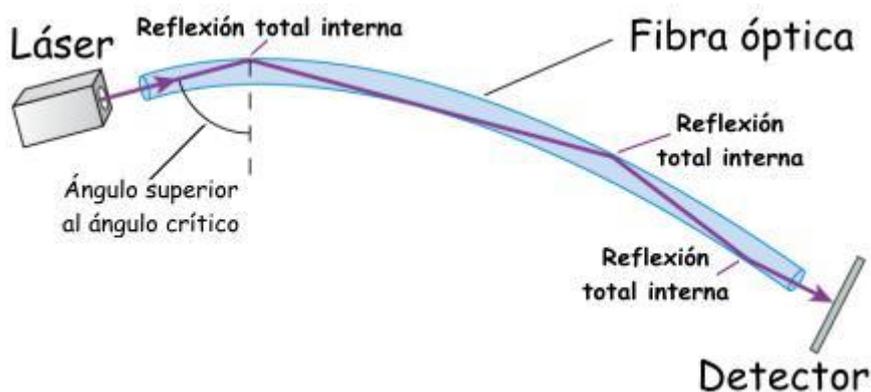


Figura 7. Propagación de los rayos de luz por el canal de fibra

Por lo tanto, se debe calcular con qué ángulo tiene que incidir el rayo de luz en la entrada de la fibra ( $\theta_1$ ), para ello partimos de la fórmula matemática que describe la ley de Snell:

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

Como hemos descrito antes, para que se produzca la reflexión interna total, se debe superar un ángulo crítico, por lo que calcularemos dicho ángulo de la siguiente manera:

$$n_1 * \sin \theta_c = n_2 * \sin 90$$

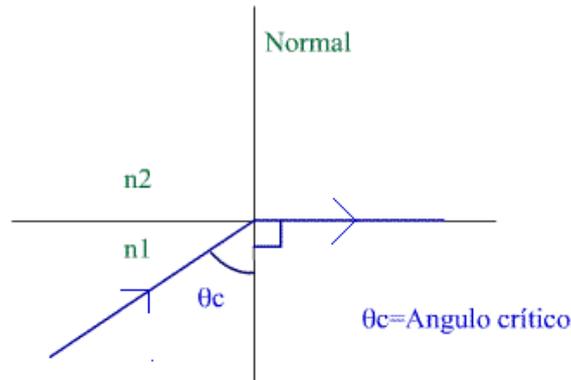


Figura 8. Reflexión interna total entre dos medios

Como podemos observar en la figura anterior, que no haya luz refractada implica que el ángulo de refracción es mayor o igual a  $90^\circ$  con respecto a la normal. Igualando  $\theta_2$  a  $90$  y despejando la ecuación anterior, obtenemos el límite:

$$\theta_c = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

En el caso de la fibra, el índice  $n_1$  corresponde al material del que está compuesto el núcleo (valor típico: 1.47), y el  $n_2$  al material del revestimiento (valor típico: 1.45).

### Apertura numérica

Otro de los parámetros fundamentales, es la denominada apertura numérica, que es un parámetro adimensional que nos va a indicar el número de rayos de luz que podremos inyectar en la fibra. Está relacionado con el cono de aceptación, que es el ángulo máximo con el que podemos hacer incidir la luz desde el exterior de la fibra para que se propague en su totalidad por el canal como hemos explicado anteriormente.

Particularizando la expresión de la ley de refracción o ley de Snell, para el caso general de la fibra, en el que el primer medio será el aire y el segundo el núcleo de esta, obtendremos:

$$n_o * \sin \theta_{incidente} = n_{nucleo} * \sin \theta_{reflejado}$$

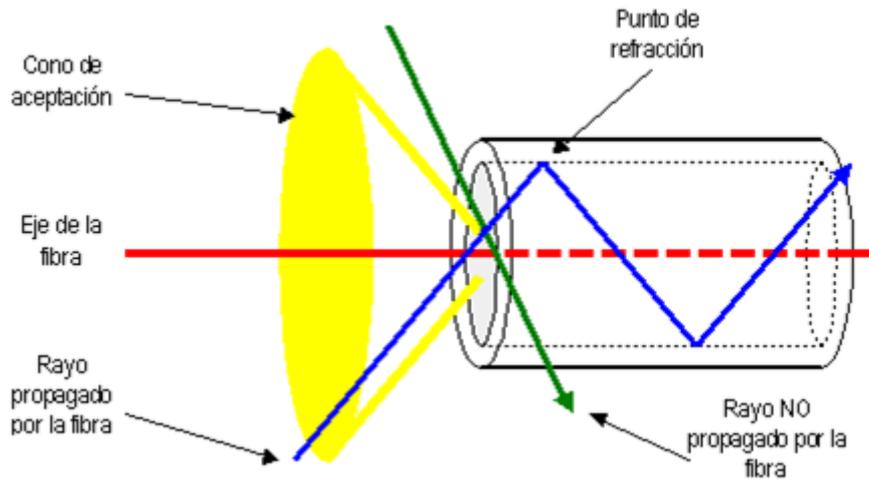


Figura 9. Cono de aceptación para los rayos inyectados en la fibra

Desarrollando la ecuación anterior llegamos a determinar el ángulo máximo de aceptación  $\alpha_{m\acute{a}x}$ :

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \arccos \frac{n_{\text{revestimiento}}}{n_{\text{núcleo}}}$$

La apertura numérica es el seno de este ángulo de aceptación máximo de entrada.

$$AN = \sin \alpha_{m\acute{a}x}$$

La AN puede definirse también de la siguiente forma:

$$AN = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{revestimiento}}^2}$$

En definitiva, cualquier rayo de luz que incida con un ángulo mayor al valor máximo de aceptación, escapará a través del revestimiento sin producirse la reflexión interna total. Este parámetro de AN es un indicador de la eficiencia de acoplo fuente/fibra, y su valor generalmente se encuentra en torno a 0.2, que equivale a un ángulo máximo de incidencia de 11° respecto al eje de la fibra.

## Radio de curvatura

El radio de curvatura es otro aspecto para tener muy en cuenta a la hora de realizar una instalación de FO. Como ya sabemos, generalmente el material de la fibra es el vidrio y hay que tener en cuenta la flexibilidad de este, ya que si se curva excesivamente se puede romper. Además, al curvarse se producen pérdidas de energía por atenuación, que veremos más adelante.

*“En un caso de encontrarse en el campo de instalación y no contar con los datos del fabricante del cable, un truco técnico es tomar la medida del diámetro externo del cable y multiplicarlo por 20, para obtener un valor aproximado de referencia del Radio de Curvatura” [1].*

En la imagen inferior derecha se plasma la atenuación en función del radio de curvatura, cuanto menor es el radio, significa que la curva de la fibra está más doblada y, en consecuencia, la atenuación es más grande.

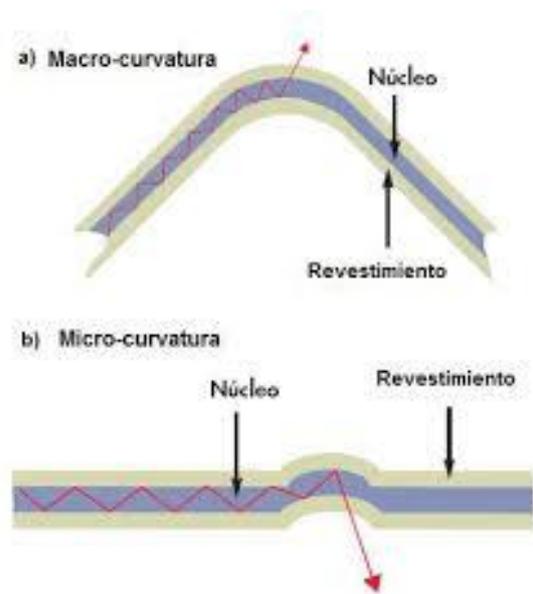


Figura 10. Curvaturas en la fibra

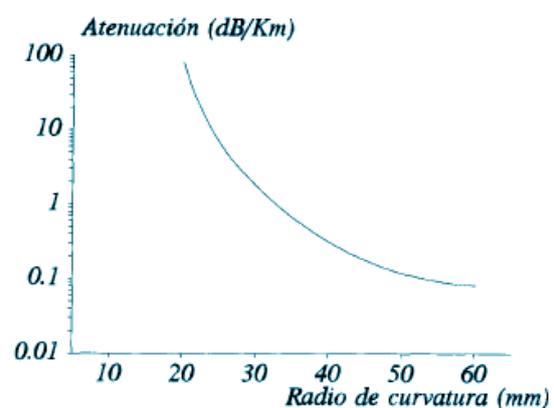


Figura 11. Atenuación en función del radio de curvatura de la fibra

## 1.4 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

Existen varias clasificaciones de la fibra según diferentes aspectos, como el modo de propagación, los materiales de fabricación, el perfil del índice de refracción, etc. Aunque se puede fabricar fibras con los materiales y la geometría más diversos para aplicaciones especiales, en el mundo de las comunicaciones se han estandarizado varios tipos que cubren la mayoría de las necesidades.

En función del modo de propagación encontramos dos tipos de fibra:

- **Fibra Multimodo (MMF):** son las que permiten propagar varios modos de forma simultánea. Entendemos por modo, cada una de las trayectorias que pueden tomar los rayos de luz. La característica fundamental que diferencia una multimodo de una monomodo es el tamaño del núcleo. Las MMF tienen un núcleo de mayor diámetro, que es lo que posibilita el acoplamiento de la luz en sus diferentes modos. Los valores típicos de diámetro de estas fibras son 50  $\mu\text{m}$  y 62.5  $\mu\text{m}$ . Presentan dispersión intermodal, lo que limita su ancho de banda por longitud. Se ha comprobado que se puede reducir esta dispersión utilizando fuentes de luz láser, y limitando el ángulo de los rayos inyectados.
  
- **Fibra Monomodo (SMF):** por el contrario, estas fibras solo pueden transmitir un único modo, ya que el diámetro del núcleo es bastante reducido. Típicamente de valores en el rango de 8  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . El cono de aceptación, ya explicado anteriormente, en las fibras monomodo es muy estrecho por lo que, solo puede propagarse el rayo que incide paralelo al eje de la fibra. Existen tres tipos de fibra monomodo: monomodo estándar (SMF), monomodo de dispersión desplazada (DSF), y monomodo de dispersión desplazada no nula (NZ-DSF).
  - La monomodo estándar (SMF) es la más utilizada en las redes ópticas, funciona en régimen monomodo a partir de unos 1300 nm (longitud de onda de corte). Su punto de dispersión mínima ( $D=0$ ) está en segunda ventana, mientras que la atenuación mínima está en tercera ventana, donde existe una dispersión alta.

- La DSF desplaza el punto de dispersión mínima a la longitud de onda de 1550 nm, por lo tanto, se ha optimizado para la tercera ventana, obteniendo en ella mínimas atenuaciones y dispersiones. El problema de esto reside en la aparición de efectos no lineales en sistemas de múltiples portadoras (WDM), que empeoran el comportamiento.
- La fibra de dispersión desplazada no-nula (NZ-DSF) tiene el punto de dispersión mínima ligeramente fuera de la tercera ventana. Al tener una dispersión mínima pero no nula, se logra reducir esos efectos no lineales que aparecen en las DSF.

En función de las características del núcleo, podemos clasificar las fibras multimodo en:

- **Fibras de índice abrupto:** También llamadas fibras de índice escalonado o de salto de índice. Son las fibras que tienen un índice de refracción constante en todo el núcleo y un índice también constante en el revestimiento, pero de menor valor, para que se produzca el fenómeno de reflexión ya explicado.
- **Fibras de índice gradual:** Al contrario de las anteriores, estas fibras no presentan un índice de refracción constante, ya que el núcleo no es homogéneo. Este se fabrica a partir de varias capas concéntricas que presentan diferentes índices de refracción debido al empleo de diferentes materiales en su composición. Estas capas estarán ordenadas de tal forma que, en el interior esté el índice mayor, y su valor vaya decreciendo hasta la última capa. Siempre el índice del revestimiento será menor.

En la siguiente imagen vemos una comparativa entre las fibras monomodo y las multimodo de índice abrupto y gradual, del modo de propagación de los rayos de luz en el núcleo de la fibra, el tamaño de este, la distribución del índice de refracción, y la señal que observamos a la salida frente a un pulso que se envía a la entrada.

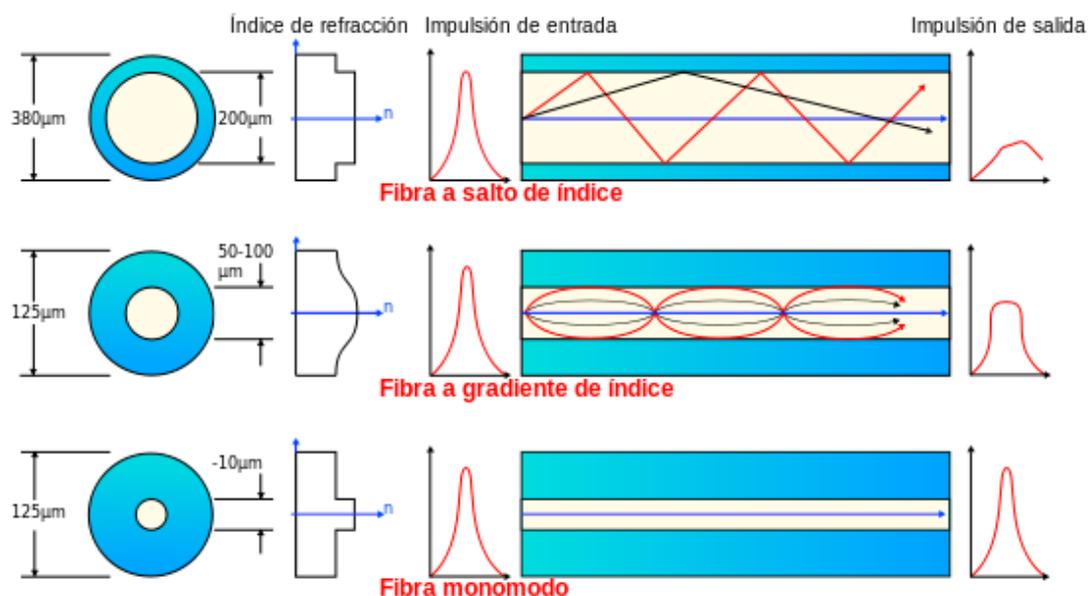


Figura 12. Esquema de la sección y los tipos de propagación de la luz en fibras multimodo con salto de índice y con gradiente de índice, y en fibras monomodo

En cuanto al material de las fibras, generalmente son fibras de vidrio, fabricadas con Silicio. Pero existen otras que tienen aplicaciones más reducidas como son las Fibras Ópticas Plásticas (POF). Son fibras multimodo fabricadas con materiales plásticos procesados, generalmente el núcleo es de polimetilmetacrilato (PMMA) y el revestimiento de polímeros fluoruros. El tamaño del núcleo (cerca de 1 mm) es mucho mayor que los de vidrio, ocupando prácticamente la sección total del cable.

Entre las ventajas que tienen este tipo de fibras, destacamos su gran flexibilidad (amplio radio de curvatura), lo que permite mayor facilidad para su manipulación y en su instalación, obteniendo pérdidas por curvatura casi inexistentes.

La otra principal ventaja muy a tener en cuenta es su coste, mucho más reducido que el de las fibras convencionales. Tanto en la propia fabricación de la fibra, como en los elementos asociados (fácil inyección y conexiones ópticas). Por otro lado, presenta atenuaciones altas (>100 dB/km), tiene un muy reducido ancho de banda y solo sirve para pequeñas distancias.

Otras fibras normalizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) son:

- **Fibra con el pico del agua reducido (LWPF):** Con las técnicas de fabricación convencionales queda un pequeño residuo de agua que produce un fuerte pico de absorción alrededor de los 1400 nm. Con una purificación extrema del material se elimina este pico de absorción, permitiendo transmitir a nuevas longitudes de onda.
- **Fibra de gran área efectiva (LEAF):** Se diseña para que el modo fundamental ocupe un área mayor alrededor del núcleo que en la monomodo estándar, repartiéndose así la potencia por un área mayor. Lo que se traduce en menor intensidad óptica, reduciendo así, los efectos no lineales.
- **Fibra insensible a las curvaturas (BIF):** Como su propio nombre indica, reduce considerablemente la atenuación debido a las curvaturas. Con las redes FTTH, donde se lleva la instalación de la fibra hasta el hogar (se debe tener especial cuidado con las esquinas), este aspecto es importante.

## 1.5 PÉRDIDAS EN LA FIBRA ÓPTICA

En este apartado hablaremos de las pérdidas que sufre la señal en la FO, analizando las diferencias que existen en este aspecto entre los distintos tipos de fibra mencionados anteriormente.

### Atenuación

A lo largo de la fibra, los rayos de luz pierden potencia debido a que se producen absorciones de la radiación óptica, reduciendo la amplitud de la señal y limitando así la distancia de propagación. Estas pérdidas dependen de la longitud de onda, del material por el que se propaga, y de las posibles impurezas que existan. Las pérdidas por impurezas se pueden reducir si se cuida muy bien el proceso de fabricación, hasta el punto de ser prácticamente despreciables.

El coeficiente de atenuación es la magnitud que caracteriza la atenuación de una fibra por unidad de longitud, se define como vemos en la siguiente fórmula, relacionando la potencia transmitida con la recibida, y expresada en dB por Km.

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_T}{P_R}$$

Clasificamos las pérdidas según sean, propias del material o de factores externos:

- **Pérdidas extrínsecas:** son las pérdidas que no tienen relación directa con la naturaleza de las fibras, es decir, se deben a factores externos. Las atenuaciones más comunes en la fibra debido a pérdidas extrínsecas son por curvatura, por conexiones o empalmes, por desajustes de la apertura numérica, del diámetro del núcleo o del perfil de índice de refracción.
- **Pérdidas intrínsecas:** en cuanto a las intrínsecas, surgen de la propia naturaleza del material o del proceso de fabricación de la fibra. Las más relevantes que encontramos son las inherentes a la fibra durante el proceso de fabricación, la absorción por rayos UV e IR (ventanas de transmisión), la reflexión de Fresnel que se produce por un salto de índice en la unión entre fibras, donde una parte se refleja hacia la primera fibra, y el Scattering de Rayleigh, que aparece cuando la luz se encuentra con partículas indeseadas.

En la figura 13 observamos la distribución de la suma de todas las atenuaciones dictadas anteriormente, en función de la longitud de onda a la que se transmite. En ella vemos las tres ventanas de transmisión óptica, que son las regiones donde hay mínimas atenuaciones.

- Primera ventana (850 nm): Tras mejoras en el proceso de fabricación, se eliminó el pico de atenuación existente en torno a esta longitud de onda, por lo que desapareció esta ventana.
- Segunda ventana (1310 nm): Aunque esta ventana no presente el mínimo valor de atenuación, su uso está muy extendido.
- Tercera ventana (1550 nm): En las longitudes en torno a 1550 nm se encuentran las atenuaciones mínimas.

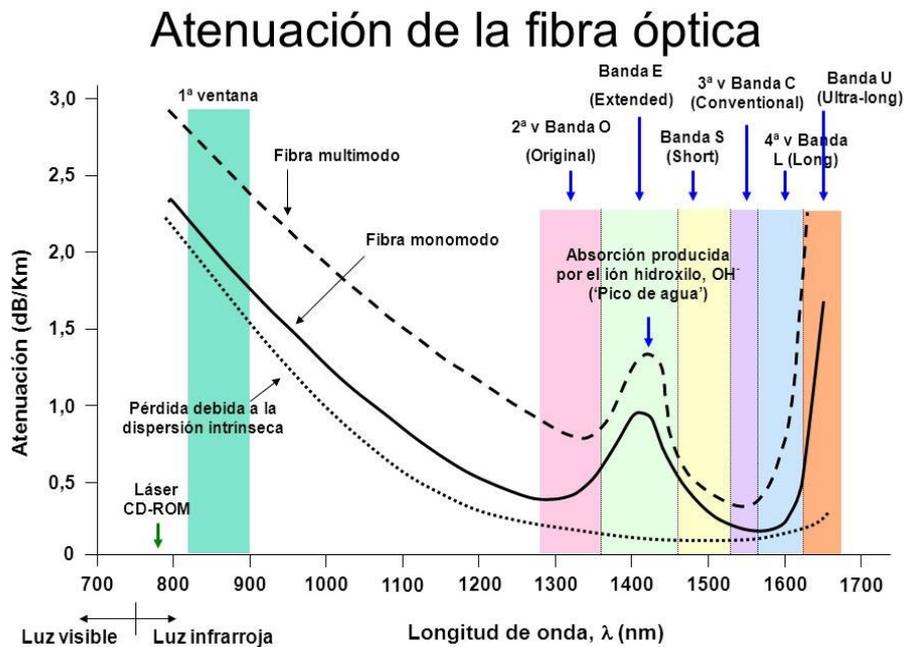


Figura 13. Distribución de la atenuación de la fibra en las diferentes longitudes de onda

Alrededor de 1400 nm también se ha conseguido con procesos exhaustivos en la fabricación, reducir esa presencia de iones de agua y así crear fibras que sean capaces de trabajar en esas frecuencias asociadas a las longitudes de onda de las que hablamos.

## Dispersión

*“La dispersión es el fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material. Todos los medios materiales son más o menos dispersivos, y la dispersión afecta a todas las ondas.” [2]*

La dispersión por lo tanto es un fenómeno que siempre se debe tener en cuenta. En la fibra va a provocar una limitación en distancia, y pérdidas también en el ancho de banda, limitando así la capacidad de transmisión de la red. A lo largo del canal los pulsos enviados se van a ir distorsionando y ensanchando, provocando así, que se puedan solapar y sea muy complicado o imposible que el receptor los distinga.

Existen tres tipos de dispersión en la fibra:

- **Dispersión modal:** cada modo o rayo de luz recorre un camino y viaja a una velocidad diferente, por lo tanto, llegan al otro extremo de la fibra en distintos instantes de tiempo, produciendo el ensanchamiento de los pulsos. Esta lógicamente solo afecta a las fibras multimodo.
- **Dispersión cromática:** afecta a todas las fibras, y se debe a que el índice de refracción de cualquier material no es independiente de la longitud de onda de la luz que los atraviesa. Por lo que cada componente espectral viajará a una velocidad diferente y del mismo modo que en la dispersión modal, al llegar en instantes de tiempo diversos, se produce el ensanchamiento.
- **Dispersión por polarización del modo (PMD):** también afecta tanto a multimodo como a monomodo, y se debe a que el núcleo de la fibra no es perfectamente redondo. Las dos polarizaciones del modo, ante cualquier curvatura, asimetría o vibración dejan de propagarse con la misma velocidad.

De la suma de los coeficientes de dispersión anteriores, se calcula el coeficiente de dispersión total. Estos coeficientes se miden en ps/nm km.

$$\sigma_{FIBRA}^2 = \sigma_{INTERMODAL}^2 + \sigma_{CROMÁTICA}^2 + \sigma_{PMD}^2$$

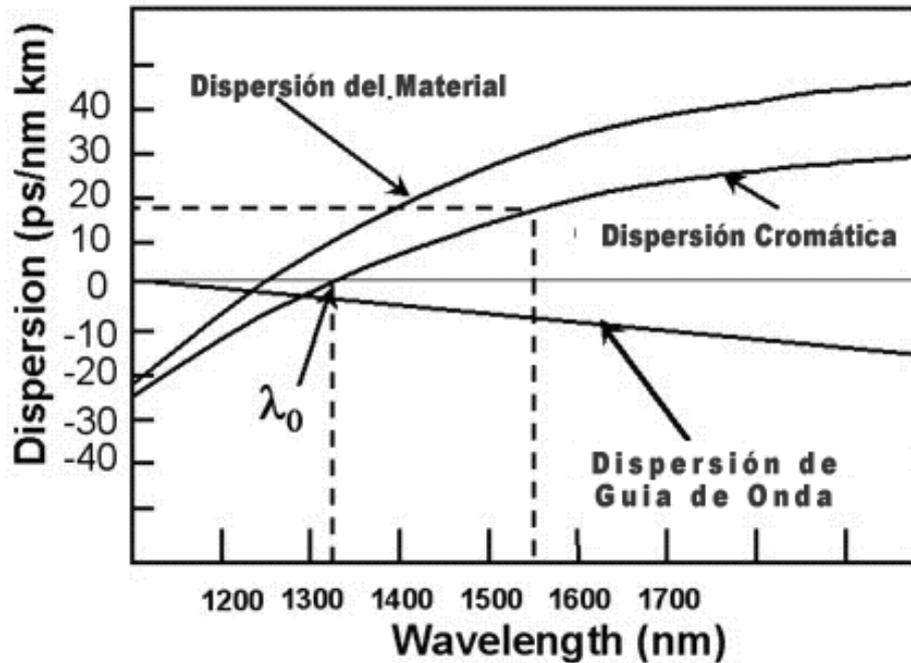


Figura 14. Distribución de los tipos de dispersión que sufre la fibra en función de la longitud de onda de trabajo

Como vemos en la imagen superior, en torno a 1310 nm (segunda ventana) se encontraría el mínimo de dispersión total, es decir, en esta ventana el ensanchamiento de los pulsos con el tiempo es el menor posible y, por lo tanto, en esta región se trabajaría a la máxima velocidad de transferencia de información.

Anteriormente ya mencionamos que el mínimo de atenuación se encuentra en la tercera ventana, por lo que no coincide con el mínimo de dispersión. Aunque también hemos hablado ya de algunas fibras monomodo que han conseguido hacer coincidir estos mínimos en la tercera ventana. Son las fibras de dispersión desplazada y desplazada-no nula, las cuales son muy relevantes para sistemas con multiplexado de longitudes de onda (WDM).

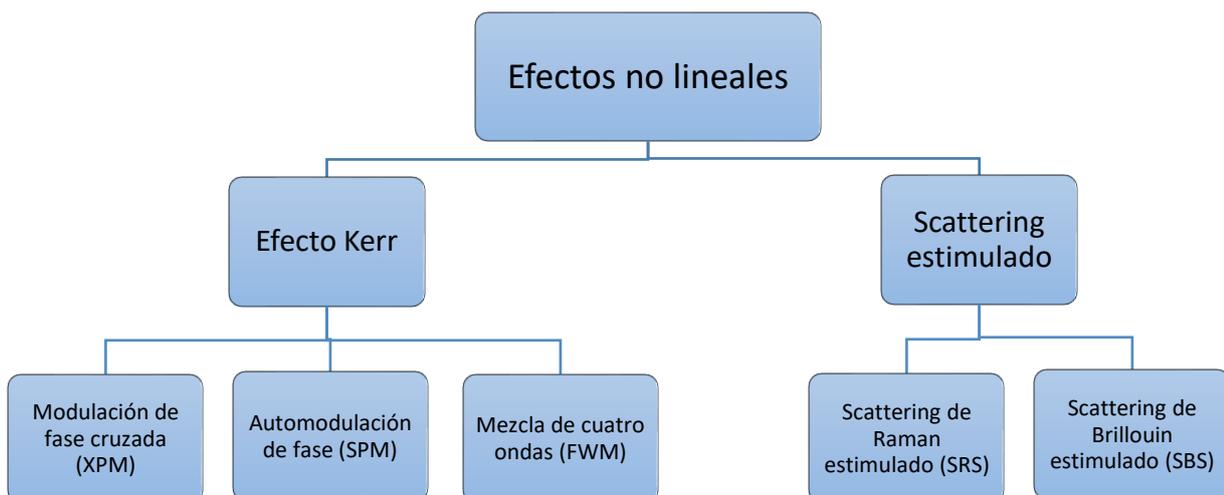
## No linealidades

Cuando tenemos potencias de transmisión bajas podemos considerar que los sistemas de comunicaciones ópticas se comportan linealmente, pero para potencias superiores o mayores regímenes binarios es imprescindible tener en cuenta las no linealidades.

Sobre todo, cabe destacar estos efectos no lineales en sistemas WDM, donde adquieren bastante relevancia, ya que limitan sensiblemente la velocidad de transmisión y la potencia óptica.

Las no linealidades de la fibra se pueden clasificar en dos categorías: [3]

- Las que se producen como consecuencia de la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, conocido como efecto Kerr, que a su vez es proporcional al cuadrado de la amplitud: modulación de auto fase (SPM), modulación de fase cruzada (CPM) y la mezcla de cuarta onda (FWM).
- Las que se producen por efectos de difracción en la fibra, debido a la interacción de las ondas de luz con los fotones (vibraciones moleculares) en el silicio del núcleo: dispersión de Raman (SRS) y dispersión de Brillouin (SBS).





## 2. TECNOLOGÍA FTTH

En este apartado trataremos de desarrollar la arquitectura de red FTTH, así como las diversas configuraciones posibles y sistemas en los que se basa. Los cuales siguen la tecnología de redes pasivas PON.

### 2.1 INTRODUCCIÓN AL SISTEMA FTTx

Como hemos mencionado anteriormente existen diferentes variantes de arquitectura de red basada en fibra óptica. Estas se clasifican en función del grado de acercamiento de la fibra al usuario final, por lo tanto, varía la longitud total de fibra que se emplea en cada una de ellas.

De esta forma existen arquitecturas híbridas de fibra/cobre o la arquitectura principal sobre la que se desarrolla este trabajo, que utiliza fibra en la totalidad de la red global.

A continuación, detallamos los tipos de redes FTTx (Fiber To The x). Todos ellos emplean la fibra desde la central telefónica hasta un determinado punto.

*Tabla 2. Nomenclatura que define la familia FTTx*

	Denominación	Fibra hasta...
<b>FTTN</b>	Fiber To The Node	Nodo (pequeña central) a 1.5 – 3 Km del edificio
<b>FTTC</b>	Fiber To The Curb	Pozzeto en la acera próximo al edificio
<b>FTTB</b>	Fiber To The Building	Cuarto de telecomunicaciones del edificio
<b>FTTH</b>	Fiber To The Home	Hogar de cada uno de los usuarios

Para poder comparar el grado de penetración de la fibra entre diferentes países, se llegó a un acuerdo entre los consejos de FTTH de Europa, Norte América y el Pacífico Asiático para definir claramente los términos de FTTH y FTTB, pero no hay una definición formal para los otros dos tipos. De tal forma que las distancias no son totalmente rigurosas para considerarse un tipo u otro de manera universal, dependerá de la clasificación que tiene cada región, pero aproximadamente se mueven en torno a las indicadas en las siguientes páginas.

Las FTTN emplean fibra desde la central telefónica hasta un nodo del operador, que como máximo se encuentra a 3 Km de los edificios a los que presta los servicios. El resto del cableado hasta el edificio se compone normalmente por un tendido de coaxial (HFC: Hybrid Fiber-coaxial) o con cable de cobre. Las HFC son las redes de banda ancha compuestas por fibra óptica y cable coaxial.

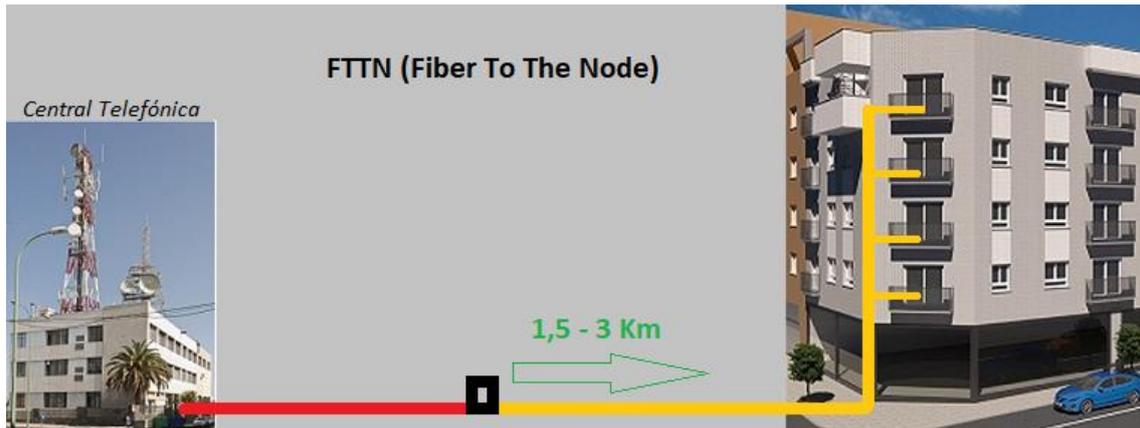


Figura 15. Despliegue de una red FTTN — Fibra óptica — Cable de cobre

En cuanto a la FTTC, el tendido de fibra se aproxima más a las viviendas de los usuarios, pero nunca llegando al interior del edificio. Normalmente el cambio de cable se realiza en un ‘pozzeto’ o armario de telecomunicaciones en la acera. Desde este punto hasta los usuarios, se usa cable coaxial o par trenzado de cobre.

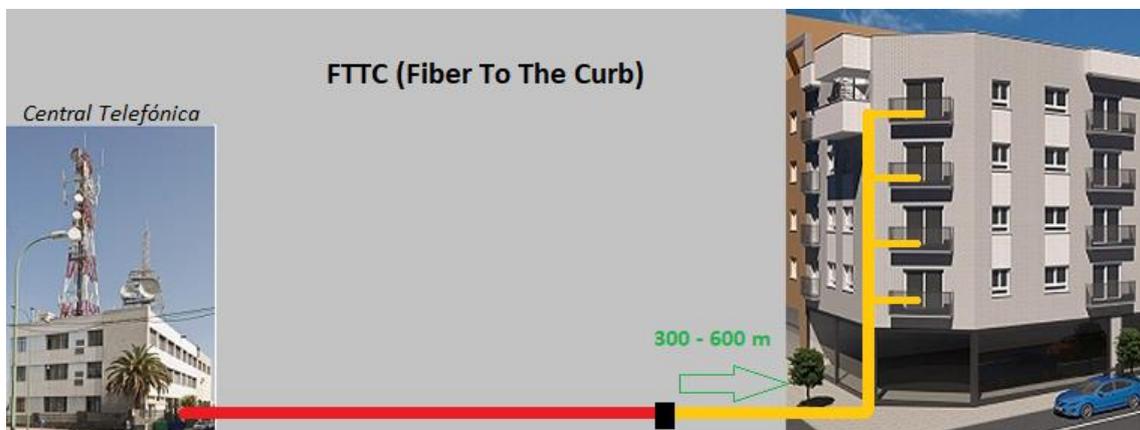


Figura 16. Despliegue de una red FTTC — Fibra óptica — Cable de cobre

En la FTTB la fibra ya nos llega hasta el cuarto de telecomunicaciones del edificio, y a partir de aquí, nos conectan con cobre hasta las viviendas de cada uno de los vecinos. En ocasiones algunas compañías telefónicas nos venden o publicitan la fibra hasta casa cuando en realidad emplean este tipo de red.

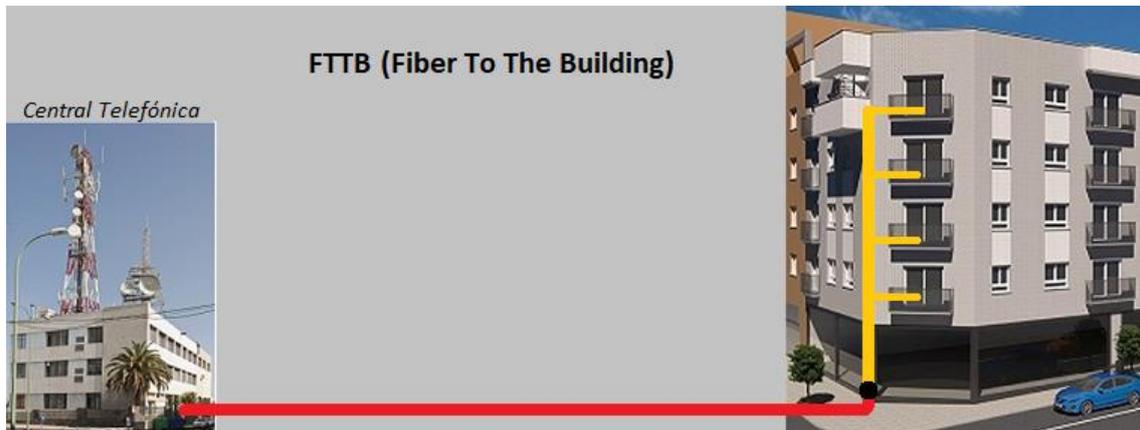


Figura 17. Despliegue de una red FTTB      — Fibra óptica      — Cable de cobre

Por último, la FTTH como ya hemos mencionado anteriormente, utiliza la fibra en toda la red. Por lo tanto, desde la central de la operadora hasta el usuario final, incluyendo el tendido en el interior del edificio, no emplea ningún otro tipo de cable. A cada hogar puede llegar una fibra enteramente dedicada.



Figura 18. Despliegue de una red FTTH      — Fibra óptica

A parte de estas tipologías, existen otras que no están estandarizadas como las anteriores, pero que durante la evolución y desarrollo de la tecnología se emplearon estas terminologías y en algunas ocasiones se siguen mencionando:

- FTTCab (Fiber To The Cabinet) → fibra hasta un armario de telecomunicaciones, normalmente a menos de 300 metros del usuario (más cerca que FTTN).
- FTTP (Fiber To The Premises) → engloba un destinatario más general, que incluye tanto viviendas como negocios pequeños.
- FTTO (Fiber To The Office) → fibra hasta la oficina, sala de telecomunicaciones.
- FTTU (Fiber To The User) → fibra hasta el usuario
- FTTA (Fiber To The Antenna) → nueva generación de conexión de fibra hasta la antena (redes móviles LTE)

## 2.2 ARQUITECTURA FTTH.

La fibra es el canal de transmisión en la totalidad de la red global, transportando la señal desde la central hasta el usuario que tiene acceso al servicio, ya sea un hogar o negocio. La conexión entre el abonado y el nodo de distribución puede realizarse de dos modos, con una configuración punto a punto, o punto a multipunto.

### Configuración punto a punto (P2P)

Es una configuración donde cada usuario está conectado a un puerto dedicado en un nodo central, por lo tanto, proporciona una fibra dedicada (ancho de banda completo) al suscriptor. Proporciona una solución de larga distancia y alta capacidad, además de ser flexible y fácil de configurar. En FTTH no es común este tipo de red, siendo utilizada solo en casos particulares, normalmente para dar servicio a una empresa lejana a la central. Esto se debe a que esta configuración requiere de muchas fibras y sería muy costoso de implementar y de administrar, especialmente en zonas urbanas.

### Configuración punto a multipunto (P2MP)

Es la configuración en la que se basan generalmente las redes de FTTH, como su nombre indica, ofrece una conexión desde un único punto que es la central, a múltiples puntos simultáneamente, que son cada uno de los usuarios abonados al servicio.

Esta configuración se denomina comúnmente como redes ópticas pasivas (PON). Estas redes están compuestas completamente por elementos ópticos pasivos, no tiene electrónica en su arquitectura salvo en los extremos de la red.

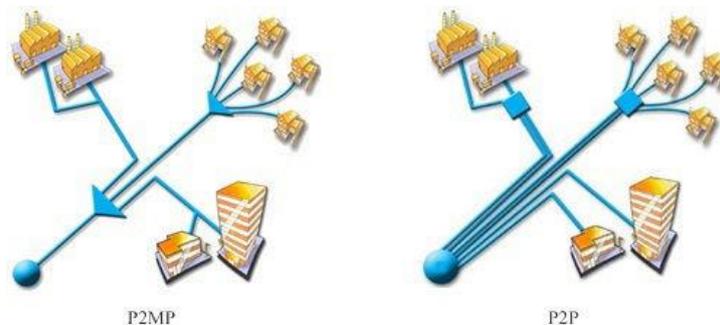


Figura 19. Arquitectura de una red P2MP frente a una P2P

A continuación, realizamos una tabla para visualizar mejor la comparativa de las características principales de estas dos arquitecturas.

Tabla 3. Confrontación entre las configuraciones P2P y P2MP

	<b>P2P</b>	<b>P2MP</b>
<i>Velocidad máx.</i>	10 Gbps por usuario	10 Gbps para n usuarios
<i>Bitrate</i>	Dedicado	Compartido
<i>Seguridad</i>	Alta	Se requiere encriptación
<i>Configuración</i>	Fácil	Compleja
<i>Equipos activos</i>	Abundantes	Moderados
<i>Distancia operacional</i>	Hasta 80 km	Limitada (~20 km)
<i>Costes</i>	Muy elevados	Elevados

La tecnología PON se basa, como vemos en la figura anterior, en compartir el cable de fibra en un tramo de aproximación a los usuarios finales, para así reducir costes tanto de instalación como de mantenimiento.

A continuación, definimos los elementos pasivos generales que componen una red PON. Más adelante comentaremos todos los elementos que componen la red.

- **ODN (Optical Distribution Network):** Es la red de distribución óptica, formada por los cables de fibra óptica, armarios, paneles distribuidores, etc.
- **OLT (Optical Line Termination):** Es el elemento que se instala en el extremo de cada fibra que parte desde la central telefónica (PoP). El PoP (Point of Presence) es el lugar donde la operadora ubica los OLTs. Gestiona el tráfico de datos en dirección a los ONT y recoge el proveniente de ellos, controlando las potencias emitidas y recibidas, y corrige ciertos errores de la comunicación.

Está formado por diferentes bloques que proporcionaran los servicios de voz y datos (P-OLT) y vídeo (V-OLT), utilizando diferentes longitudes de onda para cada uno. Por lo que existe un bloque adicional que es el encargado de multiplexar estas longitudes de onda, antes de ser transmitidas a la fibra. Además, los OLTs no emiten a la misma potencia, se regulan en función de la distancia desde este al

abonado final (ONT), para proporcionar valores de potencia adecuados en distancias largas, y ahorrar en potencia cuando sea posible en distancias cortas.

Los elementos terminales de fibra óptica se distribuyen en ranuras ubicadas en racks especiales conectados a la alimentación eléctrica.



Figura 20. Servidor OLT

- **ONT (Optical Network Termination):** Es el dispositivo que se instala en la casa o negocio del abonado. Tiene las funciones de recepción y filtrado de la información que le llega en el canal descendente, y por otra parte envía señales mediante un LED al OLT (canal ascendente). Usa un protocolo TDM (multiplexación por división temporal) para que el OLT que asigna intervalos temporales a cada ONT, no confunda a quién pertenece cada señal. A parte de los equipos convencionales, existen ONTs preparados para ser instalados en un edificio o empresa, y desde este se conectan varios usuarios por medio de un repartidor (se emplea en FTTB).

Una vez realizado el filtrado, se tiene que hacer el proceso inverso al del OLT. el ONT debe diferenciar las señales de vídeo con las tramas de voz y datos, y demultiplexarlas. Contiene varias salidas donde se podrán conectar equipos de abonado.



Figura 21. Ejemplo comercial de un ONT

Entonces, lo que conocemos por ONT es el dispositivo que transforma la señal óptica recibida por la fibra, para que pueda interpretarla el router. Aunque existen modelos integrados ONT + router.

Es necesario tener un equipo ONT y router con capacidad para la tasa de bits que se transmite por la fibra a la que se conecta, ya que, si no, se produce el fenómeno conocido como cuello de botella, donde al haber un tiempo de respuesta para procesar los datos que llegan superior al debido, se produce un embudo donde por mucha capacidad que tenga el resto de la red si hay un punto donde el tráfico de información es mucho más lento, afecta ralentizando el funcionamiento del enlace.

- **Splitter:** Divisor óptico pasivo encargado de direccionar las señales. Son el elemento principal de esta red, nos permiten compartir el canal que luego se distribuirá para dar cobertura a un conjunto de abonados. Esto lo realiza dividiendo el haz entrante que le llega desde una fibra, en haces de luz que distribuye por múltiples fibras. Este dispositivo se desarrolla con mayor profundidad en el apartado de “Elementos de la red óptica”.

## TECNOLOGÍA PON

La tecnología PON ha ido evolucionando en los últimos años, y se han desarrollado otros estándares por la ITU, apareciendo APON, EPON (por la IEEE), BPON, hasta llegar al más avanzado actualmente, que es el estándar GPON (Gigabit-capable PON). Como su propio nombre indica, define una red PON con capacidad para tasas de datos del orden de Gbps.

Las principales ventajas que ofrece GPON es, el aumento del ancho de banda de transmisión, mayor seguridad a la red, ya que la información viaja cifrada mediante un encriptado AES (Advanced Encryption Standard). Y tasas de transmisión muy variadas, dentro del rango de 622 Mbps a 2.488 Gbps. Al igual que BPON, permite la transmisión tanto asimétrica como simétrica, teniendo como máxima velocidad en el canal ascendente 1.244 Gbps.

A continuación, mostramos las diferentes características de los últimos estándares desarrollados por la ITU, BPON Y GPON, de una forma más visual, para observar los avances y ventajas de esta última.

<b>Características</b>	<b>BPON</b>	<b>GPON</b>
<i>Velocidad de transmisión (Mbps)</i>	Down: 155, 622, 1244 Up: 155, 622	Down: 1244, 2488 Up: 155, 622, 1244, 2488
<i>Arquitectura de transmisión</i>	Asimétrica, Simétrica	Asimétrica, Simétrica
<i>Fibras por ONT</i>	1 o 2	1 o 2
<i>Longitudes de onda (bifibra)</i>	Descenso: 1480-1500 nm Ascenso: 1260-1360 nm Video: 1550 nm	Descenso: 1480-1500 nm Ascenso: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm
<i>Longitudes de onda (2 fibras)</i>	Voz y datos: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm	Voz y datos: 1260-1360 nm Video: 1550-1560 nm
<i>N.º máx. de Splitters por OLT</i>	32	128
<i>Distancia máx. entre ONTs</i>	20 km	20 km
<i>Distancia máx. entre OLT y ONT</i>	20 km	60 km
<i>Pérdidas máx. de inserción</i>	0 dB	15/20/25 dB

Además de la mejora en la velocidad de transmisión de datos, cabe destacar la mayor facilidad y flexibilidad para realizar una red, ya que nos permite mayores distancias entre el OLT y los ONTs, también llamados ONU (Optical Network Unit), y una mayor

ramificación con 128 splitters por OLT. Es decir, podemos dar servicio a un número de usuarios mucho más amplio con un solo OLT, reduciendo así costes.

Por lo tanto, la red PON consiste en un equipo OLT que se conecta a una fibra óptica mediante un repartidor de fibra, que se encarga de organizar los canales de información. Esta señal se propaga por la fibra hasta llegar a un elemento pasivo que la divide en una serie de fibras que están conectadas finalmente a un número determinado de ONTs. Estos corresponden a cada uno de los usuarios finales y son los que les proporcionará el servicio.

Como ya hemos dicho, el divisor óptico o splitter divide a la señal entrante en tantas señales como fibras tenga conectadas a la salida. Cada vez que sucede esto estamos ante una etapa de conexión o servicio. De esta forma, puede existir redes de una sola etapa, donde al divisor estén conectados solo OLT's, pero también puede darse el caso que, a la salida del divisor de primera etapa, se le conecte una fibra que va a otro divisor. Este último sería el divisor de segunda etapa y los elementos conectados a él, es la segunda etapa de conexión. Y así seguiría la distribución si se repite esto.

La arquitectura explicada en el párrafo anterior, se la conoce como red arbolada. Es una red que requiere costes de operación y mantenimiento bajos, además de ser muy flexible.

Otras estructuras de red utilizadas en telecomunicaciones son las que vemos en la imagen inferior. Para redes FTTH las más empleadas son las mencionadas en árbol, pero en algunas ocasiones se combinan con estructuras de transmisión en bus o en anillo.

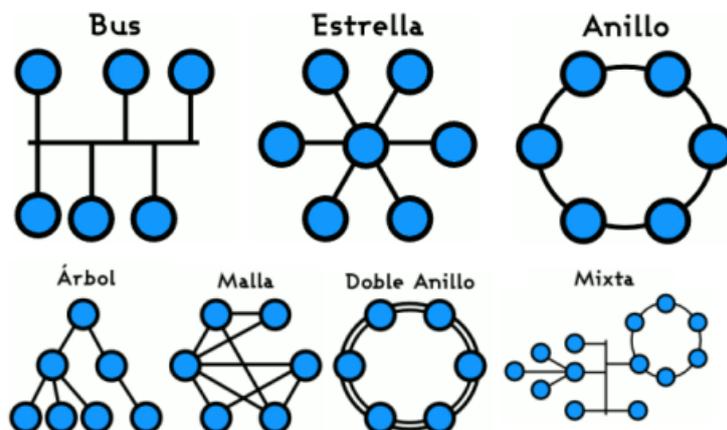


Figura 22. Tipos de arquitectura de redes de telecomunicaciones

## Arquitectura en árbol

Como hemos mencionado es la arquitectura más empleada para redes FTTH, ya que es la más barata y adaptable, siendo fácil modificarla.

Se llama arquitectura en árbol porque se asemeja a su ramificación, hay un tramo principal que parte desde el PoP y cubre la distancia de aproximación a los usuarios (normalmente es el tramo más largo), luego se produce la ramificación hacia diferentes puntos. Esto es el primer nivel de splitter o de división, en cada uno de esos tramos se puede a su vez realizar el mismo proceso de ramificación (segundo nivel o enlace secundario) y repetirse las veces que fuese necesario. Este es el motivo por el cuál decimos que es la arquitectura idónea en caso de que se requiera ampliarla.

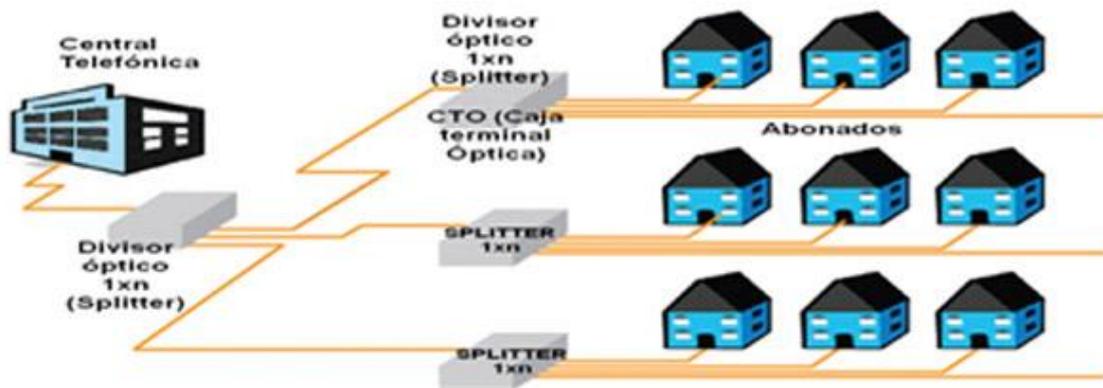


Figura 23. Distribución de una red arbolada con dos niveles de división

La principal desventaja es en el ámbito de la fiabilidad, ya que, si se produce una rotura de la fibra o un fallo en el splitter en el tramo principal, afectaría a todo el sistema.

## Arquitectura en bus

Se conecta el PoP a una serie de nodos compartiendo el enlace de la red. Por lo tanto, presenta el mismo problema de fiabilidad que en las arquitecturas en árbol.

La red tiene dos direcciones, la que sale del PoP y recorre todos los nodos (ONTs), que es donde está el tráfico, y en la otra dirección donde los nodos tienen las funciones de lectura y procesamiento de tráfico.

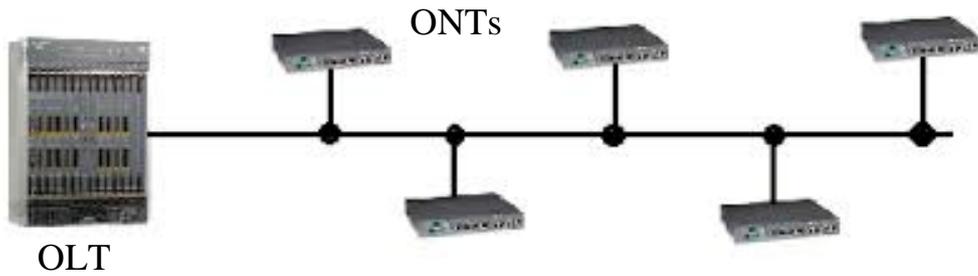


Figura 24. Distribución de una red en bus, los ONTs comparten el canal proveniente del OLT

### Arquitectura en anillo

La topología en anillo es un enlace de forma circular compartido por todos los nodos como vemos en la imagen inferior. Las ventajas que presenta frente a las anteriores topologías, es la gran robustez y fiabilidad.

A diferencia de la arquitectura en bus, la línea que comparten todos los nodos está conectada al PoP por ambos extremos.

En el caso que se produzca un fallo, existen técnicas de protección de la red para seguir funcionando. Se basan en reenviar el tráfico desde el OLT en el sentido contrario al sentido anterior.

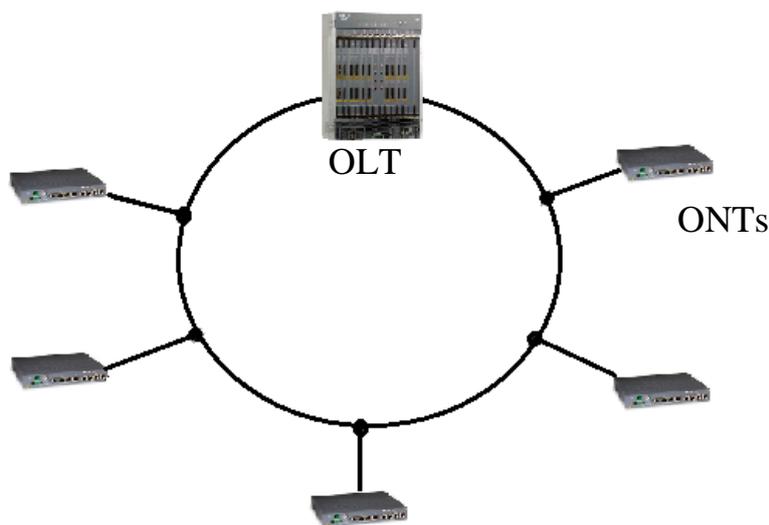


Figura 25. Distribución del OLT y los ONTs en una red en anillo

## 2.3 MULTIPLEXACIÓN

### Multiplexación por longitud de onda (WDM)

Como hemos mencionado anteriormente, hay transmisión de datos de los OLT hacia los ONT, que constituyen el canal descendente, y otro flujo de datos en el sentido contrario, que es el canal ascendente. Ambos, generalmente, viajan a través del mismo medio físico. De esta forma, para que las transmisiones de datos entre estos dos canales no colisionen, se asigna una longitud de onda a cada uno de ellos. La técnica empleada es la denominada multiplexación por longitud de onda (WDM), y en ella se basan las redes FTTH, independientemente de la arquitectura de red. Consideramos que se trabaja con fibras bidireccionales, en las que se comparte en la misma fibra los dos canales, ya que permiten reducir considerablemente los costes, al necesitar la mitad de las fibras.

En el canal descendente (OLT  $\rightarrow$  ONT), el OLT transforma las tramas de voz y datos (P-OLT) y el vídeo (V-OLT), en señales que inyecta en las fibras. En el camino, existen divisores pasivos que filtran la información proveniente del OLT para direccionar la transmisión correspondiente a cada usuario (ONT). Esto se realiza con la técnica de multiplexación por división de tiempo (TDM), enviando los datos a los abonados en diferentes franjas de tiempo.

Como hemos dicho, trabajando con bifibras, en este canal, se envían las señales de voz y datos en una longitud de onda ( $\lambda_D = 1490 \text{ nm}$ ), y el vídeo en otra ( $\lambda_V = 1550 \text{ nm}$ ).

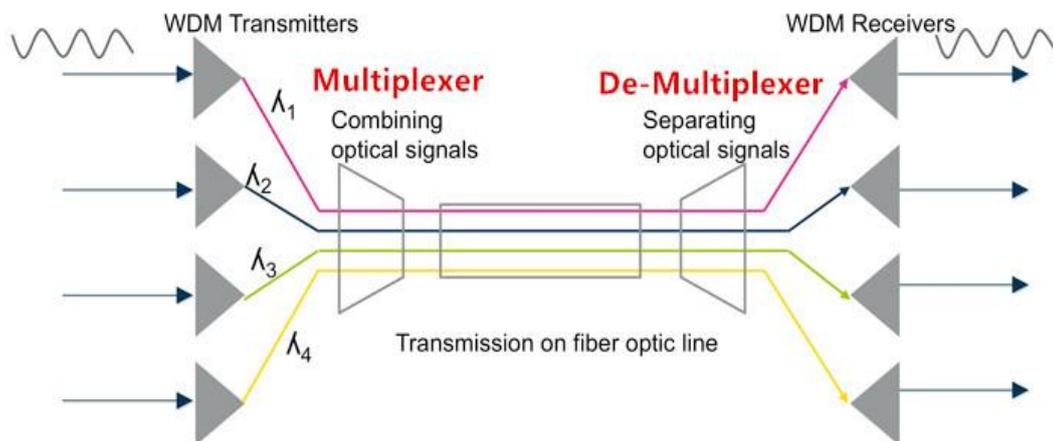


Figura 26. Esquema de un sistema de transmisión WDM.

En cuanto al canal ascendente (ONT  $\rightarrow$  OLT), el ONT realiza la misma operación que hace el OLT en el canal descendente, en cuanto a inyectar en la fibra la señal que desea transmitir al OLT, utilizando TDMA en este proceso. En este caso el divisor óptico se encarga de multiplexar las señales procedentes de los distintos ONT en una sola fibra que lleva la información al OLT. Y en el canal ascendente se transmiten la voz y datos en segunda ventana, con una longitud de onda ( $\lambda_D = 1310 \text{ nm}$ ).

### **Sistemas Unidireccionales y Bidireccionales**

Podemos distinguir entre dos tipos de sistemas en las redes FTTH, en función de cómo se distribuyen los enlaces ascendentes y descendentes.

Los sistemas unidireccionales, en los que se emplean una fibra para el canal de subida y otra para el canal de bajada. Cada cable de fibra tiene una capacidad de  $W$  canales (longitudes de onda), es decir,  $W$  canales para el canal ascendente y  $W$  canales para el descendente.

En los sistemas bidireccionales, se disponen en la misma fibra los enlaces de subida y de bajada, por lo que, tienen una capacidad de  $W/2$  canales de subida y  $W/2$  canales de bajada.

En conclusión, los sistemas unidireccionales son más eficientes, ya que disponen del doble de canales que los bidireccionales, y su aplicación es más sencilla. Por el contrario, los bidireccionales presentan mejores prestaciones de ganancia y potencia a la salida.

### **Multiplexación DWDM**

Como ya hemos comentado, la demanda de capacidad de transmisión ha crecido muy rápido y sigue aumentando exponencialmente, y la única tecnología que puede hacer frente a ese crecimiento es el multiplexado denso en longitud de onda DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

El multiplexado por división en longitud de onda, se basa en acoplar varias fuentes de luz de diferentes longitudes de onda en la misma fibra. Cada portadora óptica forma un canal

que podrá ser tratado independientemente y contener diferente tráfico. Esto proporciona la posibilidad de comunicaciones bidireccionales, y de aumentar considerablemente el ancho de banda. Una vez la información se ha propagado por la fibra y llega hasta el receptor, en este momento es posible realizar el proceso inverso. Es decir, se pueden separar cada una de las longitudes de onda para direccionarlas a diferentes fotodetectores. Los dispositivos que lo llevan a cabo son los multiplexores y demultiplexores.

*“Cuando la distancia entre los distintos puntos de la red es muy pequeña, la introducción de nueva fibra puede ser una solución a los problemas de capacidad. No obstante, cuando las distancias aumentan, o bien se tiene una base de fibra instalada, la DWDM es la alternativa más económica.” [4].*

Los sistemas DWDM permiten comprimir en una fibra multitud de longitudes de onda y funcionar en distancias muy grandes.

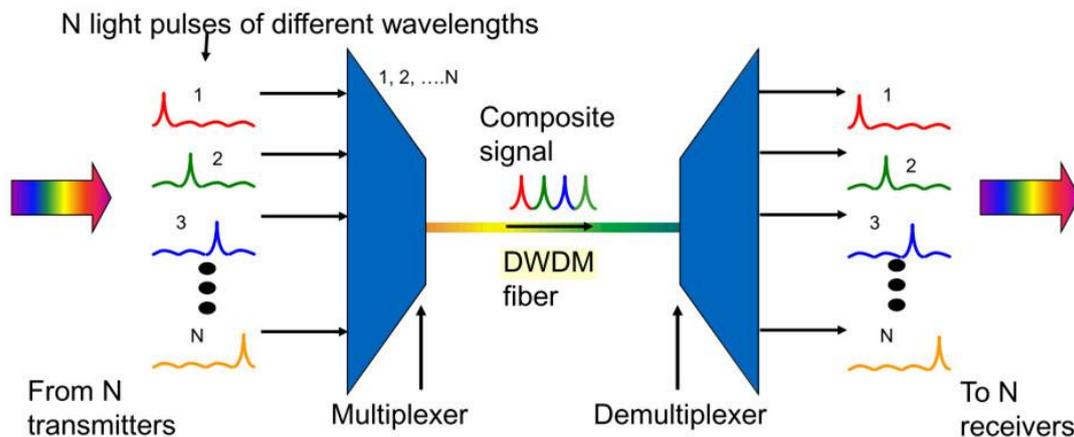


Figura 27. Esquema de un sistema de transmisión DWDM

Las principales desventajas de los canales densamente poblados, a las que se tiene que hacer frente son, la necesidad de filtros de alta precisión, así como láseres de gran precisión y estabilidad, los cuales son muy costosos.

Entonces, con DWDM se consigue un número mayor de canales reduciendo el espacio entre ellos (se pueden combinar 160 canales separados 25 GHz entre sí). Para ello, se reduce la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad o usando fibras de baja dispersión. Está definido para la banda de 1530 – 1610 nm.

## 2.4 SISTEMA OPEN FIBER

En este apartado definiremos la red impulsada por el proyecto OPEN FIBER para cluster C y D. Es decir, para dar cobertura de banda ancha a los pequeños municipios de Italia. En el apartado de “Área de actuación” se define más detalladamente lo que son los cluster C y D, y el plan OPEN FIBER.

La fibra empleada en estas redes va a ser una fibra monomodo estándar, que están definidas en el estándar ITU-T G.652.D. Es una fibra con un diámetro del núcleo en torno a 9  $\mu\text{m}$  y 125  $\mu\text{m}$  incluyendo el revestimiento. Esta optimizada para trabajar a una longitud de onda de 1310 nm (segunda ventana).

Fibre attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Mode field diameter	Wavelength	1310	nm
	Range of nominal values	8.6-9.2	$\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.4$	$\mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125.0	$\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.7$	$\mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6	$\mu\text{m}$
Cladding noncircularity	Maximum	1.0	%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260	nm
Macrobending loss	Radius	30	mm
	Number of turns	100	
	Maximum at 1625 nm	0.1	dB
Proof stress	Minimum	0.69	GPa
Chromatic dispersion parameter	$\lambda_{0\text{min}}$	1300	nm
	$\lambda_{0\text{max}}$	1324	nm
3-term Sellmeier fitting (1260 nm to 1460 nm)	$S_{0\text{min}}$	0.073	$\text{ps}/(\text{nm}^2 \times \text{km})$
	$S_{0\text{max}}$	0.092	$\text{ps}/(\text{nm}^2 \times \text{km})$
Linear fitting (1460 nm to 1625 nm)	Minimum at 1550 nm	13.3	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Maximum at 1550 nm	18.6	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Minimum at 1625 nm	17.2	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$
	Maximum at 1625 nm	23.7	$\text{ps}/(\text{nm} \times \text{km})$

Figura 28. Tabla de los principales atributos de la fibra monomodo según el estándar ITU-T G.652.D

Puede trabajar en segunda y tercera ventana, teniendo atenuaciones máximas de 0.40 dB/km, y en cuanto a coeficiente de atenuación tiene mejores prestaciones en la tercera ventana, con valores máximos de 0.30 dB/km (1530-1565 nm).

Cable attributes			
Attribute	Detail	Value	Unit
Attenuation coefficient (Note 1)	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.40	dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm$ 3 nm after hydrogen ageing (Note 3)	0.40	dB/km
	Maximum at 1530-1565 nm	0.30	dB/km
PMD coefficient (Note 4,5)	M	20	ps/cables
	Q	0.01	%
	Maximum PMD <sub>Q</sub>	0.20	ps/ $\sqrt{\text{km}}$
<p>NOTE 1 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables, indoor cables and drop cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm. Attenuation coefficient at a wavelength longer than 1625 nm (for monitoring purpose) is not well known. In general, the attenuation increases as the wavelength increases, and it may show steep wavelength dependence due to both macro- and microbending losses.</p> <p>NOTE 2 – This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm.</p>			

Figura 29. Valores máximos de la atenuación de una fibra monomodo estándar

## ARQUITECTURA DE LA RED

Al tratarse de áreas poco pobladas, cada enlace abastece áreas grandes de terreno y, por lo tanto, la arquitectura que se plantea es una red de anillo que enlaza el PoP con los nodos principales, y en cada uno de ellos se tiende una red en árbol.

En la red de tipo anillo, los nodos centrales funcionan como repetidores, por lo que se consigue que la señal no se debilite en potencia por las largas distancias.

La distribución de la red será como la figura de la siguiente página:

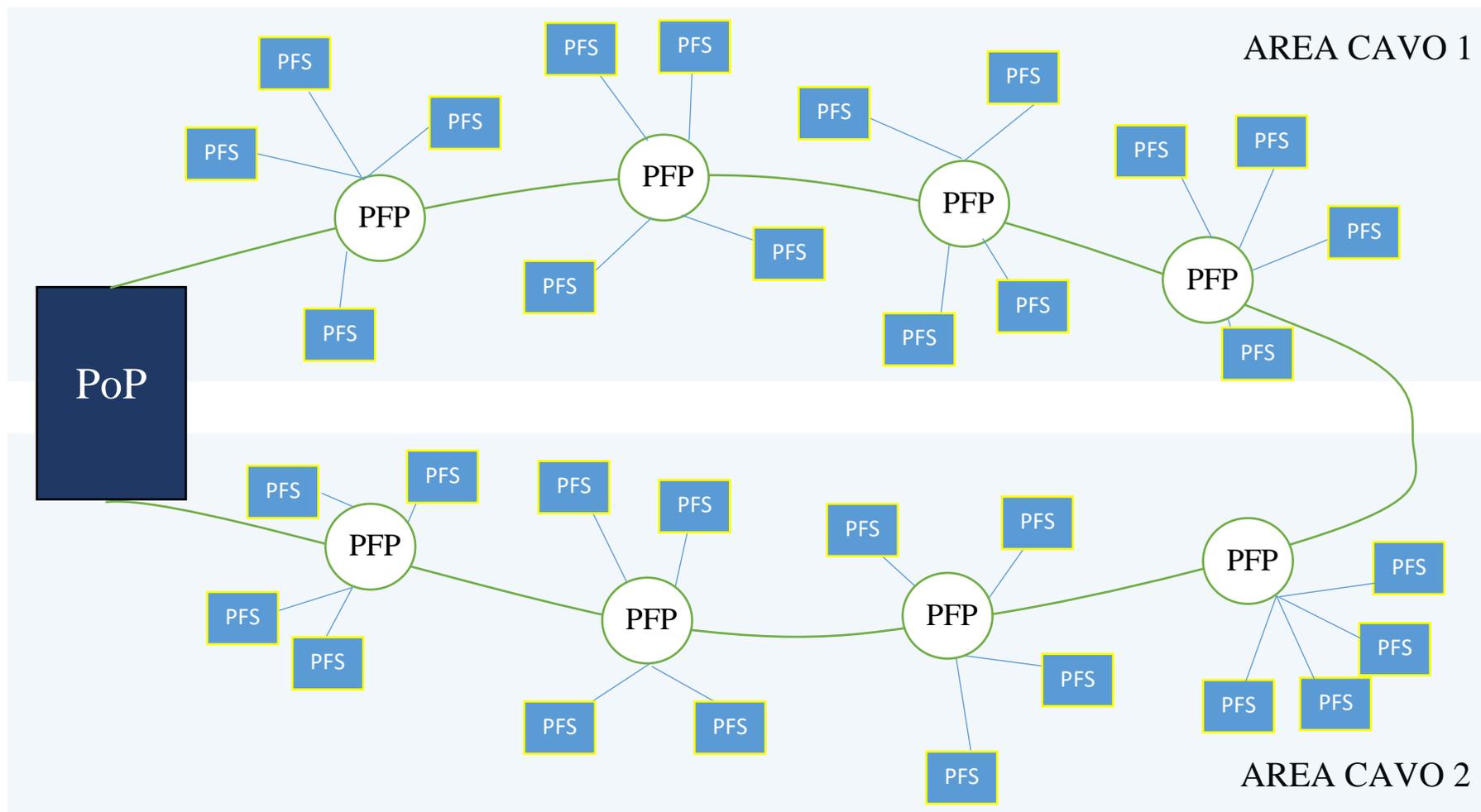


Figura 30. Esquema de una red óptica para cluster C y D definido por el sistema OPEN FIBER

A cada anillo se conectan 8 nodos centrales (PFP: Punto di Flessibilità Primario) que conforman dos “areas cavo”, 4 nodos en cada una.

Por esta red principal se tiende un cable con un total de 192 fibras que se distribuyen de la siguiente manera:

- T1: 24 FO  UI
- T2: 24 FO  libres
- T3: 24 FO  UI
- T4: 24 FO  libres
- T5: 24 FO  UI
- T6: 24 FO  libres
- T7: 24 FO  UI
- T8: 24 FO  libres

En el area cavo, en cada nodo principal se realiza la distribución de las fibras, destinando 24 para las unidades inmobiliarias (UI), y dejando preparadas otras 24 fibras para poder conectarlas a instalaciones públicas o empresas que lo solicitan. Además, siempre conviene tener fibras libres para una posible ampliación de la red. Este aspecto se debe tener siempre en consideración.

En cada nodo PFP se realiza una división 1:4 conectando con cuatro nodos secundarios (PFS). En cada uno de estos nodos PFS se realiza otra división 1:16 para dar servicio a 250 UI.

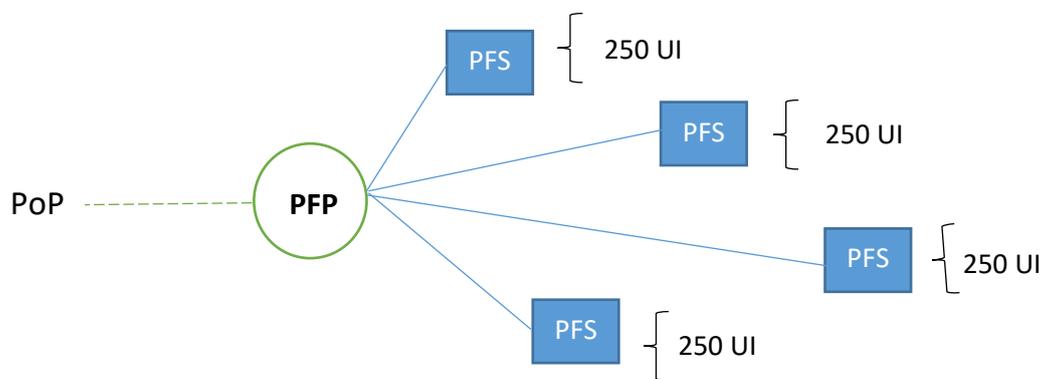


Figura 31. Esquema de la ramificación entre PoP, PFP y PFS

La longitud máxima permitida desde una UI al nodo más cercano es de 40 metros, por lo que habrá que situar el nodo en un punto donde de servicio a los máximos posibles dentro de su capacidad. Los 40 metros se miden hasta donde empieza la propiedad privada, quiere decir, que en algunos casos en los que la casa se encuentra más alejada de esa distancia, pero tiene un terreno privado delante que, si está dentro de la distancia permitida, será válido. Siempre hay que asegurarnos que, en ese caso, el terreno sea privado. Esto se puede hacer echando un vistazo en Google Maps, y en el caso que no esté claro en el diseño, se marcará como duda.

Otro aspecto limitante del diseño de la red será que la distancia entre el PoP y el roe (repartidor óptico de edificio) más lejano no puede superar los 27 km.

En algunos lugares de difícil acceso, se emplea una alternativa mediante sistemas FWA (Fixed Wireless Access), donde se lleva la fibra hasta una antena que sirve a unidades inmobiliarias alejadas. Esto como podemos deducir, generalmente se da en pueblos de montaña de pocos habitantes en los que las casas están relativamente alejadas entre sí.

Entonces en cada PFP habrá 4 PFS con 250 UI como máximo, hacen un total de 1.000 UI por PFP. Para realizar la distribución de las áreas PFS, como mínimo cada una tiene que abarcar 180 usuarios finales, por lo que se tendrá que hacer el mejor diseño posible con PFS de entre 180 y 250 UI.

Dentro de las PFS, los puntos de división finales se denominan PTA (Punto di Terminazione Avanzato), existiendo dos tipos. El PTA enterrado que permite conectar 48 abonados, o el PTA aéreo que tiene la mitad de capacidad, 24 unidades inmobiliarias como máximo.

La longitud máxima del cable desde un hogar o propiedad privada al PTA más próximo es de 40 metros, por lo que en el diseño se deben distribuir las UI de la mejor manera posible teniendo en cuenta todos los límites mencionados.

En la figura siguiente mostramos un ejemplo de arquitectura de un área PFS, donde en total existen 220 UI:

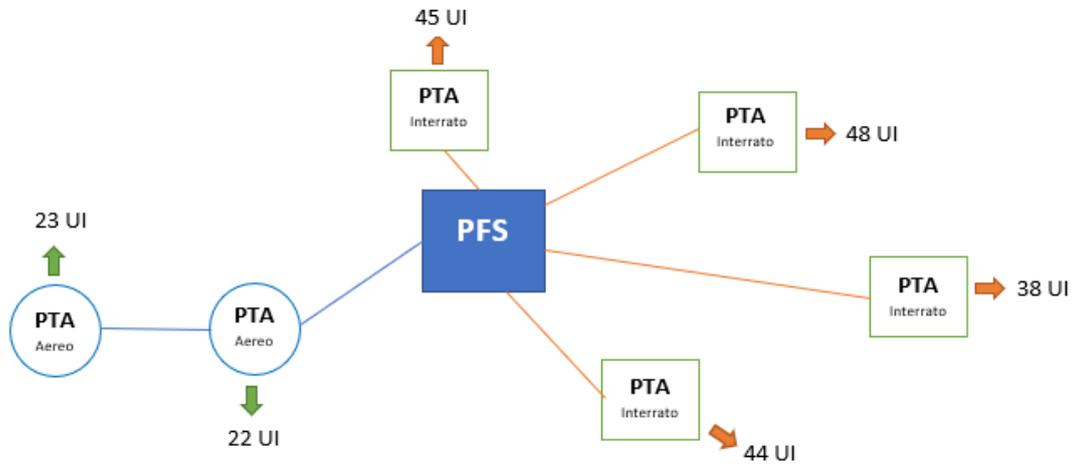


Figura 32. Ejemplo de área PFS compuesta por 4 PTA enterrados que conectan la mayor cantidad de abonados, y 2 PTA aéreos para englobar unidades inmobiliarias más alejadas que no se pueden incluir en un solo PTA.

En el área cavo son 4 PFP x 1.000 UI, son un total de 4.000 UI. Como cada anillo está compuesto por dos area cavo, tendremos el límite máximo de 8000 unidades inmobiliarias.

Por cada PoP se tienen que hacer 10 anillos, por lo que el total de la red tendrá una capacidad para dar servicio a 80.000 usuarios finales (UI).

En cualquier caso, sin contar las fibras libres, y en el caso práctico donde no se distribuyen con valores máximos, debido a que la distribución de las viviendas no es uniforme, se conectan entre 30.000 y 40.000 usuarios por cada PoP.

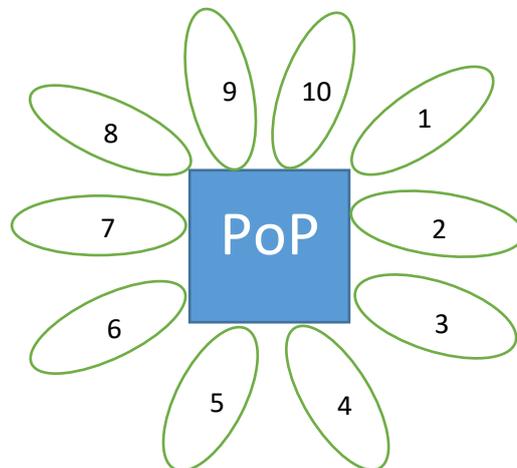


Figura 32. Tendido de 10 anillos por cada central telefónica

Los cables que se pueden utilizar para el diseño de la red son los siguientes, teniendo en cuenta las restricciones según el tendido, de las cuales se hablan en el apartado de “Tendido de la red”:

Tabla 4. Cables posibles para emplear en la proyección de redes OPEN FIBER

Cables	Coste €/m (suministro e instalación)	Notas
Microcable de 12 FO	1,73	Conexión nodos operadoras PAC/PAL (Armarios, centrales BTS)
Microcable de 24 FO	1,4	Conexión nodos de la red
Microcable de 48 FO	1,61	
Microcable de 144 FO	3,43	
Microcable de 192 FO	1,96	
Microcable de 288 FO	4,64	Se instalan dentro de minitubos (1 microcable por cada minitubo)
Cable de 396 FO	6,98	Conexión nodos de la red (tubos de 50 mm)
Cable autoportante de 48 FO	4,27	Conexión nodos de la red. Para tendidos aéreos existentes es obligatorio poner autoportantes. Si se meten en canalizaciones, es necesario un monotubo de 50 mm.
Cable autoportante de 96 FO	4,95	
Cable autoportante de 144 FO	4,05	
Cable autoportante de 192 FO	6,17	
Cable autoportante de 396 FO	10,06	

Otra anotación es que los cables autoportantes de 96 fibras ópticas no son válidos para conductos existentes, y como podemos observar en la tabla, tampoco tenemos la opción de microcables de 94 FO.

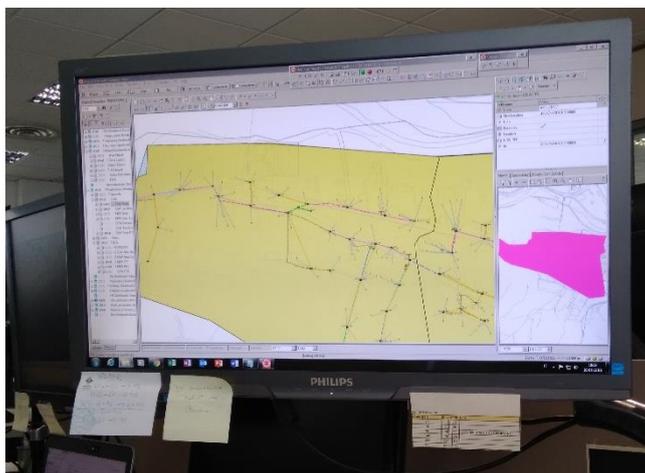
## 2.5 HERRAMIENTAS DE DISEÑO

Los diseños de las redes se pueden realizar mediante software informático especializado como Quantum gis (QGIS) o Physical Network Inventory (PNI).

Permiten administrar un inventario de red inteligente como base para la operación de los servicios de telecomunicaciones. PNI ofrece una solución para la representación de los recursos físicos de las redes, tanto las de acceso como las de transmisión. [5].

PNI soporta las actividades de ingeniería, diseño y administración de redes de fibra óptica: [5].

- Administración de capacidades (ductos, racks, etc.).
- Generación automática de vista esquemática de las redes.
- Fácil uso a través de flujo de trabajo guiado por interfaz de usuario Windows.
- Asistentes (wizzard) para la automatización de tareas complejas o repetitivas.
- Asociación de los elementos de la red FO con rutas aéreas o subterráneas. (postes, armarios, cámaras, etc.).
- Capacidad de trazar la ruta de señal a través de redes de fibra para calcular. pérdidas ópticas y desplegar geográficamente los resultados OTDR.
- Administración de fibras por cuentas o por código de colores.



*Figura 33. Ejemplo de red proyectada con PNI*

Otra herramienta que resulta muy útil es Google Maps, nos permite hacer comprobaciones visuales del lugar donde se está diseñando la red de fibra, de una manera muy rápida. Por ejemplo, si queremos confirmar si existe una arqueta en un punto determinado.



### 3. ELEMENTOS DE LA RED ÓPTICA

En este apartado detallaremos los elementos fundamentales que componen una red FTTH. Desarrollaremos los dispositivos activos de la red (transmisores y receptores), así como todos los elementos pasivos que permiten la transmisión de datos a través de la red.

#### 3.1 TRANSMISORES Y RECEPTORES ÓPTICOS

##### **Transmisores ópticos**

Son dispositivos cuya función principal es convertir la información a transmitir, es decir, señales eléctricas en señales ópticas que acoplan al canal de transmisión, en este caso la fibra óptica. Además, realizan otras tareas como la multiplexación de las señales previa a transmitir, y regulan el tráfico de la red.

Los elementos básicos que componen el transmisor óptico son:

- **Fuente de Luz:** Se emplean uniones p-n (semiconductores), que cuando la unión se polariza directamente, es decir, pasa corriente por ella, los electrones se recombinan con los huecos liberando fotones. Este efecto es conocido como electroluminiscencia. En los sistemas de telecomunicaciones se utilizan dos tipos de emisores.
  - *Emisores de luz no coherente:* diodos LED (Light Emitting Diode). Son dispositivos electrónicos que, como hemos mencionado, emiten luz cuando se polarizan directamente. Tienen dos patillas, una larga que se debe conectar al polo positivo, y una corta al negativo. De esta, es la única forma que permite pasar corriente y por lo tanto emitir, ya que en el otro sentido funciona como un circuito abierto. Dependiendo del material del semiconductor, emitirá luz de diferentes colores.

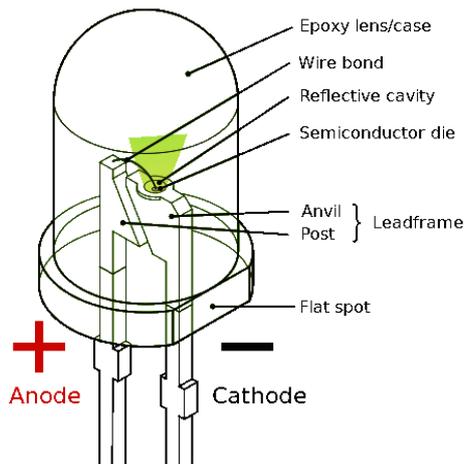


Figura 34. Partes de un fotodiodo

- *Emisores de luz coherente: Láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)*. Son dispositivos ópticos que emiten haces de luz de una sola frecuencia (monocromáticos) mediante la estimulación eléctrica o térmica. Los láseres contienen dos superficies reflectantes en el exterior de la unión p-n, que permiten el confinamiento óptico de la radiación. A diferencia de los diodos LED, el láser emite la radiación en una única dirección en el espacio (rayos colimados), por lo tanto, se concentra mayor energía en esa zona, y posibilita transistores de mayor potencia.



Figura 35. Diodos láser

Consideramos luz coherente cuando las ondas luminosas mantienen una relación de fase constante. Existen dos tipos de coherencia, la coherencia temporal y la espacial.

Seguidamente, realizamos una tabla para comparar ambos tipos de fuentes de luz, que definen los tipos de transistores ópticos utilizados en las telecomunicaciones.

Tabla 5. Características generales de los emisores de luz

<b>Características</b>	<b>LED</b>	<b>LASER</b>
<i>Emisión</i>	Espontánea	Estimulada
<i>Potencia óptica</i>	Baja ~1 mW	Alta ~10 mW
<i>Consumo</i>	Bajo	Medio
<i>Eficiencia de acoplo</i>	< 1 %	30 – 50 %
<i>Anchura espectral</i>	Media, $\sigma_\lambda = 20 - 30$ nm	Pequeña, $\sigma_\lambda = 1 - 3$ nm
<i>Longitud de onda</i>	Depende del material	Monocromático
<i>Vida útil</i>	Muy larga	Larga

A continuación, mostramos las curvas P-I (Potencia óptica en función de la corriente que atraviesa los diodos), primero del LED, y en segundo lugar la del láser. [6]

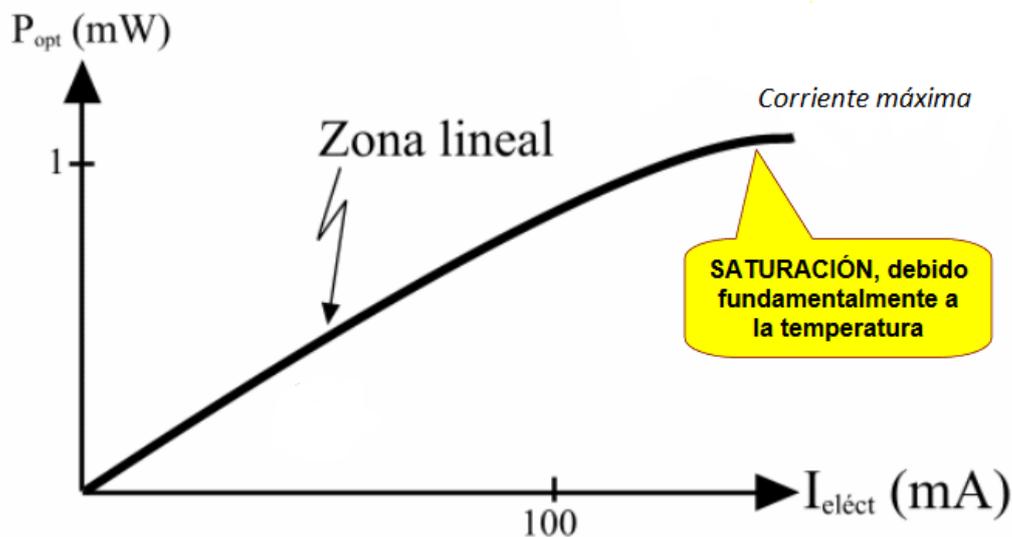


Figura 36. Curva P-I característica de un LED

La curva P-I del diodo LED, nos muestra que la potencia óptica emitida es proporcional a la intensidad de corriente. Tiene una zona lineal hasta llegar a un punto de saturación donde, aunque aumente la corriente, la potencia se mantiene estable.

En la curva P-I del láser, apreciamos que necesita una intensidad de corriente umbral para comenzar su emisión estimulada.

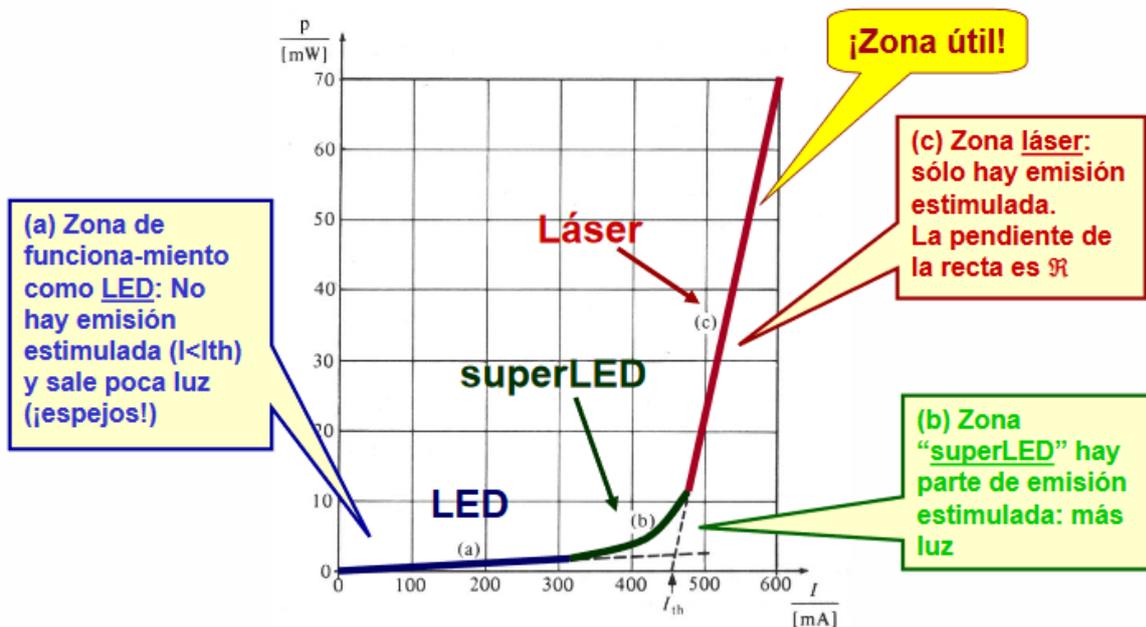


Figura 37. Curva P-I característica de un láser.

En conclusión, los láseres presentan ventajas como una mayor potencia óptica, velocidad de modulación, una anchura espectral estrecha y una eficiencia de acoplo con la fibra bastante superior a la de los LED. Estas características hacen que el láser sea la fuente de luz más destacada en sistemas de comunicaciones por fibra óptica, especialmente cuando se requieren grandes longitudes.

Por el contrario, las ventajas de los LED son su menor consumo, el pequeño tamaño y su alta eficiencia transformando la mayor parte de la energía ( $\sim 80\%$ ) en luz, y no en calor. En cuanto al precio, estos últimos, al tener menores prestaciones, se adquieren a un menor precio.

- **Circuito Driver**

Es un circuito electrónico que convierte la señal de tensión electrónica en una señal corriente para así poder modular la fuente de luz. En el caso de los transistores con láser se encarga, por ejemplo, de que la corriente que suministra sea cercana a la corriente umbral del láser.

- **Circuito Formateado de señal**

Se utiliza una codificación de línea en el transmisor, para minimizar las largas secuencias de 0s y 1s, con el objetivo de facilitar la recepción.

- **Procesador eléctrico**

Acondiciona la señal eléctrica en una forma apropiada para la fuente de luz. Algunos de los procesadores comerciales más empleados son Intel o AMD.

En la imagen inferior vemos la apariencia de un ejemplo de transmisor comercial.



*Figura 38. Ejemplo comercial de un transmisor óptico*

## **Receptores Ópticos**

Son los dispositivos que se encargan de la conversión de las señales ópticas en señales eléctricas para su posterior procesado, y así extraer la información proveniente del transmisor. Se ubican en la terminación de la fibra.

El componente que realiza esta función es el fotodiodo, es un semiconductor formado por una unión p-n, que se polariza en inversa. Cuando recibe luz, es decir, inciden fotones sobre ella, se produce el fenómeno de absorción estimulada, generando circulación de corriente eléctrica (par electrón - hueco). Los materiales empleados para su composición generalmente son Silicio, Germanio o InGaAs.

En sistemas de comunicaciones ópticas, se emplean dos tipos de fotodetectores:

- **Fotodiodo PIN:** Es un diodo semiconductor al que se le introduce una zona intermedia (región intrínseca), para elevar su eficiencia. El problema reside en que al aumentar la trayectoria por la que se propagan los portadores de carga fotogenerados, provoca el aumento del tiempo de respuesta. Por lo que se debe elegir el tamaño de esta zona intrínseca, en función de la relevancia que demos a la eficiencia o al tiempo de respuesta.
- **Fotodiodo APD o de avalancha:** tienen una estructura similar a los anteriores, pero trabajan con voltajes inversos mayores. Esto provoca que los fotoportadores se aglomeren en la zona de avalancha del diodo, aumentando así la ganancia interna, en consecuencia, mejorando la respuesta del dispositivo.

El fotodiodo APD tiene una sensibilidad (magnitud mínima capaz de detectar) menor que la del PIN, permitiéndole detectar niveles de potencia inferiores. La sensibilidad se suele medir en dBm. Son más caros y consumen más, requieren voltajes de alimentación más altos para su funcionamiento. Además, los tiempos de respuesta son menores, permitiendo velocidades de transmisión mayores. Por otro lado, los fotodiodos PIN, presentan niveles de ruido menores, mayor fiabilidad y facilidad de fabricación. Su vida útil es más larga.

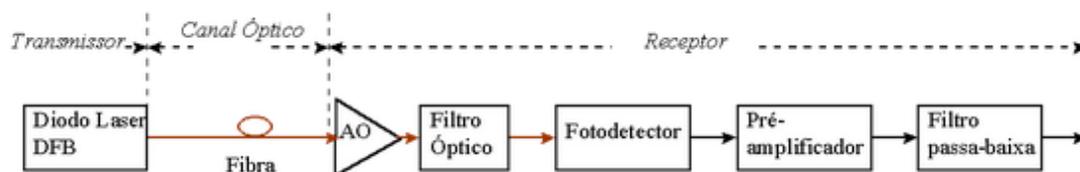


Figura 39. Esquema de los bloques de un sistema de transmisión, con las partes que componen un receptor óptico con pre-amplificación.

En la imagen superior vemos la estructura general de un enlace óptico, empleando un receptor con pre-amplificación.

En muchos casos la potencia que llega al receptor es débil, debido a las pérdidas producidas en el canal. Para contrarrestar la atenuación del cable, es común utilizar un amplificador óptico para aumentar la amplitud de la señal, y así poder ser detectado por el fotodiodo, especialmente cuando los fotodetectores usados son de tipo PIN. Debido al bajo ruido que introducen y que son más económicos, los fotodiodos PIN son los más empleados en comunicaciones, ya que con la fase previa de amplificación podemos obtener unos resultados deseados, suponiendo un menor coste que con los fotodiodos APD.

Igualmente, las corrientes eléctricas generadas por los fotodiodos en la salida son del orden de nanoamperios (nA), por lo que también se necesita una ‘pre-amplificación’ de la señal antes de trabajar con ella para la detección.



Figura 40. Fotodetector



Figura 41. Ejemplo de equipo receptor óptico comercial

## Transceptores

Un transceptor es un dispositivo que contiene un transmisor y un receptor, y ambos comparten parte de la circuitería eléctrica. Para las comunicaciones ópticas se emplean transceptores SFP y funcionan para fibras monomodo y multimodo. [7]



Figura 42. Transceptor SFP para fibras SM y MM

## 3.2 CONEXIONES Y EMPALMES ÓPTICOS

Las redes ópticas están formadas por multitud de tramos de fibra conectados entre sí, además, en muchas ocasiones se deben realizar uniones debido a cortes en la fibra, mantenimiento o para ampliar la red. Los componentes encargados de esta labor, aportando flexibilidad a la red, son las conexiones y empalmes ópticos. La diferencia entre ellos es que los conectores ofrecen la unión de forma temporal, y los empalmes, de forma permanente.

El impacto de estos elementos en la red, son las pérdidas de potencia que se producen en la unión, por lo tanto, se debe elegir la mejor opción según las condiciones que tenemos.

### Conectores ópticos

Los conectores ópticos son elementos pasivos que conectan dos o más fibras ópticas entre sí, o terminación de la fibra (conexión con la fuente o el detector). Su objetivo principal es realizar la unión con las mínimas pérdidas posibles, y permite una unión fácil, económica y de forma temporal.

Existen una gran variedad de conectores debido a los diferentes tipos y tamaños de fibra que se emplean en las comunicaciones ópticas. Podemos clasificarles en tres tipos:

- *Simplex*: Conector para una fibra
- *Dúplex*: Conector para dos fibras
- *Multifibra (xMT)*: Conector para entre 4 y 72 fibras.



Figura 43. Cable de fibra con conectores multifibra

Hay diferentes tipos de conectores, pero todos están integrados por estos tres mecanismos: [8]

- **Férula:** Es el componente más importante de los conectores de fibra óptica ya que es la encargada de sujetar, proteger y alinear la fibra de vidrio. Las férulas usualmente son hechas con cerámica y plástico o metal de alta calidad.
- **Mecanismo de acoplamiento:** Mantiene el conector en su lugar cuando está conectado a otro dispositivo.
- **Cuerpo:** Es la estructura que sostiene la férula y el mecanismo de acoplamiento.

El pulido de la férula determina la pérdida de retorno de un cable de fibra óptica, pudiéndose realizarse de estas tres formas: [8]

- **PC (Physical Contact):** Se pulen con una ligera curvatura, lo que elimina el espacio de aire entre las férulas. La pérdida de retorno de estos conectores está entre -30 dB y -40 dB.
- **UPC (Ultra Physical Contact):** Los UPC también tienen una curvatura, pero mucho más pronunciada. Su pérdida de retorno va desde -40 dB a -55 dB, lo que los hace ideales para transmitir señales de TV y datos.
- **APC (Angled Physical Contact):** Las férulas de los conectores APC tienen un ángulo de  $8^\circ$ , que hace que las conexiones sean mucho más unidas. Los estándares dictan que deben tener una pérdida de retorno de -60dB.

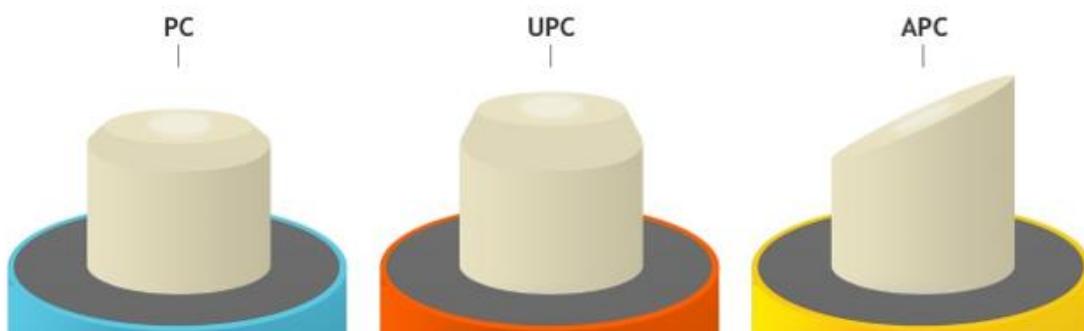


Figura 44. Tipos de pulido de la férula de la fibra, que condiciona las pérdidas de retorno

A continuación, vemos los conectores comerciales más utilizados en las comunicaciones ópticas. Todos ellos se pueden emplear para fibras monomodo y multimodo.

CONECTORES	Diámetro de férula	Pérdidas de inserción	Imagen
<b>ST</b> (Straight Tip)	0.9 – 3 mm	0.5 dB	
<b>SC</b> (Subscriber Connector)	2 – 3 mm	0.2 - 0.45 dB	
<b>LC</b> (Lucent Connector)	1.25 mm	0.1 dB	
<b>FC</b> (Ferule Connector)	2.5 mm	0.5 – 1 dB	

### Adaptadores de fibra

Son elementos ópticos pasivos encargados de permitir la unión entre conectores de fibras con mínimas pérdidas de inserción posibles. Para ello deben alinear perfectamente y mantener bien ajustada la parte férrea de los conectores. Existe gran variedad de modelos, correspondientes a los diferentes conectores de fibra, incluyendo la unión de dos conectores diferentes. Facilitan una conexión rápida y versátil, y se emplean también para conectar un tramo de la fibra a un equipo de medición.

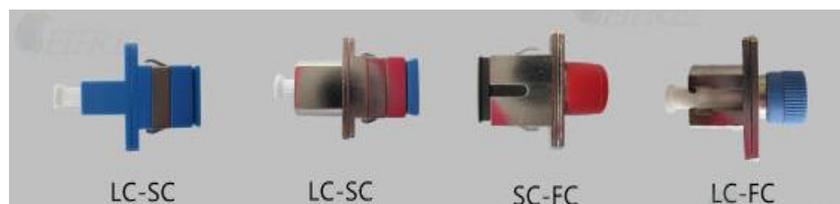


Figura 45. Tipos de adaptadores de fibra para diferentes conectores

## Empalmes ópticos

En cuanto a los empalmes ópticos, su función principal es la de unir dos fibras, al igual que en los conectores, introduciendo las mínimas pérdidas posibles. La diferencia es que esta unión es de forma permanente, y se tienen que cubrir para protegerlas.

Existen dos tipos de métodos para realizar estos empalmes:

- **Empalme mecánico:** La unión se realiza situando de forma lineal los dos extremos de fibra en un accesorio como el de la figura inferior, es importante que ambos núcleos coincidan exactamente. Este accesorio sujeta ambas fibras e inserta un adhesivo para fijar los extremos. Posteriormente se protege con manguitos especiales, siendo ambiental y mecánicamente estable, por lo que puede durar un tiempo amplio.

El procedimiento de preparación de las fibras se realiza de la misma manera que se desarrolla en el apartado siguiente, de empalmes por fusión.



*Figura 46. Estructura para empalme mecánico*

- **Empalme por fusión:** Se realiza la unión mediante fusión, por medio de pequeños arcos eléctricos que calientan el material, realizando un empalme que si se realiza bien tiene pérdidas mínimas de inserción. Este empalme es realizado con una fusionadora óptica, que es un equipo bastante caro y sofisticado.

Es un proceso que requiere tomar medidas de seguridad (lentes, guantes, zona segura), y que se debe realizar por personal cualificado.

Procedimiento para realizar la fusión:

1. Pelar la protección de los extremos de los cables y realizar un corte recto en ambos (con cortadora de precisión).
2. Limpiar con alcohol absoluto, de adentro hacia afuera, para retirar cualquier partícula que pudiera existir.
3. Se colocan con extremo cuidado sobre la fusionadora en las ubicaciones correspondientes, aproximándoles sin sobrepasar la línea de los electrodos.
4. Se procede a la fusión con el equipo.
5. Se protege el empalme.



Figura 47. Cortadora de precisión para fibra



Figura 48. Equipo fusionador de fibra de última generación

Comparando ambos métodos, los empalmes mecánicos no requieren de personal ni herramientas muy especializadas, por lo que resultan muy económicos y rápidos, a diferencia de las fusiones. Por contra, tienen pérdidas de inserción del orden de 0.2 dB, y de retroreflexión elevadas, frente a las fusiones (0.1 dB de pérdidas de inserción y pérdidas prácticamente nulas de retroreflexión). Ambos métodos sirven tanto para fibras multimodo como monomodo, pero hay que tener en cuenta que, para estas últimas, debido al tamaño más reducido de su núcleo, es más difícil la conexión y, por tanto, es más recomendable emplear una fusionadora.

## **Pérdidas por conexiones**

Las pérdidas por conexiones son atenuaciones puntuales que sufren las señales en las uniones entre fibras, o entre una fibra y un dispositivo. Estas pérdidas en algunos casos se pueden evitar, pero no siempre.

Existen tres tipos de conexiones según los elementos que se estén conectando:

- *Acoplo fuente de luz – fibra óptica*: Se puede producir una atenuación muy fuerte, debido a la dificultad de inyectar todos los haces de luz emitidos en el núcleo de la fibra.
- *Acoplo fibra óptica – detector*: El área de fotodetección suele ser grande en comparación con el núcleo de la fibra, por lo que las atenuaciones son más pequeñas.
- *Acoplo fibra – fibra*: Dependen del mecanismo de conexión empleado, que acabamos de explicar, pudiendo ser mínimas con la técnica de fusión, o bastante más elevadas con conectores mecánicos ( $< 1$  dB).

### 3.3 SPLITTERS

Los splitters son divisores/combinadores ópticos, es decir, elementos que separan o unen señales ópticas para poder distribuir los datos por toda la red. Son elementos de distribución óptica bidireccionales, esto quiere decir que, si se instalan de una manera, son capaces de dividir la potencia de la señal de entrada en N señales de salida (1 x N), y si se instala en sentido inverso, actúa como acoplador, combinando las N señales de entrada, en una de salida. Aunque no todos los splitters tienen la capacidad de ser reversibles, existen modelos que solo funcionan como divisores ópticos.

Son dispositivos pasivos (sin elementos electrónicos) que funcionan de forma autónoma, suponiendo un coste aceptable y requiriendo poco mantenimiento.

Cuando se divide la señal, esta tiene menor potencia, pero mantiene el mismo contenido óptico de datos, de tal forma que cuantas más veces se divida, a más abonados podemos hacer llegar la misma señal óptica.

*“El tipo más común de splitter de fibra óptica divide la salida en señales iguales, la mitad de la señal se envía a un tramo de la salida y la mitad restante a la otra. Aunque también es posible desviar mayor cantidad de señal a un lado del splitter que del otro. Estos divisores se identifican con un número que representan la división de señal, como un 50/50 si la división es en partes iguales, o 80/20 si el 80% de la señal va a un lado y sólo 20% para el otro.” [9].*



Figura 49. Splitter PLC con factor de división 1x8

El factor de división N de un splitter es el número de salidas en las que se divide la entrada, teniendo como valores típicos 2, 4, 8, 16, 32 y 64 (recomendación máxima de la ITU). Por lo tanto, en el caso general, las pérdidas de potencia de las señales de salida debido exclusivamente a la división se podrán cuantificar en función de N como vemos en la siguiente tabla. Teniendo en cuenta que unas pérdidas de 3 dB suponen una reducción a la mitad de la potencia en lineal (caso de N=2), y cada 3 dB más, corresponden a volver a dividir la señal en la mitad.

$$L_{att\_divisor} (dB) = 10 * \log \frac{1}{N}$$

Tabla 6. Pérdidas del divisor en función del factor N (número de salidas)

N	Pérdida de divisor
2	3 dB
4	6 dB
8	9 dB
16	12 dB
32	15 dB
64	18 dB

A estas pérdidas se le tiene que añadir las pérdidas adicionales por conexión o imperfecciones (generalmente se añade 1 dB para considerar las pérdidas totales por división).

Los tipos de divisores ópticos más utilizados en redes FTTH son los denominados PLC (de tipo encapsulado) que se basan en un circuito de onda de luz planar, y los FBT (confeccionados mediante fusiones múltiples). Los primeros son más eficaces que los FBT cuando el factor de división es mayor, es decir, cuando tienen más puertos de salida.

Ambos tipos se fabrican pensando en que su montaje se tiene que realizar en cajas de distribución.



Figura 50. Splitter FBT 1x2

### 3.4 AMPLIFICADORES Y FILTROS ÓPTICOS

#### Amplificadores ópticos

Un amplificador óptico es un dispositivo que aumenta la amplitud de la señal óptica (incrementa la potencia) directamente. Evitando así la necesidad de convertir la señal óptica a eléctrica para amplificarla y posteriormente convertirla de nuevo en óptica, ya que es un proceso que requiere un costo elevado y supone pérdidas de velocidad.

Estos dispositivos son esenciales en las redes ópticas de larga distancia, para compensar las atenuaciones producidas por el canal. Como hemos visto, la fibra es el medio de comunicación que menos pérdidas introduce, por lo que con este tipo de redes FTTH, se reduce el número de amplificadores necesarios y/o el requerimiento de ganancias mayores de estos.

Según la aplicación a desempeñar, podemos clasificar los amplificadores en:

- **Amplificadores de línea:** Aumenta la potencia de la señal para compensar las pérdidas por el canal. Generalmente se instalan varios amplificadores en cascada a lo largo de la línea. Siendo importante que el primero de ellos sea un amplificador de bajo ruido (LNA), ya que al ser la señal que recibe éste la más débil, es fundamental que se amplifique sin estropear la SNR.

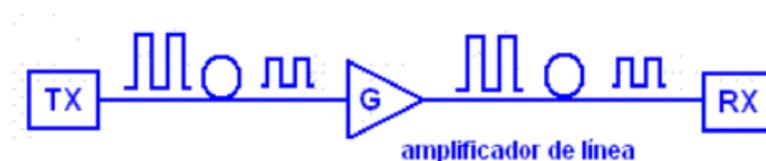


Figura 51. Esquema de la disposición de un amplificador de línea en un sistema de transmisión

- **Preamplificadores:** Se instalan antes del receptor, para mejorar la relación señal a ruido (SNR) antes de ser detectada por el fotodiodo.
- **Amplificadores de potencia:** Se instala después de la fuente emisora de luz, con el objeto de elevar el nivel de potencia de la señal y así incrementar la distancia de transmisión. En algunas ocasiones, también se colocan antes de los divisores ópticos, para compensar las pérdidas que sufre la señal al atravesarlos.

El funcionamiento de los amplificadores ópticos se basa en la utilización de fibra óptica dopada y el bombeo de un láser de onda continua a una frecuencia ligeramente mayor a la que amplifican.

*“Una fuente de bombeo inyecta una energía en la zona activa del amplificador. Esta energía es absorbida por los electrones que incrementan sus niveles de energía produciéndose la inversión de población. Al ser alcanzados estos electrones por los fotones de la señal óptica de entrada caen a unos niveles energéticos más bajos dando lugar a un nuevo fotón, esto es el proceso de emisión estimulada, produciéndose así la amplificación de la señal” [10].*

Las ventajas que presentan los amplificadores ópticos es que no necesitan saber la codificación que se emplea, opera a casi cualquier velocidad y debido a su amplio ancho de banda, trabaja a varias longitudes de onda. Esta característica es la que hace posible las WDM, aunque al ser finito el ancho de banda, limita el número de canales en los sistemas WDM.

Además, presentan algunas otras limitaciones. Introducen ruido adicional que es amplificado junto con la señal, y al no regenerar la señal se produce un efecto acumulativo de la dispersión (introducen unos picosegundos (ps) de retraso). La ganancia de los amplificadores no es uniforme en todo el rango de operación por lo que se debe ecualizar, de esto se ocupan los filtros ópticos, de los que hablaremos más adelante.

Aunque en ocasiones se emplean amplificadores SOA (Semiconductor Optical Amplifier) y amplificadores Raman, los más habituales en redes ópticas son los Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA).

Estos tienen mejores prestaciones, destacando las reducidas pérdidas de inserción en las uniones con la fibra, el ruido que genera es inferior (3 – 5.5 dB), es poco sensible a la polarización de la señal y la saturación de la ganancia no ocasiona distorsión. Presta ganancias superiores a los 30 dB (1000 veces en lineal).

Un inconveniente es que solo opera en tercera ventana, pero la solución está en otros dispositivos similares dopados con otros elementos, que pueden operar en otras ventanas.

## Filtros ópticos

Son dispositivos que sólo permiten el paso a través de él, de una banda de longitudes de onda determinada, atenuando y eliminando el resto de la luz.

En las redes ópticas, los filtros se encargan fundamentalmente de la eliminación del ruido que introducen otros dispositivos, como por ejemplo los amplificadores ópticos. Así como la ecualización de la respuesta de estos últimos. Gracias a la capacidad para limitar las longitudes de onda de paso, permite la selección de canales en sistemas WDM.

Las características principales que deben tener los filtros para realizar estas tareas de una forma óptima son, unas bajas pérdidas de inserción, y una banda de paso plana para evitar distorsionar la señal.

A continuación, nombramos algunos de los filtros más habituales en este tipo de redes:

- Filtros de interferencia
- Filtros de Fabry-Perot
- Filtros de Mach-Zender
- Filtros sintonizables
- Filtros acopladores



*Figura 52. Ejemplo de un filtro óptico comercial*

### 3.5 OTROS ELEMENTOS DE LA RED

#### Aisladores ópticos

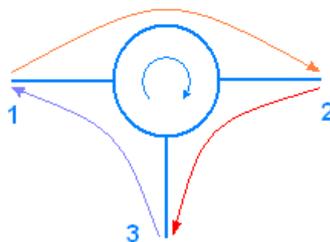
Los aisladores ópticos (o aislador) son elementos que se encargan de que la propagación de la luz sea en una única dirección. Esta función y en consecuencia estos elementos, son importantes en las comunicaciones ópticas para impedir que las reflexiones alcancen otros dispositivos, provocando su mal funcionamiento o dañándolos.



*Figura 53. Apariencia de un aislador óptico*

#### Circuladores ópticos

Los circuladores se consideran un tipo de aislador óptico con varios puertos. Permiten el paso de la luz que entra por uno de los puertos hacia el puerto siguiente. Es decir, del puerto 1 pasan al puerto 2, del 2 al 3, y del 3 al 1. Esto lo podemos ver mejor representado en la siguiente figura.



*Figura 54. Puertos de un circulador óptico*

Se pueden usar para transmitir la señal de una fibra unidireccional a un enlace de comunicación de fibra dúplex. Se emplean también junto a filtros ópticos, para extraer o añadir una longitud de onda a una señal WDM.

## **Distribuidores de fibra**

Los distribuidores de fibra óptica (ODF), también conocidos como paneles de parcheo (patch panel), son estructuras que se ubican en la terminación del enlace final de la fibra, para realizar la conexión entre la fibra y el equipamiento óptico.

Normalmente son una especie de caja que tienen un panel con los adaptadores y una bandeja para los empalmes y almacenar el exceso de fibra. Hay modelos para montaje en pared y otros para montaje en bastidores, situándose generalmente cerca del equipo.

Facilitan un etiquetado de las fibras y una fácil y rápida conexión y desconexión de estas.



*Figura 55. Distribuidor de fibra de 12 salidas*

## **Latiguillos de fibra óptica**

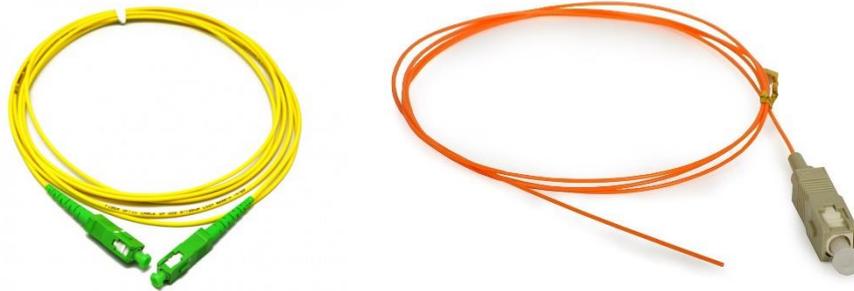
Los latiguillos de fibra óptica (Patch Cord) son fibras de longitud muy reducida con una buena cubierta y protección gruesa, que tiene conectores en los dos extremos.

Su utilización más habitual es en los distribuidores de fibra comentados. Ya que gracias a su gran flexibilidad y radio de curvatura muy pequeño (~2.5 cm), pueden emplearse en habitáculos pequeños. También se pueden emplear para conexiones cruzadas de fibra, o conectar el equipamiento de prueba y medición a los enlaces de fibra.

Las longitudes en exceso se pueden almacenar en círculos con un radio de curvatura superior al mínimo establecido por el fabricante.

Un pigtail, es lo mismo que el patch cord, pero sólo tiene conector en uno de los extremos. Tiene los mismos usos, pero en este caso se realiza la unión con la fibra por medio de empalmes mecánicos o de fusión, proporcionando así una terminación de calidad a la fibra.

Tanto los latiguillos como los pigtail deben tener el mismo diámetro del núcleo de la fibra, y es aconsejable que coincida también con el de revestimiento. El color de la cubierta de ellos coincide también con el color empleado en las fibras, siendo amarillas en monomodo y naranjas en multimodo. Por último, los conectores serán compatibles con la fibra y los adaptadores.



*Figura 56. Latiguillo de fibra monomodo a la izquierda, y pigtail de fibra multimodo en la parte derecha de la imagen. Ambos con conectores SC.*

### **Cajas de empalme**

Como su propio nombre indica, son cajas para proteger el segmento de fibra donde se ha llevado a cabo un empalme. En los extremos de la caja, hay tubos por donde se insertan las fibras.

En función de donde esté el empalme que tenemos que proteger, existen cajas para exteriores y para interiores. Siendo imprescindible en las primeras, que sean impermeables y preparadas para estar al aire libre. Existen en el mercado diversos modelos, preparados para cada tipo de empalme.



*Figura 57. Caja de empalme*

## **Armarios distribuidores de fibra óptica**

Son elementos que tienen la misma función que las cajas de distribución de fibra óptica, pero se usan diferentes nombres, porque con armarios nos referimos a las de tamaño considerablemente superior a las cajas, que se traduce en capacidad para albergar una mayor cantidad de fibras. Aunque también hay armarios en el interior de grandes edificios, es más habitual que se necesiten para exteriores.

Un aspecto para tener en cuenta es que todos los elementos que hay en su interior tienen que estar sujetos y ajustados.



*Figura 58. Armario distribuidor de fibra para exteriores*



## 4. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA RED

En este capítulo se desarrollarán algunos de los aspectos más importantes a la hora de diseñar una red de telecomunicaciones, en este caso de FTTH.

### 4.1 ÁREA DE ACTUACIÓN

Para realizar cualquier proyecto de FTTH, se tiene que hacer un estudio previo de la zona de actuación donde se va a llevar a término.

En el estado italiano se ha puesto en marcha en los últimos años un proyecto (Open Fiber) de mejora de las comunicaciones de banda ancha, con el fin de hacer llegar la tecnología FTTH a la mayor parte del país.

Para ello, el gobierno ha hecho una clasificación de todos los municipios del estado, dividiéndoles en cuatro áreas, denominadas cluster A, B, C y D. El cluster es un agrupamiento de municipios en función de cuáles son los que las operadoras telefónicas consideran más rentables para invertir en redes fijas.

En el cluster A se encuentran todas las poblaciones con un gran número de habitantes (densidad de población elevada), que son donde más interesa invertir a las operadoras, ya que la relación entre el número de posibles usuarios y la infraestructura necesaria es muy conveniente. Y por este motivo, trabajan en esa área más de una operadora. Según se va avanzando en las letras, son municipios peores desde el punto de vista de inversión de las compañías. Al cluster B pertenecen las ciudades donde existe una sola operadora.

Entonces, en los cluster A y B son las operadoras de telecomunicaciones las que asumen los gastos de las infraestructuras porque son áreas muy rentables. Mientras que en los cluster C y D, como son municipios de zonas rurales poco poblados y con mayor dificultad geográfica para acceder con la red, se han utilizado fondos públicos para financiar parte de los proyectos. Es una medida de las administraciones para llevar la red a zonas que por rentabilidad las operadoras no lo hacen, y es así la única manera de llevar el servicio de internet de alta velocidad a todos los ciudadanos.

La forma de conseguir una licencia para llevar a cabo las redes ópticas en los cluster C y D, es a través de un concurso público, donde las operadoras pujan por obtener dichas licencias beneficiándose de las subvenciones públicas.

Entonces, el gobierno italiano lo que promueve con Open Fiber es crear una red nacional de fibra óptica con las mejores prestaciones posibles que conecte al mayor número de municipios del país.

Pero el estudio no se realiza en base a la red nacional, sino que se hacen estudios de territorios pequeños, y es la unión de todos estos la que va a formar esa red nacional. A continuación, vemos la terminología que se emplea para definir la escala de la red. Es decir, el nivel de agrupación de redes:

- Red de acceso: Conecta varios usuarios finales a un nodo de acceso. Estas redes son compatibles con otras que llegan a los hogares y forman parte de estas redes de acceso, como por ejemplo WLAN (Wireless LAN).
- Red Local: También conocida como red urbana. Conecta un conjunto de nodos de acceso, que pueden pertenecer a una ciudad o área muy poblada.
- Red municipal: Conecta las redes de varios municipios, y a su vez, está conectada con la red regional.
- Red regional: La red regional une las redes municipales de una determinada región. Además, está conectada a la red nacional.
- Red Nacional: Conecta las redes regionales, y a su vez está conectada con las redes nacionales de otros países. Esta red es muy segura y tiene elevadas prestaciones. Debido a las altas inversiones necesarias para realizarlas, suelen ser de pocos propietarios. Un ejemplo de red nacional es la denominada GARR, red dedicada a dar servicios avanzados a la comunidad académica.

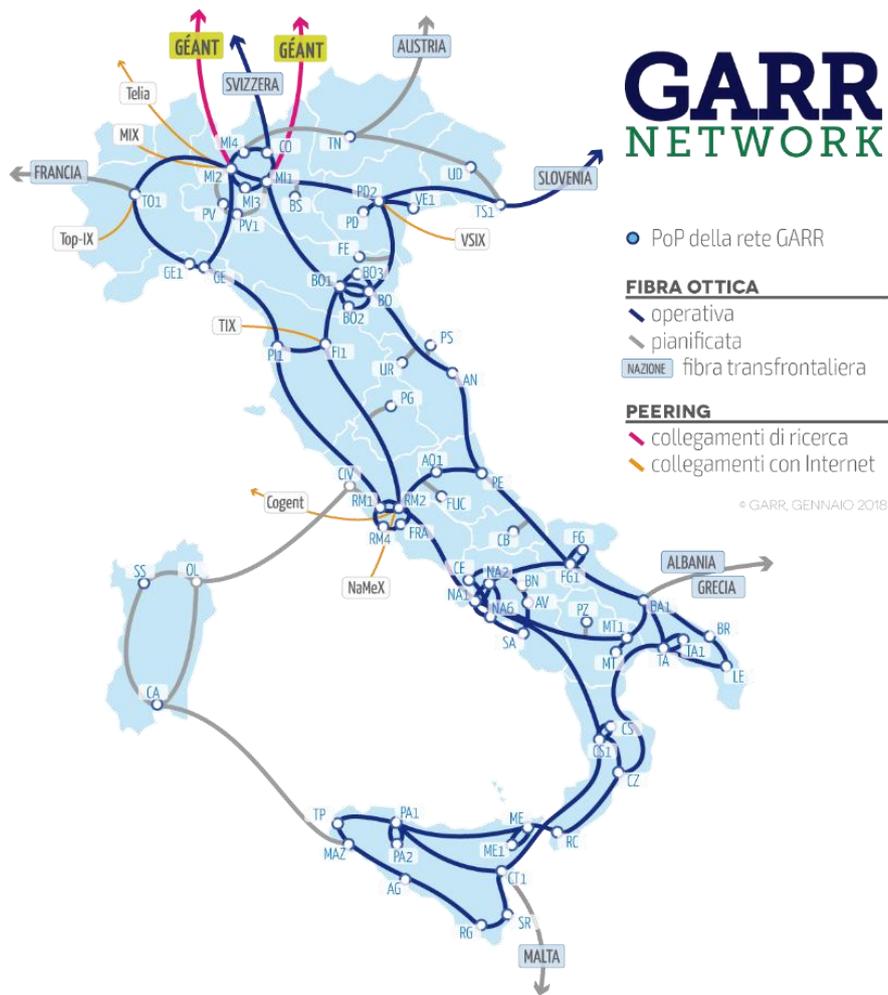


Figura 59. GARR. Red nacional de fibra óptica destinada a el mundo académico y de investigación

Un aspecto para tener en cuenta a la hora de diseñar la red es, estudiar la zona a la que se pretende dar cobertura. Se quiere tener conocimientos de parámetros como la densidad de población, el tipo de edificaciones, la topografía de la zona... Y así, realizar la instalación más adecuada para cada tipo.

Entonces, vamos a diferenciar primero entre los distintos tipos de población que pueden existir en esa área:

- Zonas muy pobladas: Son parte de las ciudades, que tienen bloques de pisos altos y muy cercanos entre sí. Suelen ser zonas donde abundan edificios de oficinas y empresas, hecho que generalmente hace necesario una red con un gran ancho de banda, e incluso ofrecer acceso a servicios específicos, como por ejemplo videovigilancia. El despliegue de cableado es enorme, y dentro de los edificios será necesario instalar armarios de telecomunicaciones de tamaño considerable.

- Zonas residenciales: Es el tipo de área más común, nos referimos a lugares donde los edificios son habitualmente viviendas unifamiliares, bloques de pisos pequeños y también pequeños comercios. La densidad de población es menor, ya que las viviendas están más separadas y en cada bloque hay menos vecinos. Los servicios que se piden son los comunes, una banda ancha para tener acceso a internet (más tráfico de bajada que de subida) y telefonía.
- Zonas poco pobladas: Son áreas donde las edificaciones están muy separadas, habitualmente casas unifamiliares, por lo que la densidad de población es muy baja. Se dan en zonas rurales, polígonos industriales, algunas zonas del extrarradio de las ciudades... Es importante realizar un buen estudio de mercado en estas áreas para comprobar su viabilidad, ya que son áreas grandes con pocos abonados. Por lo que en muchas ocasiones resulta necesario añadir amplificadores a la red.

En segundo lugar, entraremos a estudiar como diseñar la red de acceso en función del tipo de edificio. Comprobaremos, además, su entorno más próximo para saber si existen arquetas de comunicaciones, canalizaciones, el lugar idóneo para ubicar los nodos de acceso, etc.

Ahora veremos cómo ajustar la red de acceso a los tipos de edificios más comunes, diferenciando entre bloques de pisos y viviendas unifamiliares.

En edificios de varias plantas, normalmente la fibra está extendida por las fachadas y se introduce en los edificios a través de un orificio en la propia pared. En el interior se deberá instalar un divisor en una caja de empalmes para llevar una fibra a cada uno de los hogares. Esto conviene que se haga dentro de un armario de telecomunicaciones, situado si existe en la sala denominada RITI (Recinto de instalación de telecomunicaciones interior).

Al ser la densidad de población elevada, un factor limitante de la red es el número máximo de usuarios, limitando la capacidad del nodo. En este caso se debe ubicar nuevos nodos de alimentación. El tramo final de la fibra se conectará al terminal óptico de cada usuario.

En el caso de redes de acceso para viviendas unifamiliares, el mayor problema suele ser que no están pegadas unas a otras, sino que son áreas que requieren de un tendido extenso de cable, por lo que, se tiene que situar los nodos en un punto central entre ellas. Así de cada casa se hará una conexión punto a punto al nodo, es decir, una fibra dedicada desde el nodo a la vivienda. La caja de empalme donde se distribuyen estas fibras se realizará usualmente en la arqueta comunitaria.

Otra diferencia, es que, en los bloques de varias alturas, se deja la instalación preparada para todos los hogares, mientras que, en las zonas residenciales de casas, por reducir costes y dar más viabilidad al proyecto, en ocasiones se lleva la fibra hasta la comunidad, y desde allí solo se conectarán a los hogares que vayan demandando el servicio de abonado.

En edificios como colegios, hospitales, polideportivos y otro tipo de instalaciones semejantes, para el diseño de la red, normalmente se deja una fibra sin conectar en el nodo cercano a ellas, preparada para si en un futuro desean ser abonados.

## 4.2 TENDIDO DE LA RED

### Tendido de cable

La parte fundamental de la instalación de una red reside en el tendido de cable, que supone el mayor esfuerzo económico y de trabajo. Consiste en llevar la fibra óptica desde el PoP donde se ubican los transmisores, hasta los hogares de la zona que se quiere ofrecer el servicio.

Para realizar este despliegue del cable, se deben tener en consideración unos aspectos generales tales como, no sobrepasar el límite de radio de curvatura recomendado por el fabricante de las fibras ópticas empleadas. El cable tiene que estar perfectamente sujeto con los elementos adecuados para que no se altere ninguna propiedad de la fibra.

A continuación, se exponen los métodos de tendido posibles para instalar una red de comunicaciones, comentando los pros y contras de estos, para los tendidos de fibra.

### Tendido en canalización

En ellos se tiende la fibra óptica por tuberías o conductos subterráneos, empleando la canalización existente si es posible, o en el caso contrario, creando una nueva. En la actualidad, gracias a las nuevas técnicas, se realizan microzanjas que resultan mucho más económicas que las zanjas convencionales. [11]



*Figura 60. Preparación de una microzanja en la calle*

Es decir, lo primero que debemos comprobar es si disponemos de canalización existente que tenga capacidad de incluir la nueva fibra óptica que vamos a añadir, ya que ahorraremos enormes costes de obra y tiempo de ejecución de esta. En cualquier caso, siempre se debe pedir permiso y pagar una cuota a la operadora propietaria de la canalización (Telefónica en España y Telecom en Italia).

Las principales ventajas de este método de tendido, cuya instalación está enterrada, son un menor impacto visual, y mayor protección ante agentes externos como pueden ser el viento, agua, heladas e incluso robos. Suponen un menor coste de mantenimiento de la instalación y de la fibra. Además, permite realizar un diseño de red prácticamente a medida. Otro punto de ahorro es que los cables de fibra óptica empleados no requieren de protección especial (protección contra la caza), como si ocurre en el tendido aéreo.

Por contra, en el caso de nuevas canalizaciones, los costes del proyecto y de la obra civil son más caros que en tendidos aéreos o en fachada, y requiere de mayor tiempo para ejecutar la obra. Se necesita solicitar permisos, y causan molestias de ruido, polvo y corte de calles.

### **Tendido en fachadas**

Consiste en colocar la fibra por las fachadas, fijándola con grapas. Este método se utiliza en zonas con alta concentración de edificios, teniendo en cuenta que entre un edificio y otro no puede haber más de 50 metros de distancia (longitud máxima entre dos puntos de sujeción del cable aéreo).



*Figura 61. Tendido del cableado en fachadas*

Tiene a su favor, ser el método más rápido, sencillo y económico. En contra tiene el negativo impacto visual y es necesario el permiso de los propietarios de todas las fachadas donde se vaya a colocar el cable. Los cables tienen que estar preparados para aguantar las condiciones climáticas a las que se enfrenta, y también ser más resistentes a posibles impactos violentos. Aunque no necesita la protección contra la caza.

Debido a lo antiestético que resulta este tendido, cuando se pretende conectar con urbanizaciones de nueva construcción, se tiende a utilizar el método de canalizado. En otras situaciones se utilizan elementos como molduras o canaletas para suavizar este impacto.

El tendido en fachada tiene que cumplir con una altura mínima de 2.5 metros sobre el suelo, y que sea paralelo o perpendicular a este, es decir, sin cambios de nivel.

### **Tendido aéreo**

Se trata de desplegar la fibra sujeta por postes de telecomunicaciones o postes eléctricos. Su uso es habitual en zonas rurales e industriales donde las edificaciones están separadas, por lo que, no se puede usar fachadas y no hay muchos obstáculos que dificulten el paso del cableado.



*Figura 62. Despliegue de la red en tendidos aéreos*

Son instalaciones muy rápidas y económicas, aunque requiere de cables especiales (autoportante ADSS) que tienen un precio mayor.

Es el tendido más vulnerable, ya que está expuesto a la intemperie en mayor grado que en fachada, y también por las zonas del recorrido (rurales), puede sufrir caídas de árboles, roturas, manipulaciones, disparos de caza, ataques de animales...

Otra posible amenaza en la actualidad y aún más de cara al futuro son los posibles impactos con drones.

Suponen un elevado impacto visual negativo, especialmente en zonas de naturaleza, y son necesarios permisos especiales y personal cualificado para realizar trabajos en altura.

### **Tendido en interiores**

Son los tendidos que se ubican en el interior de edificios, para dar acceso a cada hogar abonado a los servicios de la operadora telefónica.

Al tratarse de la instalación próxima al usuario, se debe tener especial cuidado con la seguridad, sabiendo que no se pueden tener cables sin conductos, y que todos los armarios y equipos metálicos deben estar conectados a tierra. También especial cuidado con las curvaturas, ya que se tiene que hacer frente a las esquinas.

Además, siempre se ha de tomar la prevención de dejar un excedente de fibra, para posibles ampliaciones futuras de la red.



*Figura 63. Instalación del cableado en interiores*

En la mayoría de las redes ópticas se van a emplear los diferentes tendidos, alternando unos con otros. Como ya hemos hablado, el tipo de cable (cubierta) que se emplea es diferente según el tendido, esto quiere decir que es necesario instalar un habitáculo donde se va a llevar a cabo el cambio de cable. Se puede hacer mediante una arqueta (pozzetto) como el de la figura inferior, o mediante un ‘tralicio’ aéreo. Siempre que sea posible, se utilizará este último, ya que es más económico.



*Figura 64. Arqueta para la red de cableado*

Por otro lado, cada vez que se cruza una carretera se tiene que hacer una arqueta a cada lado de ella, esto se hace con el objetivo de, en caso de problemas, evitar tener que hacer obras que interrumpan la calle. En la siguiente figura vemos como pasa un tendido de enterrado a fachada.



*Figura 65. Tendido de red donde desde la arqueta se lleva el tendido hasta la señal de prohibido el paso, y desde ahí se sube dentro de un tubo hasta tener una altura fuera de peligro y se lleva por fachada*

### 4.3 PERMISOS Y DERECHOS DE PROPIEDAD

En el despliegue de una nueva red FTTH como en cualquier otra red de telecomunicaciones, se requiere grandes infraestructuras, lo que se traduce en enormes inversiones.

Estas infraestructuras se realizan sobre propiedades que pueden ser públicas o privadas. En ambos casos se debe adquirir todos los permisos pertinentes y estos tienen que ser presentados ante la administración correspondiente, cumpliendo la ley vigente.

En las públicas, son las administraciones las encargadas de conceder estos permisos, mientras en las privadas, serán los propietarios o comunidades de propietarios los que tienen que aceptar.

Nombraremos los permisos más comunes a la hora de construir una red óptica. Estos se pedirán a las administraciones correspondientes al suelo donde se va a actuar:

- Para realización de obras en calles, carreteras, cruces de vías férreas, canales, etc.
- Para cortar la circulación en vías públicas, tanto de vehículos como de peatones.
- Cuando la actuación de las obras supongan un riesgo o molestias graves para el entorno.
- Para actuar en cualquier propiedad privada.
- Cuando se emplea agua o energía eléctrica de la red general.
- Para realizar tendidos en determinadas zonas, como militares, nucleares, aeropuertos...

Para comenzar el proyecto de instalación se deben tener todos estos acuerdos, aunque en ocasiones los permisos privados se van solicitando a medida que avanza el proyecto, pero nunca interviniendo en una propiedad con la que no se haya firmado un contrato de acuerdo. Estos permisos que se solicitan en el transcurso de la instalación de la red solo son a propiedades en las que, si no se llegase a un acuerdo el proyecto, aunque se retrasara, no supondría un problema muy grave y se tendría otras alternativas de paso de la red.

Lo habitual es que no haya problemas a la hora de llegar a un acuerdo con los propietarios, ya que tener acceso a la red de banda ancha es un plus para el edificio, que contribuye a que este tenga más valor, además de poder disponer del servicio que la red te proporciona.

Aunque en ocasiones, conseguir algunos permisos no es tarea fácil, hay algunas situaciones que pueden ser complicadas, como en el caso de edificios deshabitados, edificios de origen histórico, edificios en semi-ruina o propietarios que se niegan a que la red pase por su propiedad. En este último caso, la ley prevé la expropiación como fórmula para solucionarlo, siempre que sea la única opción que exista y no haya ninguna otra forma de continuar la red.

Los derechos de propiedad de la red los adquiere la empresa de telecomunicaciones que ejecuta el proyecto, lo que implica que tiene que hacerse cargo de todos sus costes de instalación y posteriormente de mantenimiento. Esto a la operadora no la supone un gran inconveniente, ya que además de los beneficios que obtiene dando el servicio con esa red, puede conseguir otros beneficios arrendando las instalaciones a otras teleoperadoras.

Como sabemos las instalaciones de una red son enormemente costosas, debido a lo cual pocas operadoras pueden permitirse realizar estas inversiones. Entonces cabe la posibilidad de que los derechos de propiedad de la red pertenezcan a varias empresas (copropietarios). O que operadoras usen las redes existentes de la operadora propietaria pagándola una renta por ello. Lo cual favorece a ambas partes, ya que es la única posibilidad que tienen las pequeñas operadoras para estar en el mercado, y por otro lado la operadora propietaria de la red puede amortizar la gran inversión y los costes de mantenimiento a más corto plazo.

La empresa que quiera utilizar infraestructura existente tiene que tramitar una solicitud de uso compartido, donde especifique entre otros, el recorrido que va a tener el cable, las arquetas por las que va a pasar, el número de cables y tamaño de estos.

Además de por el aspecto económico, también hay una normativa que regula que se debe emplear siempre que se pueda las redes existentes (instando a las dos partes a llegar a un acuerdo), y en el caso contrario crear el mínimo impacto ambiental posible y con el menor tiempo de intervención.

#### 4.4 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE F.O. EN EL EDIFICIO

Se ha hecho hincapié en que la red FTTH difiere de los otros tipos de FTTx en qué la fibra llega hasta el terminal del abonado. Por lo que, es necesaria además de la infraestructura de red comentada para aproximación al usuario, en el caso general de viviendas en edificios verticales, una infraestructura interna. Es fundamental, además, una canalización e infraestructura que garantice una incorporación de nuevos servicios.

Para garantizar la calidad de esta instalación es necesario un proyecto técnico de ICT (Infraestructura Común de Telecomunicaciones), que puede ser firmado por un Ingeniero de Telecomunicaciones.

Esta se inicia en una **arqueta en el exterior**, donde se establece la unión entre las redes de alimentación de las teleoperadoras y la ICT del edificio. Esta se dimensiona en función del número de usuarios del inmueble, al igual que la **canalización exterior** que introduce las redes al interior del edificio.

Concretamente hasta los **RITI** (Recintos de Instalaciones de Telecomunicaciones), situados en una zona comunitaria del bloque. Estos tienen que cumplir una serie de normas, para proteger las comunicaciones y reducir cualquier tipo de riesgo. Igualmente, se debe identificar con una placa con el número de registro del proyecto técnico, ya que puede ser inspeccionado por el organismo correspondiente.

A partir de este armario, se realiza una **canalización interior** que generalmente se compone de tubos corrugados o lisos de plástico empotrados en las paredes. Pasando cuando son necesarios por **puntos de distribución**, terminan en el **Punto de Acceso al Usuario (PAU)**, ubicados ya en la entrada de cada vivienda o local. Este es el punto donde termina la responsabilidad legal de la operadora, y pasa a ser del usuario.



Figura 66. Armario RITI



Figura 67. Roseta óptica

Para desarrollar un diseño de proyecto ICT, se ha empleado el software “Cast 60” de Televes. Programa muy completo con el que se puede elaborar el diseño de todas las comunicaciones regladas por las normas vigentes para los inmuebles. Especificando cada elemento de esta infraestructura (cables, elementos pasivos, elementos activos, etc.).

En este caso nos enfocamos en la elaboración del proyecto en la parte de la fibra óptica. Diseñamos de acuerdo con las normativas, tomando como ejemplo un inmueble con las siguientes características: Planta baja: 2 locales comerciales; Planta 1 y 2: 4 viviendas; Planta 3: 2 viviendas.

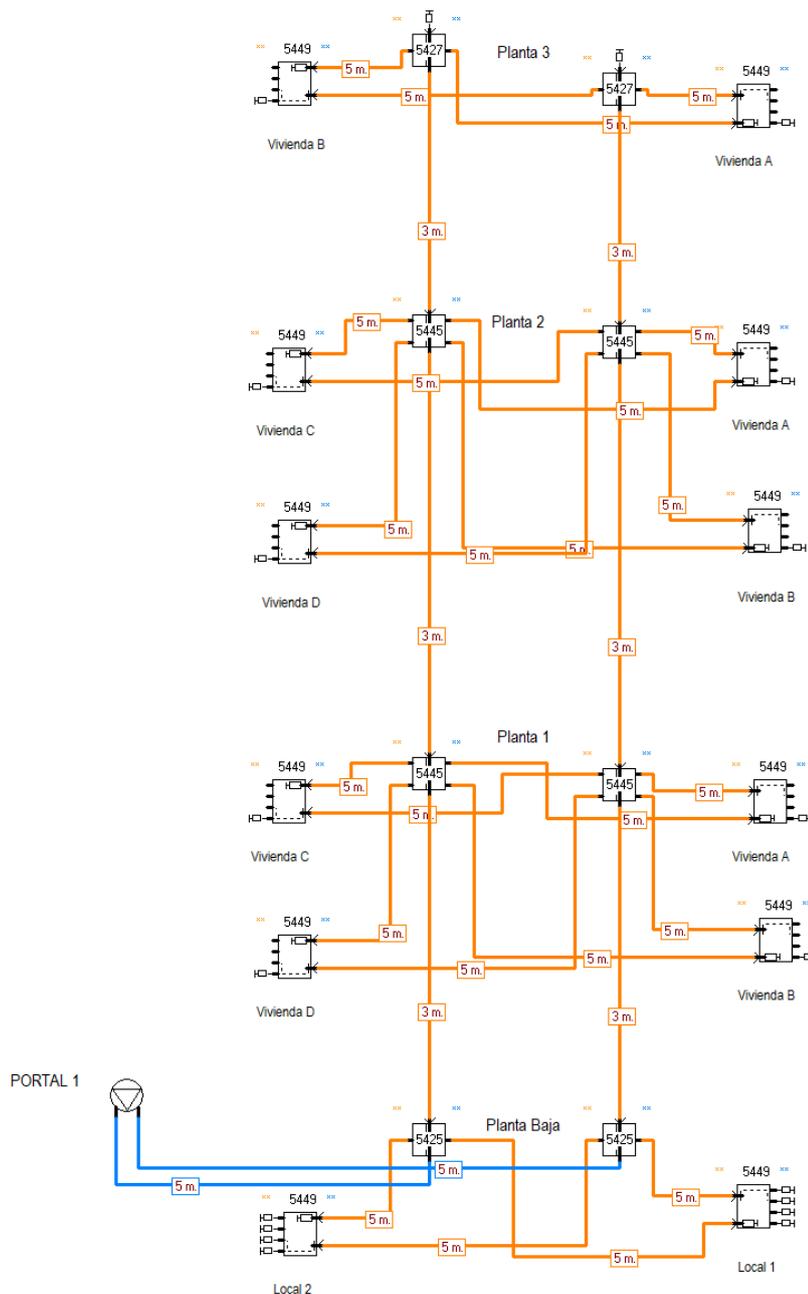


Figura 68. Esquema ICT de edificio ejemplo diseñado con CAT60.

## Dimensionamiento ICT:

Tabla 7. Acometidas y fibras necesarias en relación con el número de viviendas y locales.

	N.º de PAU	Número de acometidas
VIVIENDAS	10	10
LOCALES COMERCIALES	2	2
ACOMETIDAS PREVISTAS		12
Coefficiente de error		1,2
Acometidas necesarias		14,4
Número total de acometidas		17
Número total de FO.		34

Con el número de viviendas y locales comerciales, se dimensiona de tal forma que se reserva un PAU extra por cada planta del edificio y uno de reserva en RITI (para posibles averías o roturas) Estas acometidas de reserva se dejan terminadas en el registro secundario de cada planta, con margen suficiente para llegar al PAU más alejado de esta planta.

Por cada acometida pasarán dos fibras. Por lo que, el número de cables de dos fibras necesarios es de 17, y las fibras totales 34.

En el RITI se necesitará un panel de 64 conectores para garantizar la capacidad de albergar todas las fibras actuales, y con margen amplio para posibles nuevas fibras.

El número de PAUs es de 12. Cada uno compuesto por una roseta óptica con conectores ópticos SC/APC.

Cada fibra óptica finaliza en sus extremos con conector SC/APC.

## Dimensionamiento y cálculo de atenuación de las fibras:

Partiendo de los valores de atenuación por longitud de cable de la siguiente tabla:

Tabla 8. Pérdidas de la fibra óptica en relación con la frecuencia de operación.

Pérdidas:			
Pérdidas Fibra a 1320 nm	0.35 dB/km	0,00035	dB/m
Pérdidas Fibra a 1490 nm	0.25 dB/km	0,00025	dB/m
Pérdidas Fibra a 1550 nm	0.1 dB/km	0,0001	dB/m
Pérdidas Conectores SC/APC (RITI y PAU)		0,5	dB

Obtenemos las longitudes con el diseño realizado y calculamos las atenuaciones para cada usuario:

*Tabla 9. Pérdidas de la fibra óptica en relación con la frecuencia de operación y longitud a cada usuario del edificio.*

	<b>RITI-PAU</b>	<b>1310 nm</b>	<b>1490 nm</b>	<b>1550 nm</b>
<b>Piso</b>	<b>Long cable (m)</b>	<b>Pérdidas (dB)</b>	<b>Pérdidas (dB)</b>	<b>Pérdidas (dB)</b>
<i>Tercero A</i>	<b>19</b>	<b>0,507</b>	<b>0,505</b>	<b>0,502</b>
<i>Tercero B</i>	<b>19</b>	<b>0,507</b>	<b>0,505</b>	<b>0,502</b>
<i>Segundo A</i>	<b>16</b>	<b>0,506</b>	<b>0,504</b>	<b>0,502</b>
<i>Segundo B</i>	<b>16</b>	<b>0,506</b>	<b>0,504</b>	<b>0,502</b>
<i>Segundo C</i>	<b>16</b>	<b>0,506</b>	<b>0,504</b>	<b>0,502</b>
<i>Segundo D</i>	<b>16</b>	<b>0,506</b>	<b>0,504</b>	<b>0,502</b>
<i>Primero A</i>	<b>13</b>	<b>0,505</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>
<i>Primero B</i>	<b>13</b>	<b>0,505</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>
<i>Primero C</i>	<b>13</b>	<b>0,505</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>
<i>Primero D</i>	<b>13</b>	<b>0,505</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>
<i>Local 1</i>	<b>10</b>	<b>0,504</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>
<i>Local 2</i>	<b>10</b>	<b>0,504</b>	<b>0,503</b>	<b>0,501</b>

En total se tirarán 174 metros de cable de fibra hasta las 12 PAUs y 58 metros hasta los registros secundarios de cada planta (fibras de reserva). Recordemos que cada cable lleva dos fibras.

## 4.5 BALANCE DE POTENCIA

El balance óptico de potencias tiene como finalidad conocer la máxima atenuación del enlace entre el equipo de la central (OLT), y el equipo del usuario final (ONT). Este valor nos servirá para saber la máxima capacidad de transmisión o máxima distancia del enlace, y así comprobar si es posible ofrecer las prestaciones que se quieren dar.

Para este cálculo se tienen en cuenta la intervención de todos los dispositivos y elementos de los que consta la red, no solo el canal de transmisión. Entonces el balance se realiza cogiendo un enlace desde el OLT hasta el ONT más lejano para comprobar que funciona en el peor de los casos. En cuanto a la atenuación de la fibra también consideraremos la más restrictiva.

La fórmula que define el balance de potencias de una red se expresa de la siguiente manera:

$$P_{TX} - [L \alpha_{FO} + n_c \alpha_c + n_e \alpha_e + M_s - G] \geq S_{RX}$$

- $P_{TX}$  es la potencia de pico de transmisión que se inyecta en la fibra, en dB.
- $L$  es la longitud del enlace de fibra expresada en km.
- $\alpha_{FO}$  es la atenuación característica de la fibra en función de la longitud dB/km.
- $n_c$  es el número de conectores;  $n_e$  es el número de empalmes.
- $\alpha_c$  es la atenuación de cada conector;  $\alpha_e$  es la atenuación de cada empalme.
- $M_s$  es un margen de seguridad que considera pérdidas de otros dispositivos, por cambios de temperatura, envejecimientos...
- $G$  es la suma de las ganancias de los amplificadores.
- $S_{RX}$  es la sensibilidad (potencia mínima que detecta el fotodiodo) en dB.

El enlace será óptimo si se cumple la ecuación anterior, es decir, se transmite a una potencia que teniendo en cuenta las ganancias de los amplificadores y todas las pérdidas que sufre la señal durante el trayecto completo, llega al receptor con una amplitud suficiente para ser detectada.

En la actualidad, resulta más importante calcular el parámetro de la longitud máxima de la fibra, ya que es el factor que más limita las redes ópticas. Nos referimos con longitud máxima, al máximo valor de la distancia entre OLT y ONT, en el que funciona nuestro sistema FTTH.

Despejando la ecuación del balance obtenemos:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{(P_{TX} - S_{RX}) - (n_c \alpha_c + n_e \alpha_e + M_s - G)}{\alpha_{FO}}$$

- $L_{m\acute{a}x}$  es la máxima longitud entre el nodo y el usuario

La ecuación del balance expuesto es un balance de ámbito general, cuando se calcula se deben tener en cuenta todas las pérdidas de los elementos que intervienen en el enlace.

En el caso de que se emplearía una red con una configuración P2MP, a la atenuación total habría que sumar la atenuación por división de los splitters. Esta atenuación está comentada ya en el apartado referente a los elementos que componen una red óptica.

Para ver un ejemplo de balance, tomaremos como modelo una pequeña red P2P con valores típicos. Suponemos que el enlace de red no tiene amplificadores y está compuesto por 4 conectores con atenuaciones de 0.2 dB y 4 empalmes con 0.45 dB de pérdidas. La fibra empleada tiene una atenuación intrínseca de 0.22 dB/km en el caso más restrictivo. El margen de potencias ( $P_{TX} - S_{RX}$ ) es de 9 dB. Y tomando un margen de seguridad de 2.5 dB:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{9 - (4 * 0.2 + 4 * 0.45 + 2.5)}{0.22} = 17.77 \text{ km}$$

Obtendríamos una longitud máxima de unos 17.7 km, por lo que ningún usuario debería estar a una distancia mayor al PoP, que la calculada.

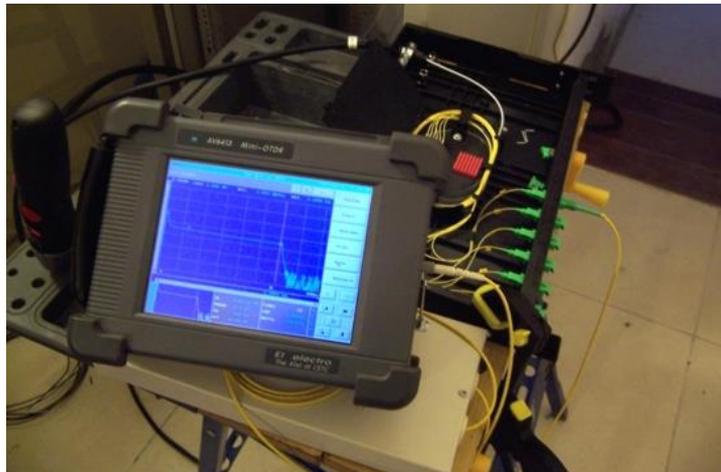
## 4.6 MEDICIONES Y MANTENIMIENTO DE LA FIBRA

### Mediciones

Antes de finalizar cualquier proyecto hay que comprobar que funciona sin ninguna anomalía, ya que la normativa obliga a entregar un informe con los resultados obtenidos en forma de reflectogramas.

El instrumento que se emplea habitualmente para realizar comprobaciones sobre la fibra es el OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), que es un dispositivo optoelectrónico computarizado que funciona a través del método de reflectometría. Son equipos bastante complejos y caros, pero imprescindibles para el control y verificación de la red óptica.

La característica más relevante de estos dispositivos es la sensibilidad del módulo de medición (rango dinámico). Cuanto más amplio sea el rango dinámico, podrá detectar señales más débiles, lo que se traduce en poder medir longitudes de fibra más largas, ya que en ellas la señal va a sufrir más atenuación y llega al OTDR con una amplitud más baja. Este factor determina en gran medida el precio del equipo, existiendo medidores más simples y económicos para usarlos en fibras cortas, y medidores muy complejos para redes de larga distancia. [12]



*Figura 69. OTDR para medir las fibras ópticas de una caja de distribución*

Los OTDR funcionan enviando una señal luminosa desde un extremo de la fibra, y analizando la señal de retorno que recibe el equipo después de propagarse por ella sufriendo atenuaciones y dispersiones.

Generalmente se emplea una bobina de lanzamiento de fibra que se conecta por un extremo al OTDR, y en el otro extremo con un conector, al tramo de fibra que se quiere analizar. Es una gran ventaja que con este equipo solo necesitamos conectar en el inicio o en un punto de la fibra, sin necesidad de tener otro medidor en el extremo final. Estos dispositivos tienen una pantalla donde te muestran los resultados mediante un gráfico que analizaremos más adelante.

La señal de retorno, que también se conoce como eco, nos proporciona diferente información sobre el estado de la red, como la longitud total de la línea, atenuación global de esta, las pérdidas en conectores y empalmes. Además de la atenuación total nos sirve para ver atenuaciones puntuales y conocer en el punto aproximado de la fibra donde se encuentra esa atenuación elevada. Nos permite comprobar la calidad de fusiones o empalmes mecánicos, así como detectar fallas (curvaturas excesivas, roturas de la fibra, etc.).

Para poder dar un informe positivo sobre la instalación a medir, los resultados de las comprobaciones que se realizan deben de estar dentro de los valores esperados que mostramos a continuación. La atenuación por kilómetro de fibra debe corresponder con aquella que nos indica el fabricante de la misma, con valores típicos de 0.38 dB/km cuando trabaja en segunda ventana (1310 nm) y de 0.25 dB/km en la tercera ventana (1550 nm). En el caso de los conectores la atenuación obtenida mediante el OTDR no debería superar los 0.5 dB por cada par instalado, y 0.15 dB en cada fusión.

### **Medición de la atenuación total de la línea**

La pérdida total de cada sección de fibra óptica (A) deberá cumplir con la siguiente ecuación:

$$A < \alpha * L + n_c * \alpha_c + n_e * \alpha_e$$

Donde:

- *A: Atenuación total del tramo de fibra en dB.*
- *$\alpha$ : Atenuación teórica asociada a la fibra por unidad de longitud (dB/km).*
- *L: Longitud del tramo de fibra en km.*
- *$n_c$ : Número de conectores existentes en el tramo.*
- *$\alpha_c$ : Pérdidas teóricas de cada conector en dB.*

- $n_e$ : Número de empalmes.
- $\alpha_e$ : Pérdidas teóricas por cada empalme en dB.

Un reflectograma es una representación gráfica de las pérdidas de potencia (potencia reflejada) en función de la distancia al OTDR. También puede ser con relación al tiempo, ya que la distancia y el tiempo están directamente relacionados.

En la siguiente figura, podemos observar una representación didáctica de la traza de OTDR correspondiente a una conexión como la del esquema. En ella vemos de forma sencilla las diferentes respuestas que nos muestran los elementos de la red en el OTDR.

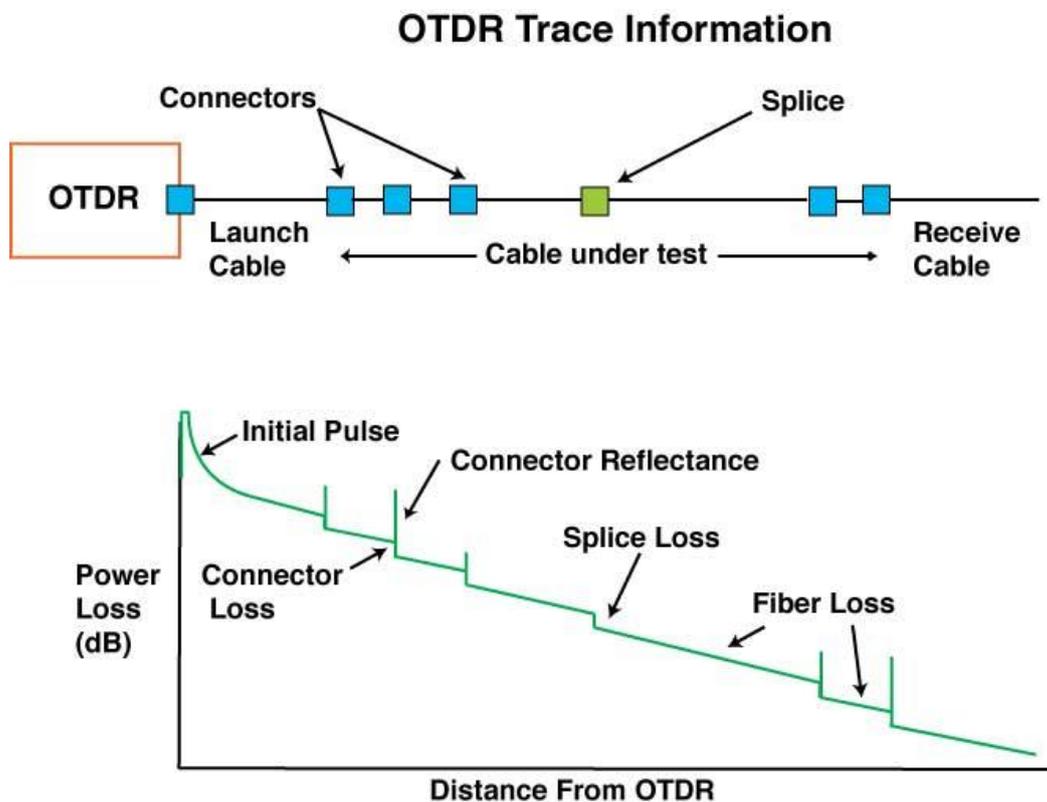


Figura 70. Gráfico representativo de una medición con OTDR para una red con los elementos que aparecen en el esquema superior

Apreciamos la tendencia decreciente del nivel de potencia debido a la atenuación que se produce a lo largo de toda la fibra de manera constante. En los puntos donde se encuentran los conectores ópticos vemos que aparecen picos debido a las reflexiones que se producen

en ellos, y un descenso brusco del nivel de potencia que corresponde a la atenuación de estos. En el medio tenemos una atenuación que corresponde al empalme por fusión.

Además, otros eventos que vemos en cualquier traza de OTDR, son las fuertes reflexiones al principio, que corresponden con las pérdidas de inserción de la fibra, y también al final del tramo (reflexiones de Fresnel).

En el caso de encontrar una atenuación o reflexión fuerte en un punto donde no se espera, por no haber ningún elemento de la red que pueda producirlo, se habría encontrado una falla.

Si hay una rotura de la fibra, se observaría una atenuación total y ruido a partir de este punto, de la misma forma que cuando llega al máximo valor de distancia que puede medir, o al punto final de la fibra. En la figura inferior vemos un ejemplo real de traza en un OTDR

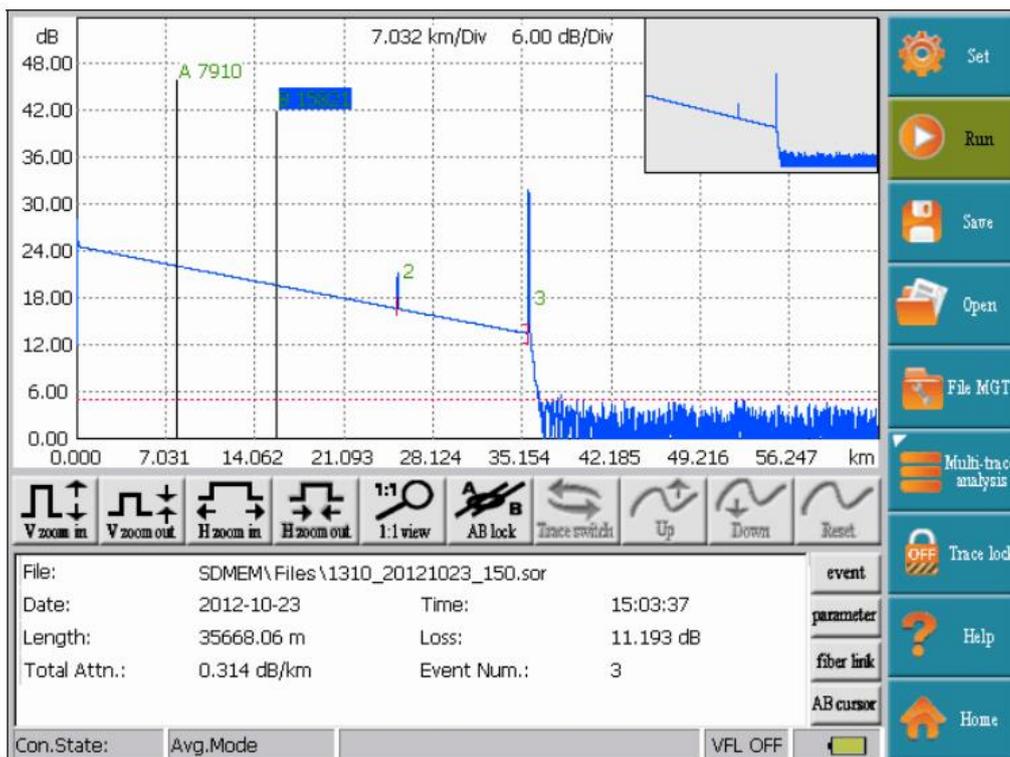


Figura 71. Imagen de una pantalla real de un OTDR moderno. En el kilómetro 35 de la fibra se detecta el final de esta.

## **Mantenimiento de la fibra**

Una vez finalizada la instalación de la red, es primordial realizar controles periódicamente para comprobar el estado real de la misma. El tiempo de buen funcionamiento de una fibra convencional es de unos 25 años, pero pueden existir fallas y problemas derivados de una mala instalación o de factores externos.

Estos controles de la red se realizarán mediante inspección visual, y con equipos de medición. El más empleado es el OTDR detallado en las páginas anteriores. Si se encuentran fallos se deberían corregir con la mayor celeridad posible y posteriormente comprobar que funciona adecuadamente. Estas inspecciones y cualquier modificación derivadas de ellas se acompañan de un informe.

Cuando el problema no viene de la fibra, sino que es de alguno de los dispositivos, igualmente es un técnico el que revisa el equipo con el objetivo de arreglarlo o en su defecto sustituirlo por otro.

Generalmente las operadoras subcontratan el mantenimiento de la red a empresas especializadas.

## 4.7 SERVICIOS DE ABONADO

### Servicios ofrecidos por FTTH

En primer lugar, las redes FTTH ofrecen los servicios al abonado con un único soporte físico, se distingue de otras redes de telecomunicaciones anteriores, donde cada servicio se propagaba por canales diferentes o con diversos protocolos de transmisión.

Entonces, FTTH ofrece servicios de voz, datos y vídeo de forma integrada, lo que se conoce como Triple Play. Es la comercialización de los servicios telefónicos de voz, el acceso a banda ancha de internet, y los servicios audiovisuales de televisión (TV de pago). La mayoría de las operadoras oferta la Triple Play como un paquete integrado a sus usuarios, resultando más económico que contratar los servicios por separado.

Con el constante desarrollo y avances de la telecomunicación se empieza a hablar del término “multiplay” dejando abierta la opción de integrar más servicios a parte de los tres mencionados.

Para dar el servicio de voz se emplea la tecnología VoIP (Voice Over Internet Protocol), que consiste en digitalizar la señal de voz en paquetes de datos IP, y se envían a través de la red de fibra a la central. Este sistema aporta una alta fiabilidad y resulta más económico.

En cuanto a los datos, con FTTH se pueden ofertar flujos de datos de muy alta velocidad debido al gran ancho de banda. Lo cual permite a los abonados navegar por Internet de forma rápida, descarga de mayores volúmenes de información en menos tiempo, mensajería instantánea a través de vídeo como por ejemplo usando Skype, o servicios en línea como puede ser gaming o streaming.

Otras aplicaciones específicas que también se cubren con redes FTTH, son la videovigilancia de viviendas u otras instalaciones, y el control remoto de las instalaciones domóticas.

Por último, con estas redes el abonado tiene acceso a los siguientes servicios de vídeo:

- HDTV (High Definition Television): Emplea la tecnología IPTV (datagramas IP), para ofrecer vídeo de alta definición.
- VoD (Vídeo on Demand): se conoce como vídeo a la carta, y permite al usuario ver algunos contenidos fuera del horario de programación, además de poder detener o retroceder a tu antojo.
- PPV (Pay Per View): pago por visión, el usuario paga por poder ver ciertos contenidos, como películas de estreno, eventos deportivos...
- VCR (Video Cassette Recorder): permite grabar el audio y vídeo de la televisión. Tiene su propio sintonizador para recibir la señal directa de televisión, y un temporizador programable.

El paquete integrado más común que ofrecen las teleoperadoras consta de datos en torno a 1 Gbps de bajada, y 100 Mbps de subida, ya que generalmente a nivel usuario de hogar se emplea en mucho menor medida el canal de subida. Aunque también se ofrecen tarifas de datos más reducidas, y algunas de ellas simétricas. Además, se suele acompañar el paquete con servicio de voz por telefonía fija, con llamadas prácticamente ilimitadas, y televisión con los servicios de vídeo detallados recientemente.

El precio varía en función de lo contratado, pero para un paquete semejante al descrito, sería aproximadamente entre 30 y 40 euros el primer año (para nuevos clientes) y de 70 a 90 euros después. Suele resultar económico incluir servicios de telefonía móvil con la misma compañía con la que se tiene contratado los servicios de casa.

## 4.8 ESTUDIO DE MERCADO Y EVALUACIÓN FINANCIERA

Un estudio de mercado consiste en realizar una investigación para tener una idea lo más aproximada posible de la viabilidad de un proyecto. Este apartado es imprescindible antes de comenzar un proyecto, y ayudará a reducir los riesgos económicos.

Se deberá realizar un análisis de la población y la zona geográfica a la que se quiere ofrecer la red óptica, y esto nos aportará la información necesaria para escoger el tipo de red apropiada.

En cuanto a la población, a parte de la densidad de población, es muy importante determinar el nivel socioeconómico de esta, para tener conocimiento del número de clientes potenciales. Para ello debemos de saber los porcentajes de cada rango de edad, el porcentaje de población que trabaja, cantidad de estudiantes, la actividad económica mayoritaria en la zona...

Hacemos hincapié, en que el rango más interesante es el de la población que posee trabajo y el de los estudiantes de bachillerato y universidad. Las estadísticas muestran que son los principales consumidores de estos servicios.

También es relevante el número de negocios y empresas que están ubicadas en la zona, ya que son grandes demandantes de banda ancha y telefonía.

Después, analizaremos la posible competencia, es decir, que sistemas o redes que ofrecen servicios similares hay implantados en esta zona. Si no existen otras redes basadas en FTTH, debido a las necesidades de capacidad de banda ancha actuales y sobre todo de cara al futuro, no será difícil la captación de clientes. Otro aspecto a nuestro favor será, el creciente interés por la televisión de cable, principalmente para usuarios domésticos.

Con todo esto, tendremos una idea del índice de penetración, que es el porcentaje de posibles usuarios que realmente se abonan.

Otra parte del estudio comprenderá lo relacionado con la geografía de la zona y tipo de edificaciones, que ya hemos desarrollado en el apartado de “Área de actuación”, y que nos aporta datos fundamentales sobre los costes aproximados de la red. Teniendo en cuenta que en áreas montañosas o de difícil acceso nos supondrá una inversión muy elevada, y se tendrá que asegurar muy bien si compensa económicamente.

Con este estudio calculamos los posibles ingresos que obtendremos, y debemos compararlos a los gastos de la inversión inicial y posteriores gastos en mantenimiento de la red.

Con la red diseñada, se calcularán los costes totales del proyecto y los tiempos en los que se espera llevarlo a cabo, siempre considerando un margen superior, ya que lo normal es que aparezcan problemas inesperados que retrasen el proyecto y supongan un coste mayor.

Se hará un presupuesto contabilizando todos los componentes y elementos de la red empleados, así como los costes de llevar a cabo la instalación. Teniendo en cuenta la obra civil, la mano de obra de los trabajadores, técnicos e ingenieros, la burocracia...

Con esto obtendremos una aproximación del coste inicial, necesitaremos también saber cuánto va a suponer económicamente el mantenimiento de la red, donde se incluye a parte del mantenimiento en sí, del que ya hemos hablado anteriormente, los gastos energéticos de la red.

Con toda esta información obtenida se comprobará la viabilidad del proyecto, considerando un índice de penetración pesimista, moderado y optimista, y un paquete de servicios adecuado al estudio socioeconómico realizado, se calculará un rango de beneficios aproximados.

Por último, se compararán los gastos de inversión y los beneficios anuales (ingresos-gastos) para calcular en qué periodo de ejercicio se amortiza la inversión, es decir, cuantos años son necesarios para recuperar la inversión y comenzar a recibir beneficios económicos de la red. Aunque es preferible ponerse en un caso entre moderado y pesimista, hay que tener en cuenta que, en la previsión de futuro, se espera que el nivel de usuarios que se abonen a la red tenga una tendencia creciente.



## Estándares de fibra óptica

Con la evolución y globalización de las tecnologías de la telecomunicación en los últimos años, se han ido creando organismos para estandarizar y normalizar algunos aspectos de las telecomunicaciones. EIA, ISO o IEEE, son algunos de estos organismos, pero el principal es la ITU.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) es un organismo encargado de regular, normalizar y desarrollar las telecomunicaciones a nivel internacional. La normativa la recoge en una serie de documentos llamados “Recomendaciones” que, aunque no son de carácter obligatorio, las operadoras de telecomunicaciones y administraciones las toman como si lo fueran.

En la figura inferior, mostramos como se organizan las recomendaciones de la ITU en diferentes series:

ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS	
TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS	
INTERNATIONAL TELEPHONE CONNECTIONS AND CIRCUITS	G.100–G.199
GENERAL CHARACTERISTICS COMMON TO ALL ANALOGUE CARRIER-TRANSMISSION SYSTEMS	G.200–G.299
INDIVIDUAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON METALLIC LINES	G.300–G.399
GENERAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON RADIO-RELAY OR SATELLITE LINKS AND INTERCONNECTION WITH METALLIC LINES	G.400–G.449
COORDINATION OF RADIOTELEPHONY AND LINE TELEPHONY	G.450–G.499
TRANSMISSION MEDIA AND OPTICAL SYSTEMS CHARACTERISTICS	G.600–G.699
General	G.600–G.609
Symmetric cable pairs	G.610–G.619
Land coaxial cable pairs	G.620–G.629
Submarine cables	G.630–G.639
Free space optical systems	G.640–G.649
Optical fibre cables	G.650–G.659
Characteristics of optical components and subsystems	G.660–G.679
Characteristics of optical systems	G.680–G.699
DIGITAL TERMINAL EQUIPMENTS	G.700–G.799
DIGITAL NETWORKS	G.800–G.899
DIGITAL SECTIONS AND DIGITAL LINE SYSTEM	G.900–G.999
MULTIMEDIA QUALITY OF SERVICE AND PERFORMANCE – GENERIC AND USER-RELATED ASPECTS	G.1000–G.1999
TRANSMISSION MEDIA CHARACTERISTICS	G.6000–G.6999
DATA OVER TRANSPORT – GENERIC ASPECTS	G.7000–G.7999
PACKET OVER TRANSPORT ASPECTS	G.8000–G.8999
ACCESS NETWORKS	G.9000–G.9999



## AGRADECIMIENTOS

Vorrei ringraziare a Giovanni Tartarini e Rossano Capannini per darmi la possibilità di fare questo lavoro. Anche a Laboratori Guglielmo Marconi dove sono stato accolto come uno di loro e ho imparato molto.

Agradezco enormemente a mi familia y amigos con los que he compartido estos preciosos años y que me han apoyado y ayudado siempre que lo he necesitado.

¡Muchas gracias! Grazie mille!

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] [www.fibraopticahoy.com/blog/radio-de-curvatura/](http://www.fibraopticahoy.com/blog/radio-de-curvatura/)
- [2] <http://lafibraopticaperu.com/la-dispersion-optica/>
- [3] [http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1\\_6\\_1.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_6_1.htm)
- [4] <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/dwdm.php>
- [5] [http://www.tierra-ayni.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=50&Itemid=0](http://www.tierra-ayni.com/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=0)
- [6] Apuntes de la asignatura Comunicaciones Ópticas del grado de Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria.
- [7] <http://www.mercadoit.com/blog/analisis-opinion-it/transceivers-de-fibra-optica-monomodo-vs-multimodo/>
- [8] [www.fibraopticahoy.com/tipos-conectores-fibra-optica/](http://www.fibraopticahoy.com/tipos-conectores-fibra-optica/)
- [9] [http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_8\\_2.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm)
- [10] <https://www.tradeisay.com/articulos/que-es-un-splitter-de-fibra-optica.html>
- [11] <https://microzanjas.com/tendidos-de-fibra-optica/10744/>
- [12] <https://toolboom.com/es/articles-and-video/optical-testers-and-otdrs/>
- [13] [http://www1.frm.utn.edu.ar/medidase2/varios/parametros\\_redes1.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/medidase2/varios/parametros_redes1.pdf)
- <https://openfiber.it>
  - FTTH Council Europe by IDATE
  - Estándares ITU

