

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sist. de Telecomunicación)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Desarrollo de una aplicación gráfica
para el diseño de infraestructuras
FTTH”**

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

Yaroslav Marchukov

Director/es:

D. Borja Vidal Rodriguez

GANDIA, 2011

Índice

Capítulo I – Introducción a las tecnologías FTTH.....	1
1. Descripción de redes FTTH.....	1
2. Evolución histórica.....	3
3. Arquitectura general.....	4
3.1. Red de acceso.....	4
3.2. Sistemas activos y sistemas pasivos.....	5
3.3. Sistemas unidireccionales frente a sistemas bidireccionales.....	6
3.4. Topologías de la red.....	7
3.4.1. Configuración punto a punto.....	7
3.4.2. Configuración punto a multipunto.....	8
3.4.2.1. Arquitectura en estrella o en árbol.....	8
3.4.2.2. Arquitectura en bus.....	9
3.4.2.3. Arquitectura en anillo.....	10
Capítulo II – Redes PON.....	11
1. Características y funciones de los elementos.....	11
1.1. OLT (Optical Line Terminal).....	11
1.2. ONT (Optical Network Terminal).....	13
1.3. Splitter o divisor óptico.....	15
1.4. Fibra óptica.....	16
1.4.1. Composición y geometría de la fibra óptica.....	16
1.4.2. Clasificación de la fibra óptica.....	17
1.4.3. Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica.....	19
2. Funcionamiento general	21
2.1. Canal descendente.....	22
2.2. Canal ascendente.....	23
3. Estándares de las redes PON.....	24
3.1. Arquitectura APON.....	25
3.2. Arquitectura BPON (Broadband PON).....	26
3.3. Arquitectura EPON (Ethernet PON).....	27
3.4. Arquitectura GPON (Gigabit PON).....	29
3.5. Comparación de las redes xPON.....	31
4. Ventajas e inconvenientes de las redes PON.....	32
4.1. Principales ventajas de las redes PON.....	33
4.2. Principales inconvenientes de las redes PON.....	34
Capítulo III – Cálculos y diseño de la red.....	37
1. Diseño de la red.....	37
1.1. Parámetros típicos.....	38
1.1.2. ONT y OLT.....	38
1.1.3. Otros elementos.....	39
1.2. Cálculos.....	40
1.2.1. Balance de potencias.....	40
1.2.2. Balance de tiempos.....	42
1.2.3. Criterios de viabilidad.....	43

Capítulo IV - Diseño e implementación del programa.....	45
1. Descripción de la aplicación.....	45
2. Funcionamiento de la aplicación.....	46
2.1. Distribución de las viviendas.....	47
2.2. Parámetros de la urbanización.....	47
2.3. Parámetros del edificio.....	49
2.4. Configuración de los divisores.....	50
2.5. Configuración de los elementos.....	52
2.6. Cálculos.....	54
Capítulo V - Conclusiones.....	57
Anexo.....	61
Bibliografía.....	95

Capítulo I - Introducción a las tecnologías FTTH

En el siguiente capítulo se va a hablar de las redes FTTx haciendo más hincapié sobre todo en las redes FTTH, su estado actual, las distintas tecnologías utilizadas y sus aplicaciones.

1. Descripción de redes FTTx

El desarrollo de la fibra óptica monomodo con su enorme capacidad de transmisión, ha abierto la puerta al despliegue de redes ópticas punto a punto. El uso de la fibra como sustituto del cable de cobre ha permitido aumentar de forma significativa la calidad del servicio (QoS) sin sufrir aumentos relevantes del precio de este, permitiendo de esta manera que cada vez haya más usuarios que adquieran este tipo de servicio [1].

Pero, a pesar de sus ventajas, la fibra óptica sigue sin ser demasiado utilizada en los tramos finales, es decir, en tramos desde el nodo central hasta el bucle de abonado. Es por ello, que esta parte de la red normalmente es de cobre, y los usuarios sufren las limitaciones de las líneas de suscripción digital (xDSL) y las líneas fibra-coaxial (HFC). La otra opción podría ser el uso de enlaces de redes inalámbricos, asumiendo las interferencias y la alta atenuación presentes en este tipo de medios de transmisión. Por eso la explotación de las tecnologías actuales tiene los siguientes inconvenientes [15]:

- Tienen una capacidad de transmisión limitada, a la vez que hay un crecimiento explosivo de la demanda de ancho de banda y otros servicios de altas velocidades.
- Utilizan aparatos y herramientas que requieren un mantenimiento continuo.
- No permiten al proveedor ofrecer voz, video y datos al mismo tiempo a los abonados de una manera económica.

A pesar de que la fibra queda libre de las mencionadas limitaciones, tiene un obstáculo que interfiere en el despliegue de los servicios ópticos al sector residencial y al pequeño comercio- que es el elevado coste de la conexión de cada abonado al nodo central. Tal cantidad de interconexiones de tipo punto a

Capítulo I – Introducción a las tecnologías FTTH

punto requiere mayor cantidad de componentes activos, cable de fibra óptica y al mismo tiempo aumentaría el coste del propio despliegue.

La arquitectura FTTx (Fiber-to-the-x) ofrece una solución interesante para este tipo de problemas. Con FTTx, las redes ópticas pasivas (PON) de banda ancha, permiten utilizar un enlace a varios usuarios al mismo tiempo, sin la necesidad de utilizar elementos activos, es decir, componentes electroópticos que aumentan (regeneran) la señal.

Se pueden distinguir distintos tipos de redes de la familia de FTTx dependiendo de la distancia entre el tramo de fibra y el usuario final, tal y como se indica en la Figura 1. Entre las más destacables [14]:

- FTTN (Fiber-to-the-node): el tramo de fibra termina en una cabina situada en la calle de entre 1,5 a 3 km del usuario.
- FTTC (Fiber-to-the-curb): hasta la acera. En este caso la cabina se encuentra más próxima al usuario, a una distancia entre 300 y 600 metros.
- FTTB (Fiber-to-the-building o Fiber-to-the-basement): el proveedor de servicio llega hasta el cuarto de distribución del edificio. A partir de este punto se llega hasta el usuario normalmente utilizando par de cobre.
- FTTH (Fiber-to-the-home): la fibra llega al interior o a la fachada de la vivienda.

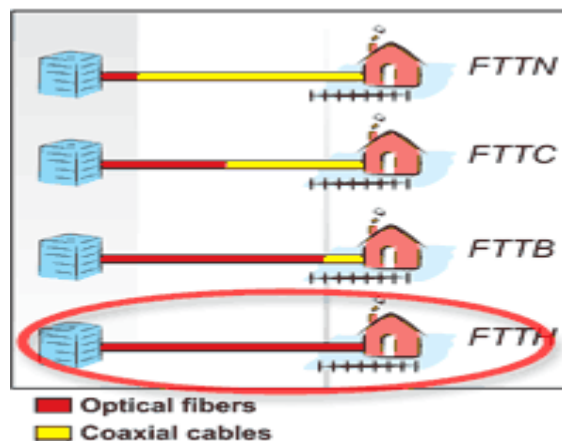


Figura 1: Tipos de redes FTTx

Existen otros tipos de configuraciones algo menos utilizadas, pues no están estandarizadas.

- FTTCab (Fiber-to-the-cabinet): fibra hasta el armario.

- FTTP (Fiber-to-the-premises): se suele utilizar de dos formas distintas: como término genérico para designar las arquitecturas FTTH y FTTB, o cuando la red de fibra incluye tanto viviendas como pequeños negocios.
- FTTO (Fiber-to-the-office): fibra hasta la oficina.
- FTTU (Fiber-to-the-user): hasta el usuario.

2. Evolución histórica

En el año 1995 las compañías British Telecom, Bell South, Bell Canada, NTT y otras cinco compañías internacionales de telecomunicaciones se reunieron para formar el consorcio FSAN (Full-Service Access Network), creado para facilitar el desarrollo de estándares para la equipación de redes de acceso. En 1996 en Estados Unidos fue firmado un convenio para “el apoyo y la reducción de regulación, protección de precios bajos, mejora de la calidad de servicio de los proveedores de servicios de telecomunicaciones americanos y facilitación de la expansión de nuevas tecnologías.

En el año 1998 las especificaciones FSAN para ATM-PON se convirtieron en un estándar mundialmente reconocido y fueron añadidas a ITU como las recomendaciones G.983.1.

En el año 2001 se formó el consejo de FTTH, con el objetivo de apoyar el desarrollo de FTTH en Norte América y actuar como consultor de las leyes de EE.UU. Como resultado esto ha dado lugar a la aparición de la Ley de 2001 sobre el acceso a Internet y servicios de banda ancha, que proporcionaba incentivos fiscales para las empresas que quisieran invertir en tecnología de banda ancha de nueva generación.

En 2003 la Comisión Federal de Comunicaciones de los EE.UU. (FCC) liberó el mercado, permitiendo, de esta manera, la implementación de las nuevas redes a todos los operadores.

Como resultado de todos estos hechos, el interés sobre las redes FTTx aumentó de manera exponencial:

- Las pequeñas empresas y los abonados exigen mayor ancho de banda y mayor cantidad de servicios.
- FTTx tiene mayor capacidad debido al uso de fibra óptica y ofrece mayor gama de servicios (Triple Play: datos, telefonía y video) a un precio razonable, ya que un número alto de usuarios finales utilizan el ancho de

banda de una fibra, y porque la mayoría de componentes utilizados son pasivos.

- Los nuevos estándares, que fueron establecidos por la ITU y por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) mejoraron de forma razonable la unificación, flexibilidad, duración y seguridad de PON, y crearon la posibilidad de una gran reducción de su precio, lo cual había sido imposible hasta ese momento.
- Ahora el despliegue de FTTx es ofrecido por multitud de operadores.

A parte de eso, multitud de países asiáticos (Japón, China, Corea, Singapur y Taiwán), y también Europa actualmente están probando e implantando redes PON. [1].

3. Arquitectura general

En este punto se va a estudiar la arquitectura de las redes FTTH, haciendo un estudio más profundo sobre PON, la tecnología más utilizada en la actualidad y puede que lo siga siendo en el futuro. También se compararan los distintos tipos de sistemas y de topologías utilizadas en este tipo de tecnología.

3.1 Red de acceso

La red de acceso consta de toda serie de elementos y equipamientos necesarios para realizar la conexión entre el proveedor de servicio y el bucle de abonado. El nodo central es el punto en el cual los proveedores de servicios realizan la interconexión con la red de acceso. La red de acceso local se denomina como “la última milla” o “el bucle local” [5] [14].

La red de acceso puede ser implementada de distintas maneras, pero la mejor elección es el medio de acceso óptico. Esto es, se considera una de las mejores opciones para el futuro debido al inmejorable rendimiento que ofrece la fibra óptica para las redes FTTH, gran capacidad, pocas pérdidas, etc.

Generalmente una red de acceso óptica está integrada por los siguientes elementos [4] [9] [15]:

- OLT (Optical Line Terminal): se trata de un dispositivo pasivo situado en el nodo de distribución que sirve como el punto final del proveedor de servicios.

- ONT (Optical Network Terminal) u ONU (Optical Network Unit): es el terminal situado en casa del usuario que termina la fibra óptica y ofrece las interfaces de usuario.
- ODN (Optical Distribution Nodes) u ORN (Optical Remote Node): consiste en un nodo que distribuye la señal desde la centralita hasta los hogares. Consta de splitters, tramos de fibras ópticas, empalmes y conectores.
 - Splitter o Divisor óptico: elemento pasivo que se encarga de direccionar la señal proveniente del OLT hasta cada uno de los usuarios.

3.2 Sistemas activos y sistemas pasivos

En el siguiente apartado se van a analizar las arquitecturas formadas por elementos pasivos y se mencionaran las ventajas de las mencionadas arquitecturas frente a la utilización de redes activas.

En las redes activas, la información se procesa y se envía por sus respectivos puertos de salida, donde el último enlace (ODN-ONT) es un enlace punto a punto y el ONT solo recibe información que va dirigida a este. Mientras que en las redes pasivas la información no es procesada eléctricamente en el nodo remoto (éste debe enviar toda la información o no dependiendo de la arquitectura utilizada) y el ONT es el encargado de aceptar o descartar la información recibida. Para los sistemas activos, no es necesario el uso del protocolo MAC, sin embargo en las redes pasivas resulta absolutamente necesario para el canal de subida [5] [6].

La ventaja principal de los sistemas activos es que poseen un enlace entre el nodo remoto y el ONT dedicado, con lo cual es posible utilizar dispositivos electroópticos con un coste bajo en los ONTs. Por el contrario, en los sistemas pasivos todos los dispositivos trabajan con el total de ancho de banda y, el coste del ONT aumenta [3].

Desde el punto de vista de seguridad las redes activas son mejores, sin embargo las arquitecturas pasivas intentan igualarse a las anteriores utilizando unos algoritmos de encriptación muy robustos.

Al igual que en aspectos de seguridad, los sistemas pasivos también se ven superados por los activos en cuanto a la calidad de servicio proporcionada [7].

A pesar de las numerosas ventajas que pueden ofrecer las arquitecturas activas, estas tienen varios inconvenientes: el uso de elementos activos supone un coste más elevado en la implantación y mantenimiento de la red, son sistemas que requieren más potencia, a la vez que no resultan eficientes para la transmisión de tipo ráfaga [2].

3.3 Sistemas unidireccionales frente a sistemas bidireccionales

Los sistemas de transmisión unidireccionales necesitan utilizar dos fibras, una para el canal de subida y otra para el canal de bajada. Por lo contrario, los sistemas bidireccionales disponen solo de una fibra para ambos canales, de subida y de bajada.

Para el transporte de la información en los sistemas unidireccionales se dispone de una capacidad de W canales (longitudes de onda) para cada cable de fibra óptica (W para el enlace ascendente y W para el enlace descendente). Mientras que en las redes bidireccionales se tiene una capacidad total de W canales, es decir $W/2$ canales para la subida de datos y $W/2$ para la bajada. A continuación se muestra la estructura de los dos sistemas explicados (Figura 2) [2] [5]:

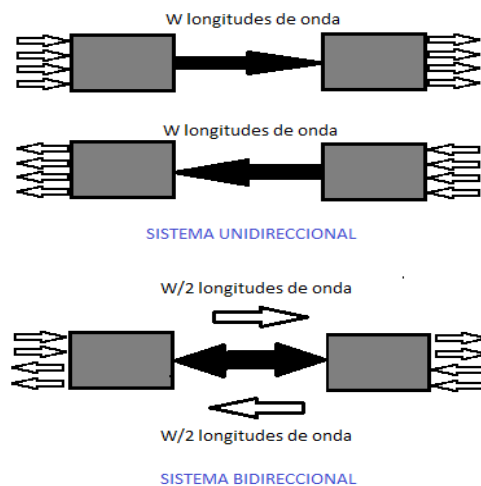


Figura 2: Esquemas de sistema unidireccional y bidireccional

Debido a esto, vamos a comparar ambos sistemas en función de la capacidad de cada uno [2] [3] [5]:

- ✓ Desde el punto de vista de la eficiencia, los unidireccionales son claramente superiores a las redes bidireccionales, ya que tienen el doble de canales que los bidireccionales.

- ✓ La amplificación resulta más sencilla en los sistemas unidireccionales, pero tanto la ganancia como el nivel de potencia que se obtienen a la salida son mejores en los sistemas bidireccionales.
- ✓ Los sistemas bidireccionales requieren una banda de guarda entre canales para evitar las interferencias.

3.4 Topologías de la red

Para conseguir una red eficiente y proporcionar un buen servicio a los usuarios la arquitectura de la red debe ser lo más sencilla posible, con el fin de minimizar los costes de su despliegue y mantenimiento. Esto quiere decir que siempre trataremos de utilizar los sistemas pasivos, ya que no es necesario invertir tanto dinero en estos.

A continuación se van a describir las distintas configuraciones de las redes FTTH.

3.4.1 Configuración punto a punto

Estos tipos de arquitecturas consisten, básicamente, en un enlace entre el OLT y los ONT mediante unos cables de fibra óptica (Figura 3). No se trata de un sistema demasiado utilizado en las arquitecturas de fibra hasta el hogar debido a su elevado coste. El precio de la implantación de estas redes aumenta con el número de usuarios (ONT) abonados (llevar un tramo de fibra hasta cada casa y mantenerlo). Este servicio es contratado, normalmente por empresas que



Figura 3: Enlace punto a punto

necesitan un enlace entre distintas sucursales y requieren un servicio de telecomunicaciones, ya sea voz o datos, con una determinada capacidad.

En el tramo entre el OLT y el ONT suele utilizarse un sistema bidireccional. Para transmitir se utilizan diferentes longitudes de onda para cada dirección para evitar las reflexiones indeseadas dentro de la propia fibra [5] [12] [14].

3.4.2 Configuración punto a multipunto

Tal y como se ha indicado previamente, en las redes FTTH se pretende conseguir estructuras sencillas y con bajos costes, y según hemos visto en el apartado anterior, las configuraciones punto a punto no cumplen los requisitos. Es por ello, por lo que en la tecnología FTTH se utiliza la configuración punto a multipunto, comúnmente llamada PON (Passive Optical Network) o Red Óptica Pasiva. Las redes PON constan de los siguientes elementos: OLT, ONT, ODN y divisores ópticos; elementos que ya han sido mencionados y que van a ser descritos con más detalle en los siguientes apartados [2] [3] [5].

El objetivo de esta arquitectura es reducir el precio de la red mediante el uso de elementos pasivos sencillos, repartiendo los costes entre varios segmentos de la red. Así pues, los usuarios comparten un mismo cable de fibra que llega hasta el splitter, donde la señal es distribuida hacia sus respectivos destinos [5].

Las redes ópticas pasivas pueden adoptar distintas topologías: en estrella o árbol, en anillo y en bus. La elección de una topología óptima va a depender de la condición geográfica y del emplazamiento de los usuarios [14].

3.4.2.1 Arquitectura en estrella o en árbol

Este tipo de arquitectura es el más utilizado en las redes FTTH debido a su bajo coste y a su gran eficiencia. Su estructura consiste en la interconexión del nodo central con un divisor óptico mediante tan solo un tramo de fibra (Figura 4). El divisor es el dispositivo pasivo que se encarga de repartir la señal, enviándola a sus destinatarios. Este divisor requiere unas funciones especiales para la privacidad y seguridad. Para poder realizar las tareas de conmutación en el divisor se asignan unos intervalos de tiempo específicos para los ONTs, basándose en la demanda de ancho de banda de cada uno de estos. En el canal ascendente se utiliza algún protocolo de acceso múltiple, normalmente multiplexación por división en el tiempo (TDM) [6].

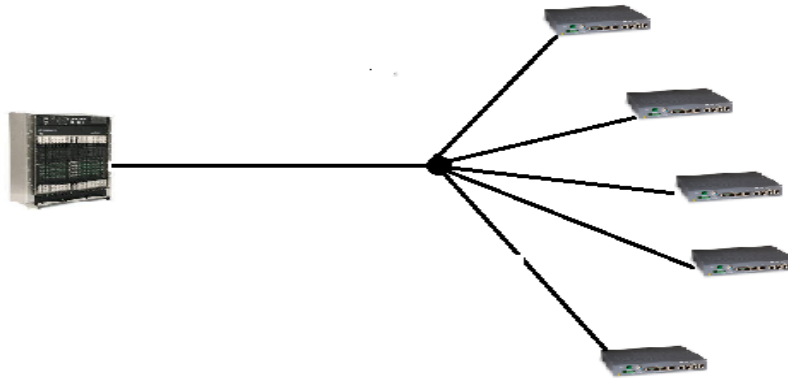


Figura 4: Topología en estrella

La topología en estrella es atractiva debido a la facilidad con la que se puede modificar la red. Es decir, si aumenta el número de usuarios la red en estrella puede dividirse en varias subredes, demostrando de esta manera la flexibilidad de la arquitectura.

No obstante, los sistemas en estrella presentan muchas debilidades en cuanto a la fiabilidad. La rotura del tramo principal de fibra o un fallo divisor óptico supondría la caída completa del todo el sistema. En la actualidad existen muchos problemas, incluyendo fallos de amplificadores, de la conexión de los puertos en los nodos de acceso originados por un fallo del láser o del corte de sintonización [8].

3.4.2.2 Arquitectura en bus

En esta arquitectura, el nodo central está conectado a otros nodos mediante un enlace común, que comparten todos los nodos (ONTs) de la red, como vemos en la Figura 5. Esta red posee dos direcciones: una de izquierda hacia la derecha, donde los nodos insertan tráfico, y otra de derecha hacia la izquierda,



Figura 5: Topología en bus

donde los nodos solo tienen dos funciones: leer o leer y eliminar el tráfico [6].

Evidentemente, el gran inconveniente de estos sistemas es la fiabilidad de la transmisión. La ruptura del enlace de fibra en un punto determinado del circuito deja sin comunicación a todos los usuarios situados en el tramo posterior a la rotura del cable [5] [6].

3.4.2.2 Arquitectura en anillo

La arquitectura del tipo anillo consiste en un enlace común para todos los nodos en forma del anillo, tal y como se puede observar en la Figura 6. Las topologías en anillo son atractivas por su robustez y son la base de muchas arquitecturas LAN y MAN para conseguir una comunicación fiable [1] [3] [5].

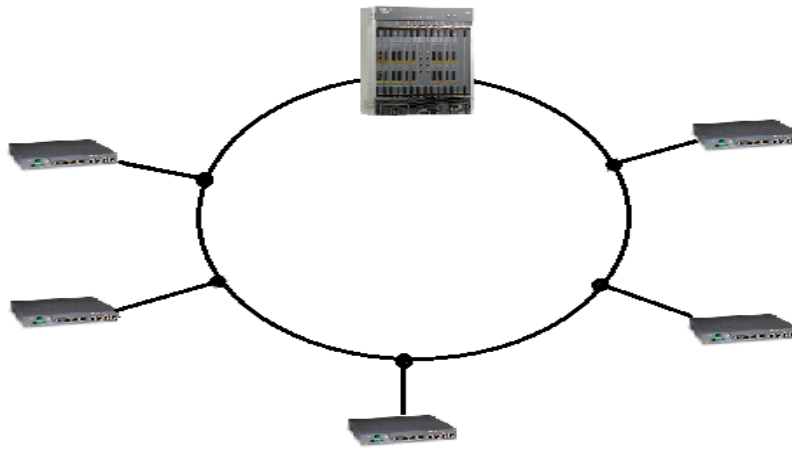


Figura 6: Topología en anillo

Los anillos son capaces de recuperar la comunicación después de un fallo utilizando dos técnicas de protección: la protección de ruta y el enlace/nodo de recuperación. La primera consiste en reenviar el tráfico desde el OLT en el sentido contrario al sentido anterior. La segunda técnica es similar, pero en este caso el tráfico se re direcciona en el nodo/enlace donde se ha producido la rotura [5] [6].

Para asegurar una transmisión basada en fibra óptica el tráfico puede ser cursado por distintos cables de fibra, por si se rompe el cable que estaba siendo utilizado. También existe una técnica de recuperación algo más sofisticada que la anterior, y es la basada en WDM. Esta consiste en enviar la información por varios cables a distintas longitudes de onda [5].

Capítulo II – Redes PON

Como ya se ha dicho previamente todas las infraestructuras FTTH están basadas en las redes PON, que destacan por la ausencia de elementos activos a lo largo del tramo desplegado hasta los usuarios. La gran ventaja de estos sistemas está en su coste, se ve reducido por utilizar tan solo elementos pasivos. También cabe destacar que la planificación de este tipo de redes se centra en el uso del splitter óptico, elemento clave para dividir la señal y dirigirla hacia los abonados.

1. Características y funciones de los elementos

Como ya se ha visto en el capítulo anterior, los elementos principales que componen una red FTTH son el OLT, el ONT y el divisor óptico. Por lo tanto, en el presente apartado se detallan las características y funciones generales de cada uno de ellos.

1.1 OLT (Optical Line Terminal)

El OLT es el elemento activo situado en la central del proveedor. De él parte el cable principal de fibra hacia los usuarios y es él mismo el que se encarga de gestionar el tráfico hacia los usuarios o proveniente de ellos, es decir, realiza funciones de router para poder ofrecer todos los servicios demandados por los usuarios. Cada OLT suele tener la suficiente capacidad para proporcionar un servicio a cientos de usuarios. Además, actúa de puente con el resto de redes externas, permitiendo el tráfico de datos con el exterior [5] [6].

Algunos de los objetivos de los OLT son [14]:

1. Realizar las funciones de control en la red de distribución: control de las potencias emitidas y recibidas, corrección de errores e interleaving.
2. Coordinar la multiplexación de los canales de subida y de bajada.

Cada OLT, adquiere datos de tres fuentes diferentes de información, actuando como concentrador de todas ellas. Así pues, el OLT de cabecera tiene conexión con las siguientes redes [7] [10]:

- **PSTN** (*public switched telephone network*) o RTB (red telefónica básica), para los servicios de voz; el OLT se conecta a través de un router de voz o un *gateway* de voz mediante interfaz correspondiente MGCP (*media Gateway controller protocol*) o protocolo de controlador *gateway* de medios de comunicación.
- **Internet**, para los servicios de datos o VoIP; el OLT se conecta a través de un router o *gateway* IP/ATM de voz, mediante encapsulamiento IP sobre ATM.
- **Video broadcast** o VoD (*video on demand*), para los servicios de videodifusión; el OLT se conecta directamente, o bien indirectamente a través de un router o *gateway* ATM.

Sin embargo, el OLT no es un hardware único, sino que se subdivide en tres módulos o equipos diferentes, cada uno de ellos encargados de gestionar un tráfico determinado. Así pues, existen tres subtipos de OLT [7] [10] [11]:

- 1) **P-OLT**, OLT proveedor (*provider OLT*). Este equipo tiene dos tareas fundamentales:
 - Es el encargado de recoger infinidad de tramas de voz y datos agregadas que se dirigen hacia la red PON, procedentes de las redes RTB e Internet, y las transforma en señales inyectables en las diferentes ramas de los usuarios por difusión a través del protocolo TDM o multiplexación por división en el tiempo (*time división multiplexing*). Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo ésta 1490 nm.
 - Absorbe todas las tramas de voz y de datos procedentes de los ONT de usuarios, concentrándolos en una sola vía de escape en función de la naturaleza de los datos recibidos. Así pues el tráfico de voz lo redirige hacia la RTB, y el tráfico de datos hacia la red Internet. Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo ésta 1310 nm.

El P-OLT además de concentrar la información, y dividirla en función de su naturaleza (voz-datos), también se encarga de multiplexar el canal descendente (en dirección a los ONT) y ascendente (en dirección al OLT) a través de la misma fibra.

- 2) **V-OLT**, OLT de video (*video OLT*). Este equipo se encarga únicamente de transportar las tramas de video y video bajo demanda VoD procedentes de la red de videodifusión, hasta los ONT de los usuarios. Para ello, transforma las tramas de video en señales inyectables en las ramas de

todos los usuarios (difusión), que viajan en una longitud de onda dedicada: 1550 nm.

- 3) **M-OLT**, OLT multiplexador (*multiplexer OLT*). Es un equipo multiplexor WDM que permite la multiplexación y demultiplexación entre las señales procedentes del P-OLT y V-OLT.

A continuación, en la Figura 7, se muestra la estructura explicada anteriormente:

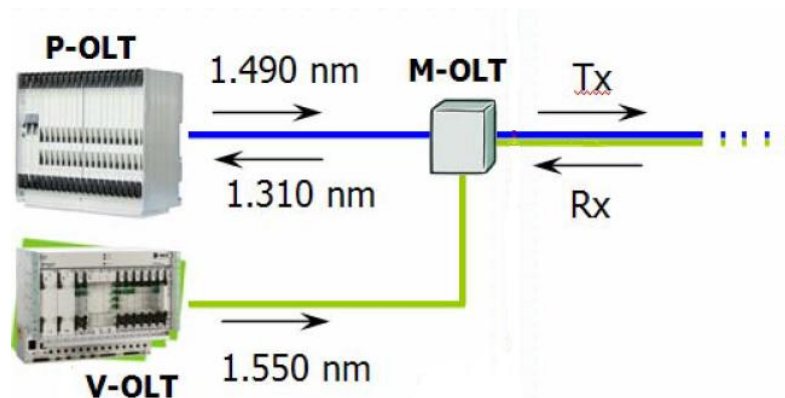


Figura 7: Estructura de un OLT

Al utilizar distintas longitudes de onda para cada cosa se consigue evitar interferencias entre los contenidos del canal ascendente y descendente. Para ello se emplean técnicas WDM (Multiplexación por división de longitud de onda) basadas en el uso de filtros ópticos [6].

También hay que destacar que los OLT no emiten a la misma potencia a todos los ONT, sino que lo hacen dependiendo de la distancia a la que se encuentren de la central. Esto es posible gracias a los dimensionadores de distancia que poseen los OLT, que son capaces de calcular la distancia existente entre el usuario final y la central. Gracias a este mecanismo se consigue que a cada abonado le llegue la potencia necesaria, de la manera que las ráfagas de luz tendrán una menor potencia cuando se dirijan hacia los abonados cercanos a la centralita, mientras que para los abonados que se encuentren más lejos se les asignará una potencia mayor [5] [6].

1.2 ONT (Optical Network Terminal)

Los ONT son los elementos encargados de recibir y filtrar la información destinada a un usuario determinado procedente de un OLT. Además, de recibir

la información y dársela al usuario en un formato adecuado, cumple la función inversa. Es decir, encapsula la información procedente de un usuario y la envía en dirección al OLT de cabecera, para que éste la redireccione a la red correspondiente. Normalmente se encuentran instalados en los hogares junto a la roseta óptica correspondiente [6].

Existen dos tipos de ONT según la función que desempeñen:

- **H-OLT:** también denominado ONT del hogar (Home ONT), instalado directamente dentro de la vivienda para otorgar servicios a un usuario en particular. Instalado en redes FTTH.
- **B-ONT:** ONT de edificio (Building ONT), preparado para ser instalado en los R.I.T.I. o cuartos de comunicaciones de los edificios privados o empresas, y que se encuentran capacitados para dar servicio a varios usuarios conectados a él a través de un repartidor. Este tipo de ONT se instala en redes FTTB.

El filtrado de la información recibida en el ONT, se lleva a cabo a nivel de protocolo Ethernet, a través de las denominadas tramas PEM (*PON encapsulation method*). La trama, consta de tres campos [16]:

- **Cabecera** (*header*); este campo contiene información sobre sincronización de la trama.
- **CRC;** que permite conocer si la información enviada ha llegado correctamente y sin errores a su destino
- **Carga útil** (*Payload*); son los datos a enviar

Una vez realizado el filtrado y obtenido la información que interesa, el ONT debe diferenciar las señales de video (que proceden del V-OLT) y las tramas de voz y datos (procedentes del P-OLT). Para realizar este segundo filtrado, el módulo electroóptico posee dos fotodiodos: uno analógico APD (*analogic photo-diode*) y otro digital DPD (*digital photo-diode*). Los filtros ópticos son [16]:

- **OAF,** filtro óptico analógico (*optical analogic filter*); la señal de video a 1550 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, atacando al fotodiodo analógico APD para realizar la conversión en frecuencia.
- **ODF,** filtro digital óptico (*optical digital filter*); la señal de voz y datos a 1490 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, atacando al fotodiodo digital DPD.

A parte del filtrado de la información recibida, el ONT es capaz de enviar información al OLT de cabecera en una longitud de onda dedicada de 1310 nm. Para ello dispone de un LED encargado de enviar señales luminosas. Para

evitar la colisión entre las tramas enviadas por los ONTs se recurre a la multiplexación por división en el tiempo (TDM), la cual es gestionada por el OLT, encargado de asignar intervalos de tiempo a cada ONT [6] [16].

1.3 Splitter o divisor óptico

Se trata de un elemento pasivo situado a lo largo del tramo que se extiende entre el OLT y sus respectivos ONT a los cuales presta servicio. Sus funciones básicas son las de multiplexar y demultiplexar las señales recibidas. Por otra parte, son dispositivos de distribución óptica bidireccional, es decir, también son capaces de combinar potencia. Por tanto es capaz de realizar las siguientes funciones [4] [5] [14]:

- La señal que accede por el puerto de entrada (enlace descendente), procede del OLT y se divide entre los múltiples puertos de entrada.
- Las señales que acceden por las salidas (enlace ascendente), proceden de los ONT (u otros divisores) y se combinan en la entrada.

Se puede considerar como el elemento más importante de la red, ya que ofrece la posibilidad de tanto de juntar como de dividir las señales, abaratando de una manera muy considerable el coste de tanto de despliegue como de mantenimiento de la red. Al mismo tiempo, por el hecho de ser un elemento totalmente pasivo no requiere energización externa [2].

Posee tan sólo un inconveniente, y es que introduce pérdidas de potencia óptica sobre las señales de comunicación, que son inherentes a su propia naturaleza. Estas pérdidas se pueden de una manera muy sencilla, ya que existe una relación matemática entre estas y el número de salidas del divisor [5]:

$\text{Atenuación}_{\text{divisor}} = 10 \log (1/N)$, donde N es el número de salidas del divisor

Ecuación 1: Atenuación por distribución en los divisores

Existen diversos tipos de divisores, ya que no todos se construyen a partir de la misma tecnología. No obstante, los divisores más habituales son de dos tipos:

- Para dispositivos con gran número de salidas (> 32 salidas), se utilizan divisores realizados basándose en tecnología planar.
- Para dispositivos con menor número de salidas (< 32 salidas), se utilizan divisores realizados a base de acopladores bicónicos fusionados.

1.4 Fibra óptica

Este es un elemento fundamental de la red, del cual ésta toma el nombre. Una fibra óptica se puede definir como un cable o un filamento de vidrio de alta pureza u otro material transparente capaz de transportar haces de luz. Es bastante flexible, su grosor es muy reducido y posee las características necesarias para transportar los haces que llevan la información gracias a una serie de reflexiones internas [14].

1.4.1 Composición y geometría de la fibra óptica

La geometría física de la fibra óptica y el índice de refracción son las claves necesarias que condicionan el funcionamiento general, comportamiento y ancho de banda de los diferentes tipos de fibra óptica. No obstante, todas y cada una de ellas, comparten una estructura genérica, que permite la transmisión en general.

Toda fibra óptica está constituida por tres estructuras o capas concéntricas (Figura 8), que difieren en sus propiedades de composición [5] [14]:

- **Núcleo.** Es la parte más interna de la fibra y se encarga de conducir las señales ópticas procedentes de la fuente de luz hasta el dispositivo de recepción. Se trata de una sola fibra continua de vidrio fabricada a elevada temperatura a partir de cuarzo ultra puro, plástico o dióxido de silicio. Posee un diámetro muy pequeño, que varía entre los 10 y 300mm. Cuanto mayor es el diámetro del núcleo, mayor es la cantidad de luz que el cable puede transportar.
- **Revestimiento.** Es la parte intermedia de la fibra, que rodea y protege al núcleo. Este medio posee un índice de refracción menor al del núcleo, de forma que actúa como una capa reflectante (a modo de espejo), consiguiendo que las ondas de luz que intentan escapar del núcleo sean reflejadas y retenidas en el mismo.

Está fabricado a elevada temperatura con base en silicio de naturaleza cristalina, y generalmente son de cuarzo o plástico transparente. En esta capa se suelen añadir varias capas de plástico con el fin de absorber los posibles impactos o golpes que pueda recibir la fibra y proporcionar una

protección extra contra curvaturas excesivas del cable, es decir, para preservar la fuerza de la fibra.

- **Recubrimiento.** El recubrimiento es la parte externa de la fibra y actúa a modo de amortiguador, protegiendo el núcleo y el revestimiento de posibles daños y agentes externos. En definitiva, provee al cable de cierta protección mecánica a la manipulación. Está fabricado con material plástico, capaz de resguardar la fibra óptica de la humedad, el aplastamiento, los roedores y otros riesgos del entorno.

En muchas ocasiones el recubrimiento aparece claramente dividido a su vez en dos subcapas: el recubrimiento primario y el recubrimiento secundario. En aquellos casos en los que el recubrimiento primario lleva otro adicional secundario, la fibra suele utilizarse para exterior o bajo tierra.

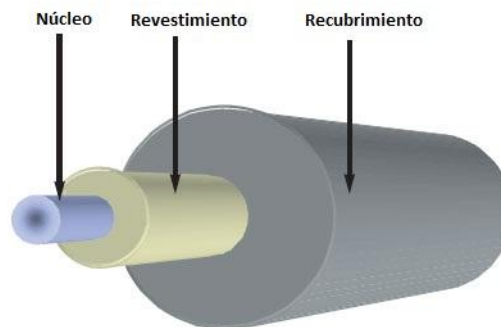


Figura 8: Geometría de una fibra óptica

1.4.2 Clasificación de la fibra óptica

En función de la designación del material que compone el núcleo de la fibra, se pueden distinguir distintos tipos [5] [14]:

- **Fibra de silicio:** es la forma cristalina más pura del vidrio, son muy buenas conductoras y poseen unas prestaciones excepcionales como vehículo de transmisión de luz.
- **Fibra de vidrio:** posee tanto el núcleo como la envoltura óptica de vidrio, con índices de refracción diferentes. En general, suelen tener un diámetro comprendido entre 50 y 70 micras.
- **Fibra de plástico:** está constituida por un núcleo de plimetacrilato de metilo y una envoltura óptica de polímero plástico con índice de refracción diferente. Este tipo de fibra ofrece ventajas en cuanto a uniformidad de transmisión del espectro visible, filtración de rayos

ultravioletas e infrarrojos, resistencia mecánica, flexibilidad, peso reducido y facilidad de instalación.

- Fibra de núcleo líquido: son de tecnología más reciente, y están compuestas por un núcleo líquido con una envoltura óptica de polímero plástico. Su grosor es superior al de los otros tipos de fibras (entre 3 y 8 mm). Su principal aplicación se orienta hacia la iluminación en modo monofibra.

También se puede clasificar según el modo de propagación:

- Monomodo: permite tan sólo la propagación de un único modo de transmisión. Esto es posible gracias a que el diámetro del núcleo de este tipo de fibras es muy reducido, y suele estar comprendido entre 8 y 10 micras (Figura 9), por lo que tan sólo permite la propagación de un haz de luz fundamental [5] [14].

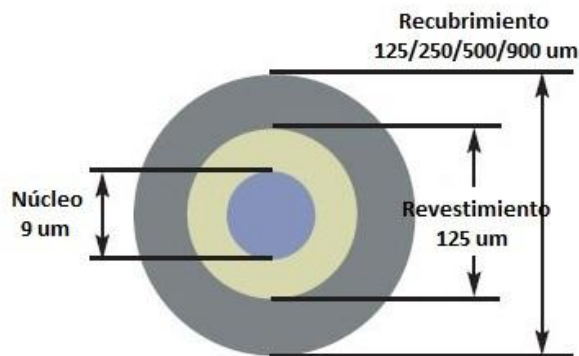


Figura 9: Sección de una fibra monomodo

Gracias a esta geometría, el haz que se propaga, lo hace sin reflexiones, es decir, posee una trayectoria paralela al eje de la fibra (Figura 10), eliminando el desfase o ensanchamiento del pulso en recepción y en consecuencia, la dispersión modal.



Figura 10: Propagación de los haces de luz a través de una fibra monomodo

- Multimodo: soporta la propagación de varios modos de transmisión. Esto es gracias a que el diámetro del núcleo de este tipo de fibras es

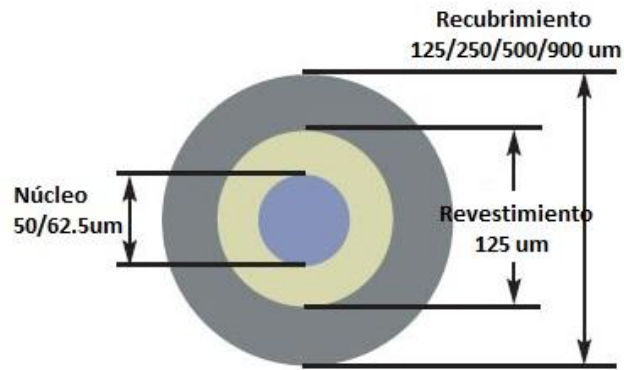


Figura 11: Sección de una fibra multimodo

amplio, y suele estar comprendido entre 50 y 62.5 micras (Figura 11), por lo que el acoplamiento de la luz en diferentes modos es más sencillo [14].

Los rayos que viajan a través del núcleo de la fibra reflejándose contra el revestimiento (Figura 12). Como es lógico, este tipo de fibra tiene peores prestaciones que el anterior, ya que posee una velocidad de propagación menor y una atenuación mayor, debida a las reflexiones interiores.

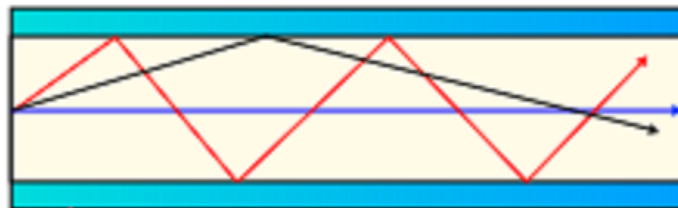


Figura 12: Propagación de los haces de luz a través de una fibra multimodo

1.4.3 Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica

Como se ha visto, la fibra óptica es el candidato perfecto para ser el medio de transmisión para redes que requieren mucha capacidad y un amplio despliegue. Esto significa que la fibra presenta innumerables ventajas respecto a otros medios de transmisión utilizados actualmente, pero a pesar de ello también posee algunas características negativas.

Las principales ventajas que ofrece la fibra óptica, como medio de transmisión respecto a otros sistemas basados en señales electromagnéticas sobre metales son [3] [5] [14] [16]:

- Permiten mayor velocidad de transmisión. Las señales recorren los cables de fibra óptica a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), mientras que las señales eléctricas recorren los cables a una velocidad entre el 50 - 70% de ésta, según el tipo de cable.
- Mayor capacidad de transmisión. Pueden lograrse velocidades superiores a los 2 Gbps, puesto que la velocidad de transmisión aumenta con la frecuencia de transmisión.
- Presentan inmunidad total ante las interferencias electromagnéticas. La fibra óptica no produce ningún tipo de interferencia electromagnética y no se ve afectada por las radiaciones. Por lo tanto, tampoco poseen riesgo de cortocircuito ni de otros daños de origen eléctrico.
- No existen problemas de retorno a tierra, interferencias cruzadas y reflexiones como ocurre en las líneas de transmisión eléctricas.
- La atenuación en la transmisión aumenta con la distancia más lentamente que en el caso de los cables eléctricos, lo que permite mayores distancias entre repetidores de señal.
- Su peso es muy reducido y su flexibilidad es mayor respecto a otros tipos de cable, lo cual es una ventaja en cuanto a su despliegue.
- Los cables de fibra óptica son apropiados para utilizar en una amplia gama de temperaturas, dado que soportan mejor temperaturas extremas que los cables de origen metálico.
- Permiten incrementar la capacidad de transmisión de datos añadiendo nuevos canales que utilicen longitudes de onda distintas a las ya empleadas, mediante técnicas de WDM.
- La fibra óptica presenta una mayor resistencia a los ambientes y líquidos corrosivos que los cables eléctricos.
- Las materias primas utilizadas en la fabricación de la fibra óptica son muy abundantes, y se espera que con el tiempo el coste de fabricación se reduzca a un nivel similar al de los cables metálicos.
- La vida media operacional y el tiempo medio entre fallos de un cable de fibra óptica, son muy superiores a los de un cable de origen eléctrico.

Lamentablemente, la tecnología no solo tiene partes buenas y a pesar de que en el caso de la fibra hay un número mayor de ventajas que de inconvenientes, estos últimos también están presentes [3] [5] [14] [16]:

- Conversión electro-óptica. Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una fibra óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso (850, 1310 ó 1550 nm). Esta conversión se lleva a cabo mediante un dispositivo electrónico en el extremo del transmisor, el cuál

proporciona un formato propio a la señal de comunicaciones, y la convierte en señal óptica usando un LED o un LASER de estado sólido.

- Caminos homogéneos. Es recomendable un camino físico recto o semirecto para el cable de fibra. El cable, sin embargo se puede enterrar directamente en tierra, situar en tubos o disponer en cables aéreos a lo largo de dichos caminos homogéneos. Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad por la que discurren, y algunos derechos sobre el camino puede ser imposibles de adquirir. Para localizaciones como terrenos montañosos o algunos entornos urbanos, pueden ser más adecuados otros métodos de comunicación sin hilos.
- Instalación especial. Debido a la naturaleza dieléctrica de la fibra, son necesarias técnicas especiales para la instalación de los enlaces. Se deben sustituir los métodos convencionales de instalación para cables metálicos como, por ejemplo, soldadura, sujeción o crispado. Son reemplazados por los conectores u empalmes ópticos, que requieren de equipos más costosos.
- Reparaciones. Un cable de fibra óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Así pues, los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con bastante destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones, puede ser necesario reparar el cable entero. Este problema puede ser aún más complejo si cabe, dado el gran número de usuarios que cuentan con dicho servicio. Es importante, por ello, el diseño de un sistema propio con rutas físicamente diversas, que permita afrontar tales contingencias.

2. Funcionamiento general

Una vez vistos cada uno de los componentes, se puede explicar con más detalle el funcionamiento global de la red:

El tramo principal de fibra se tiende entre el terminal de línea óptica (OLT), situado en el nodo central (CO), y el centro distribuidor óptico (FDH), posicionado cerca del grupo de abonados. En este punto se utiliza un splitter (divisor óptico) para la conexión de los abonados al núcleo de la fibra (hasta 32 abonados). A continuación, cada bucle de abonado se equipa con un terminal de red óptica (ONT) que se conecta con las ramas del divisor. Tal arquitectura (punto a multipunto) disminuye de forma considerable el precio de la instalación y control [1] [6] [21].

El OLT asegura la transmisión de voz y datos a una longitud de onda distinta a la del ONT (a 1490 nm OLT y a 1310 nm ONT), con lo cual se consigue realizar la transmisión en ambos sentidos sobre tan solo una fibra sin interferencia entre las señales [6] [12].

Al mismo tiempo, el OLT puede estar conectado a un multiplexador por longitud de onda (WDM) para la difusión conjunta de video, voz y datos sobre una fibra. La emisión de la señal de video se realiza en un solo sentido, normalmente a 1550nm.

En la siguiente figura (Figura 13) se muestra el esquema general de una red PON, en la cual podemos observar los elementos explicados previamente [1]:

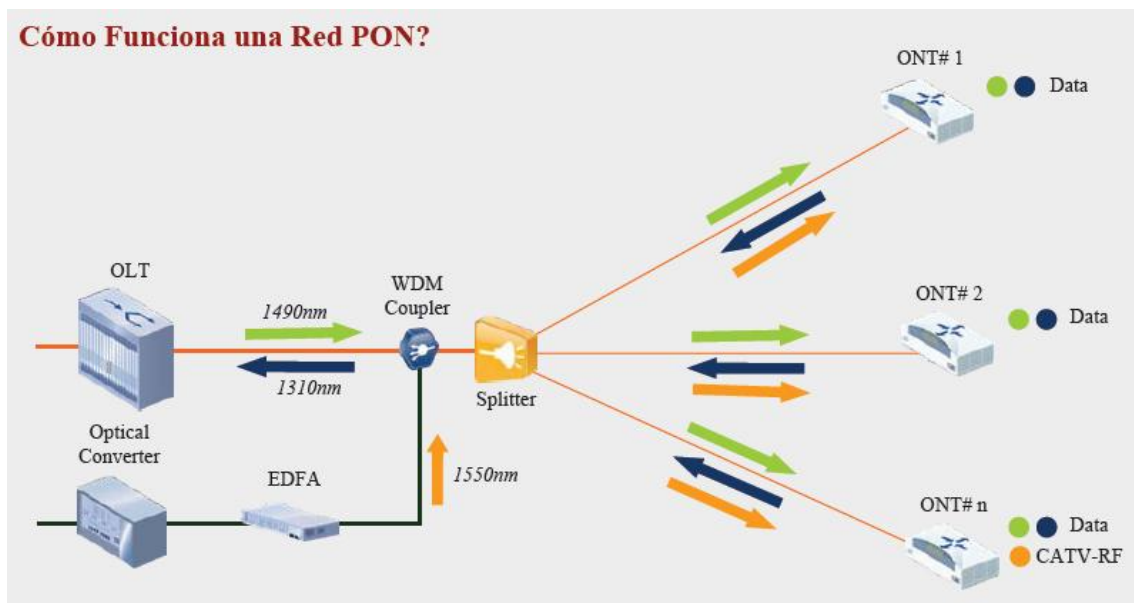


Figura 13: Esquema global de una red PON

Dependiendo de las necesidades del usuario se pueden realizar enlaces de distintas capacidades de transmisión. En la actualidad se ofrecen conexiones, tanto simétricas como asimétricas, desde 50 Mbps hasta 2.5 Gbps. El protocolo elegido se basa en el modo de transferencia asíncrona (ATM) y es llamado ATM-PON. También es posible el uso de otros protocolos, tales como: BPON, GPON, EPON; los cuales se verán con más detalle en los apartados siguientes.

2.1 Canal descendente

En este punto se va a ver el funcionamiento de la red en el sentido descendente, es decir, el sentido de la información transmitida es hacia el usuario.

En este caso la red se comporta como una red punto-a-multipunto, ya que el OLT se encarga de enviar la información recopilada mediante broadcast. El OLT recoge todas las tramas de voz y datos y se usa WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) para juntar dichas tramas con las tramas de vídeo, que tienen una longitud de onda distinta. Para la transmisión de voz y de los datos se utiliza la longitud de onda de 1490 nm, mientras que para el envío de video se usa una longitud de onda de 1550 nm [5] [6] [15].

Las tramas, como ya se ha visto en apartados anteriores, llevan información con la dirección de destino, para saber a qué usuario van dirigidos. El divisor óptico se encarga de repartir la señal de forma adecuada, enviando cada paquete a su correspondiente destino. La red óptica es totalmente transparente al envío de datos (Figura 14).

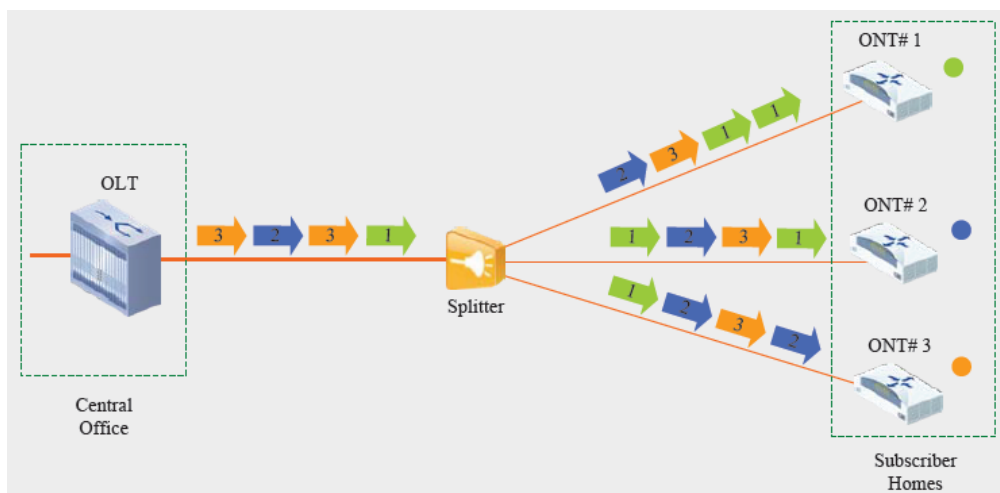


Figura 14: Canal descendente

A parte de la información transmitida de voz, datos y vídeo, el OLT determina, usando la Multiplexación por División en el Tiempo (TDM) y le notifica a los ONT los Time Slots para el envío de datos en el sentido ascendente [1] [5] [6].

2.2 Canal ascendente

El canal ascendente es el sentido de información procedente del ONT del usuario final, hasta el OLT del operador. En este canal, la red PON se comporta como una red punto a punto.

Cada ONT recoge las tramas de voz y datos agregadas de cada usuario y que se dirigen hacia el OLT. En este punto, el ONT realiza la misma operación que el OLT en el canal descendente, es decir, convierte las tramas en señales

inyectables a través de la fibra óptica dedicada al usuario. Es decir, el ONT toma el tráfico del puerto del usuario y lo mapea en tramas PEM [5] [6] [15].

Para poder transmitir la información de los diferentes ONT sobre el mismo canal, es necesario, al igual que en el canal descendente, la utilización de TDMA, de tal forma que cada ONT envía la información en diferentes intervalos de tiempo, controlados por la unidad OLT. Se requiere un estado de sincronismo muy preciso para evitar colisiones [10].

El divisor de cada etapa, es el encargado de recoger la información procedente de todos sus ONTs correspondientes y multiplexarla en una única salida de fibra, en dirección al OLT del operador.

En cuanto a las longitudes de onda de trabajo, cabe destacar que la información enviada por el usuario (tanto voz como datos) viaja siempre a una longitud de onda de 1310 nm [1] [6] [10].

En la Figura 15 se puede apreciar el comportamiento de la red en el sentido descendente. Vemos como el divisor óptico junta las tramas recibidas de los usuarios y las envía hacia el OLT y como este envía información sobre la asignación de los Time Slots a cada uno de los ONT.

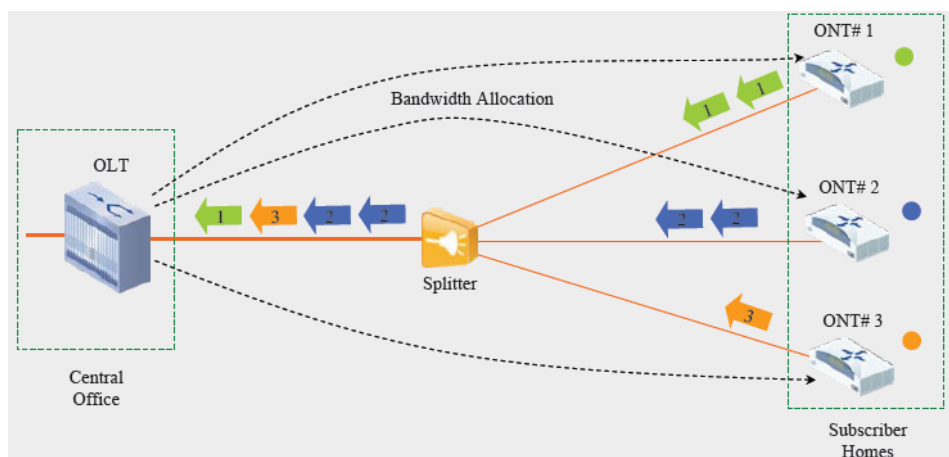


Figura 15: Canal ascendente

3. Estándares de las redes PON

Ya hemos visto todos los elementos que intervienen en las redes PON y todas sus funciones. También se ha descrito el funcionamiento global de la propia red,

tanto en el sentido descendente como en el sentido ascendente. No obstante, existen distintas arquitecturas en cuanto a la propia PON.

Las redes PON, constituyen una familia de redes (xPON), cuyo origen se encuentra en una primera red que fue definida por la FSAN, grupo formado por 7 operadores de telecomunicaciones, con el objetivo de unificar las especificaciones para el acceso de banda ancha a las viviendas. Así pues, en el presente apartado se van a describir tanto las distintas arquitecturas de las redes PON existentes, como todas sus características.

3.1 Arquitectura APON

A-PON o ATM-PON (Redes Ópticas Pasivas ATM) está definida en la revisión del estándar de la ITU-T G.983, el cual fue el primer estándar desarrollado para las redes PON. Las especificaciones iniciales definidas para las redes PON fueron hechas por el comité FSAN (Full Service Access Network), el cual utiliza el estándar ATM como protocolo de señalización de la capa 2 (Enlace de Datos). Los sistemas APON usan el protocolo ATM como portador (Figura 16). A-PON se adecua a distintas arquitecturas de redes de acceso, como, FTTH (Fibra hasta la vivienda), FTTB/C (fibra al edificio/a la acometida) y FTTCab [9] [15].

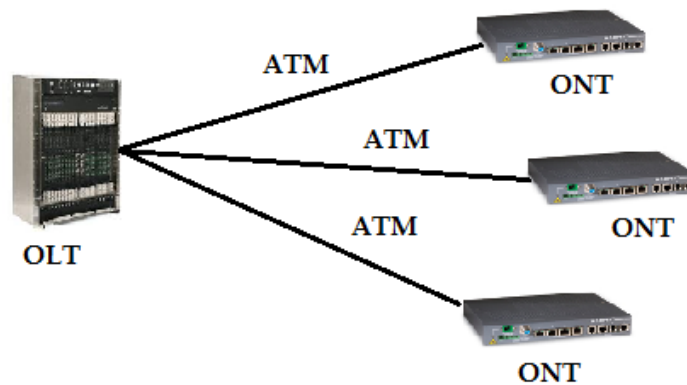


Figura 16: Arquitectura básica de una red APON

La transmisión de datos en el sentido descendente se realiza con una corriente de ráfagas de celdas ATM de 53 bytes cada una, con 3 bytes para la identificación del ONT. Poseen una tasa binaria de 155,52 Mbps que son repartidos entre todos los usuarios existentes.

Para el canal ascendente, en cambio, se utilizan ráfagas de 54 celdas ATM, de las cuales dos son PLOAM (Physical Level Operations And Maintenance) que contienen información de destinos de cada celda y mantenimiento de la red [9].

3.2 Arquitectura BPON (Broadband PON)

Esta tecnología de las redes PON surgió como una mejora de la tecnología APON para integrar y obtener acceso a más servicios como Ethernet, distribución de video, VPL, y multiplexación por longitud de onda (WDM) logrando un mayor ancho de banda, entre otras mejoras.

Ya que se trata de una mejora de la tecnología APON, también posee sus características. Al igual que APON utiliza el protocolo ATM, pero tiene la diferencia que puede dar soporte a otros estándares de banda ancha. En su primera versión, las redes BPON estaban definidas bajo una tasa fija de transmisión de 155 Mbps, tanto para el canal ascendente como para el descendente [6] [9] [15].

Sin embargo, más adelante se modificó para flexibilizarla, admitiendo canales asimétricos:

- Canal descendente: 622 Mbps.
- Canal ascendente: 155 Mbps.

Sin embargo, y a pesar de presentar mejoras respecto a las redes APON, tenían un elevado coste de implantación, así como diversas limitaciones técnicas. De esta forma, se ha ido avanzando poco a poco para solventar los problemas que suponía esta tecnología que, a día de hoy, permite de forma asimétrica alcanzar velocidades de hasta 1.2 Gbps de la siguiente forma:

- Canal descendente: 1,244 Gbps.
- Canal ascendente: 622 Mbps.

Algunas de sus características más importantes son [1] [6] [9] [12] [16][18]:

- Al igual que APON sus celdas pueden ser de datos o de PLOAM, celdas que contienen información para la sincronización, control de errores, seguridad, mantenimiento y distribución del ancho de banda.

- Admiten un ratio máximo de 32 divisores por OLT, y cada divisor admite un máximo de 64 salidas a usuarios (ONT). Esto supone un total de 2048 usuarios posibles por cada OLT.
- La máxima longitud de fibra que puede haber entre un OLT y un ONT es de 20 km.
- Se utiliza fibra monomodo estándar según la norma ITU-T G.652.
- El OLT es capaz de calcular la distancia que hay hasta cada ONT. El OLT envía un paquete a un ONT determinado y mide el retardo de ida y vuelta de dicho paquete. Esto supone una mejora del sistema en cuanto a transmisión, ya que con esto se evitan las colisiones entre los paquetes procedentes de distintos ONT.
- Utiliza protección de red. Los distintos esquemas son:
 - Tipo A: Una fibra adicional
 - Tipo B: Duplicado de fibra y OLT
 - Tipo C: Duplicado de toda la PON
 - Tipo D: Duplicado independiente de fibras de alimentación y distribución

Broadband PON se define en varias revisiones al estándar ITU-T G.983 [13]:

- G.983.1 [18]: Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas (2005). Es la revisión original de esta tecnología.
- G.983.2: Especificación de la interfaz de control y gestión de terminales de red óptica para redes ópticas pasivas de banda ancha (2005).
- G.983.3: Sistema de acceso óptico de banda ancha con capacidad de servicio incrementada mediante asignación de longitudes de onda (2001).
- G.983.4: Sistema de acceso óptico de banda ancha con asignación dinámica de anchura de banda para aumentar la capacidad de servicio (2001).
- G.983.5: Sistema de acceso óptico de banda ancha con mayor capacidad de supervivencia (2002).

3.3 Arquitectura EPON (Ethernet PON)

Paralelamente a la evolución de las redes PON estandarizadas por la ITU, y que tienen su origen en la FSAN, surge una nueva especificación realizada por el grupo de trabajo EFM (*Ethernet in the First Mile* o Ethernet en última milla), constituido por la IEEE. La intención de este proyecto era aprovechar las ventajas de la tecnología de fibra óptica de redes PON, y aplicarlas a Ethernet.

De esta manera nació el estándar EPON bajo la norma IEEE 802.3ah, que a día de hoy se encuentra en desarrollo.

Este sistema se basa principalmente en el transporte de tráfico Ethernet en vez del transporte por medio de celdas de ATM (Figura17), que en muchos casos resulta ser muy ineficiente. Funciona con velocidades de Gigabit, por lo cual la velocidad con la que dispone cada usuario final depende del número de ONT que se interconecten a cada OLT. Sus principales ventajas frente a los sistemas anteriores APON y BPON son [9] [12]:

- Ofrece QoS (Calidad de servicio) en ambos sentidos, tanto descendente como ascendente.
- La interconexión entre las etapas es más simple.
- Facilita en gran medida la llegada con fibra hasta los abonados, ya que los equipos con los que se accede son más económicos al usar interfaces Ethernet.
- La gestión y administración de la red se basa en el protocolo SNMP, lo cual permite reducir la complejidad de los sistemas de gestión de otras tecnologías.

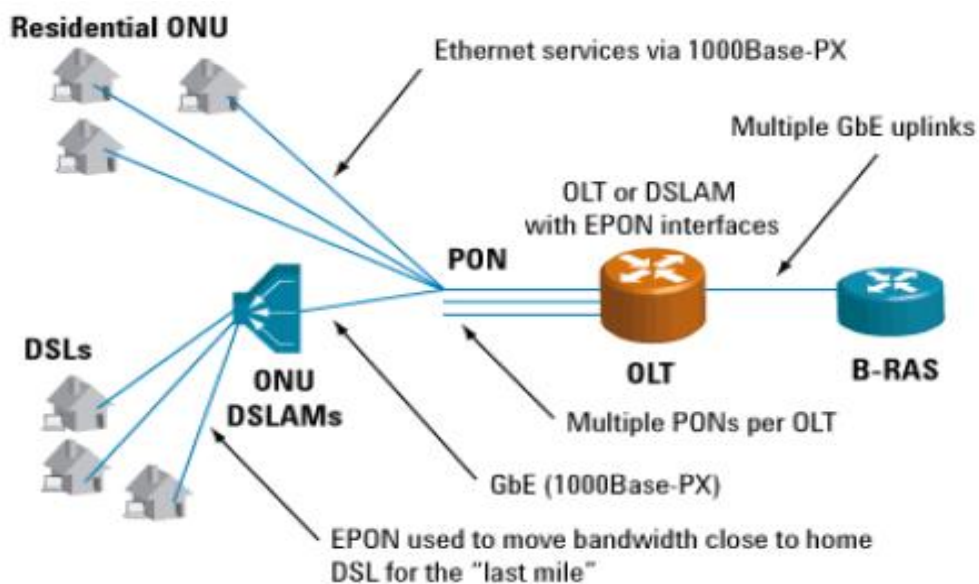


Figura 17: Esquema general de una red EPON

Las características principales de este tipo de red son [1] [6] [9] [12] [16]:

- La tasa binaria es simétrica: 1244 Gbps tanto para Downstream como para Upstream.
- Admite un ratio máximo de 16 divisores por OLT.

- El tipo de fibra que se utiliza es monomodo estándar según la norma ITU-T G.652.
- La longitud máxima de la fibra no puede superar los 10 km.
- El estándar define las siguientes configuraciones:
 - Punto-a-punto
 - Punto-a-multipunto
 - Punto-a-multipunto con DSL
- La trama Ethernet posee una longitud variable y está estructurada tal y como se muestra en la Figura 18 [12]:

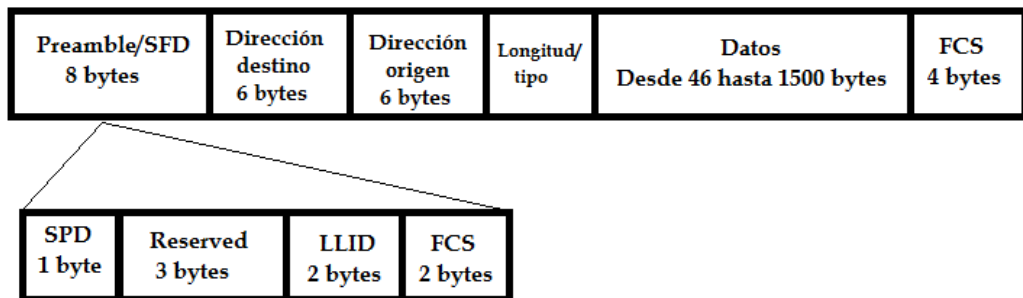


Figura 18: Estructura de una trama EPON

Los estándares son definidos por IEEE [12]:

- Estándar IEEE 802.3ah (EPON)
 - Recoge tres áreas:
 - Punto-a-punto sobre cable de cobre a 10Mbps hasta 750m
 - Punto-a-punto sobre fibra a 1Gbps y hasta 10 km
 - Punto-a-multipunto sobre fibra a 1Gbps hasta 20 km (EPON)
 - Incluye también procedimientos de operación, administración y mantenimiento (OAM).
- Estándar IEEE 802.3av (GEPON: Gigabit Ethernet PON)
 - Downstream: 10Gbps
 - Upstream: 1Gbps o 10Gbps

3.4 Arquitectura GPON (Gigabit PON)

Gigabit PON es otra tecnología perteneciente a la arquitectura PON. A día de hoy, se trata del estándar más avanzado sobre el que se sigue aun trabajando.

Capítulo II – Redes PON

Cabe destacar que es una evolución de las redes BPON, por lo cual, al igual que este, se basa en el protocolo ATM. Fue creado con el principal objetivo de poder ofrecer un ancho de banda mucho más alto que sus predecesores, y por tanto lograr una mayor eficiencia para el transporte de servicios de hoy en día [10].

La característica más importante de GPON, es que permite la transmisión de información encapsulada bajo varias tecnologías. Esto es gracias a la introducción de un nuevo método de encapsulamiento, GEM (*GPON Encapsulation Method*), el cual permite acomodar los servicios de ATM (al igual que pasaba en BPON, pero de una manera más eficiente), Ethernet y TDM en la red [9] [10] [12][19].

Otras características de GPON [7] [9] [10] [12] [16][19]:

- Al igual que las demás arquitecturas utiliza la fibra monomodo estándar (ITU-T G.652).
- Las velocidades de transmisión varían desde los 150Mbps hasta los 2Gbps:
 - Downstream: 1244 ó 2488Mbps
 - Upstream: 155, 622, 1244 ó 2488Mbps
- La máxima relación de división óptica es mayor que sus predecesoras, es de 64.
- La longitud de la fibra está comprendida entre los 10 y los 20 km.
- Se añaden más herramientas de seguridad. Se utiliza cifrado AES para los datos de usuario.
- La trama de GPON, GEM tiene la siguiente estructura (Figura 19):

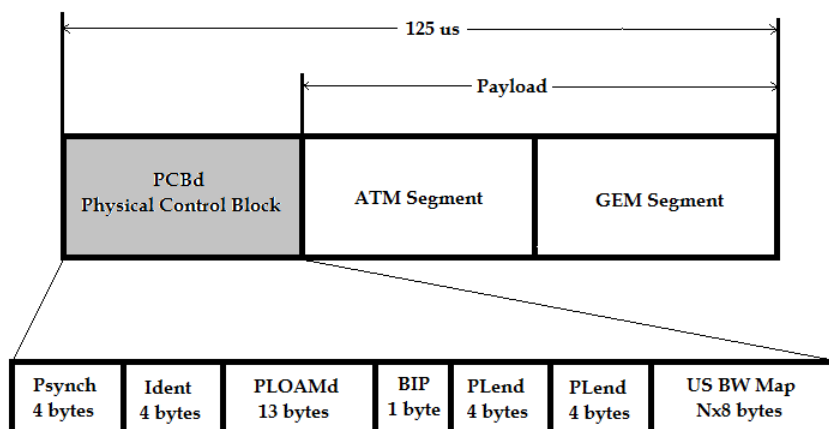


Figura 19: Estructura de una trama GPON

Al igual que las arquitecturas anteriores, APON y BPON, está estandarizada por la ITU [13]:

- G.984.1: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Características generales (3/2008),
- G.984.2: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Especificación de la capa dependiente de los medios físicos (2003).
- G.984.3: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Especificación de la capa de convergencia de transmisión (2004).
- G.984.4: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Especificación de la interfaz de control y gestión de la terminación de red óptica (2004).
- G.984.5: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Banda de ampliación (2007).
- G.984.6: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Extensión del alcance (2008).
- G.984.7: Redes ópticas pasivas con capacidad de Gigabits: Largo alcance.

Por otro lado tenemos una evolución o mejora de GPON, la denominada 10 Gbps PON ó XG-PON. Se trata de una tecnología que puede ofrecer unas velocidades enormes, tal y como indica su nombre, de 10 Gbps. Las características de la tecnología [12]:

- Establece unas tasas binarias de:
 - XG-PON1: Downstream: 10G, Upstream: 2.4G
 - XG-PON2: Downstream: 10G, Upstream: 10G
- La relación de división óptica es de 64.
- Al igual que todos los demás estándares se usa fibra monomodo estándar (SSMF, G.652)
- La longitud de la fibra entre el OLT y ONT no debe ser superior a los 20 km (y a 60 km con extensores).

Estándares [13]:

- G.987: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Definiciones, abreviaturas y siglas.
- G.987.1: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Requisitos generales.
- G.987.2: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Especificación de capa dependiente del medio físico (Physical media dependant, PMD).
- G.987.3: Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Especificaciones de la convergencia de transmisión (TC).

3.5 Comparación de las redes xPON

Tal y como se ha visto en los puntos anteriores, las redes ópticas pasivas han evolucionado en un tiempo muy corto, introduciendo cambios en sus respectivas tecnologías y a la vez que mejorándolas. No obstante algunas de ellas todavía siguen en fase de desarrollo, con el fin de introducir una mejora tecnológica estable en el campo de las telecomunicaciones. A continuación se muestra una tabla con las principales características de las redes xPON explicadas previamente (Tabla 1) [7] [9] [10] [12] [14].

CARACTERÍSTICAS	BPON	EPON	GPON
Estándar	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Velocidades de transmisión (Mbps)	Down: 155, 622, 1244 Up: 155, 622	Down: 1244 Up: 1244	Down: 1244, 2488 Up: 155, 622, 1244, 2488
Tipo de fibra	Monomodo estándar (ITU-T G.652)		
Número de fibras por ONT	1 ó 2	1	1 ó 2
Ratio de división óptica	1:32 (Puede aumentar a 1:64)	1:16 (permite 32)	1:128 (en la práctica 1:64)
Máxima longitud de fibra entre OLT y ONT	20 km	10 km	10-20 km
Modo de tráfico	ATM	Ethernet	ATM, Ethernet, TDM
Arquitectura de transmisión	Asimétrica, Simétrica	Simétrica	Asimétrica, Simétrica
OAM	PLOAM	Ethernet OAM	PLOAM
Seguridad	AES	No definida	AES
Eficiencia típica (Depende del servicio)	83% downstream 80% upstream	73% downstream 61% upstream	93% downstream 94% upstream

Tabla 1: Comparativa de las principales tecnologías PON

4. Ventajas e inconvenientes de las redes PON

Ya hemos visto todos los aspectos importantes de las redes PON: los elementos que las componen y su funcionamiento, las posibles topologías, las diversas arquitecturas (cada una con sus ventajas e inconvenientes) y el funcionamiento global de la propia red. ¿Pero porque resulta tan ventajoso el uso de este tipo de tecnología frente a otras? En el presente apartado se van a enumerar los pros y los contras de las redes ópticas pasivas, con el fin de ayudarnos a contestar a esta pregunta y enterarnos porque se utiliza en las redes FTTH.

4.1 Principales ventajas de las redes PON

El hecho de utilizar fibra óptica abre un enorme abanico de posibilidades de despliegue de las redes de telecomunicación, ya que se trata de un medio de transmisión que proporciona muchas ventajas a estas redes.

A continuación se enumeran las ventajas más relevantes de las redes ópticas pasivas:

- La utilización de tan solo elementos pasivos consigue abaratar de una manera muy considerable el coste del despliegue de la red. Por otra parte, también se consigue ahorrar en el mantenimiento de la red, ya que los elementos pasivos no requieren tanta atención como los activos, y al mismo tiempo son más baratos [1].
- La propia estructura PON, permite gestionar de manera eficiente el tráfico de la red gracias al uso de WDM (Multiplexación por División de Longitud de onda). Las señales de voz y datos viajan a través de la red en la longitud de onda de segunda ventana, mientras que las señales de vídeo lo hacen en tercera ventana. De este modo se evita la mezcla de las señales entre sí, y se facilita la difusión desde el OLT a los diferentes ONT [5] [6] [7].
- A todo esto se le debe de añadir el número de abonados a los que le proporciona un servicio. Hemos visto que con los años esta tecnología ha ido madurando y hoy en día existen arquitecturas de la misma que permiten ofrecer los servicios demandados por los usuarios, donde admiten longitudes de fibra de bastantes kilómetros y donde la división óptica ha mejorado considerablemente [9].

- También, cabe destacar el elevado ancho de banda permitido por los sistemas basados en arquitecturas PON, que puede alcanzar los 2,5 Gbps de tasa descendente para el usuario. Esto quiere decir que se trata de una tecnología capaz de proporcionar al usuario el servicio Triple Play (datos, telefonía y video). Por tanto, de acuerdo con las necesidades del usuario de hoy en día, es una justificación la utilización de redes PON [2] [6].
- Por último, es una tecnología que está en constante desarrollo al igual que otras. Sin embargo, PON es la que hemos visto que evoluciona de una manera más rápida y estable, y por ello es la tecnología que supone un soporte imprescindible para prestar servicios tales como video de alta definición (HD Video a 10 Mbps que está siendo implantado ahora) y servicios futuros. Es decir, es una tecnología flexible para futuras prestaciones.

4.2 Principales inconvenientes de las redes PON

A pesar de la gran cantidad de ventajas que poseen las redes PON intrínsecas a su configuración, también existen algunos inconvenientes derivados de la misma. Sin embargo, no llegan a ser lo suficientemente importantes como para evitar utilizar las redes PON como la mejor configuración posible para una red FTTH.

- Al igual que es una gran ventaja el uso de un divisor óptico para la distribución de la señal, también es un inconveniente. El hecho que un divisor distribuya la información procedente del OLT a todos los ONTs que se encuentran conectados a la misma etapa o árbol de distribución, provoca una reducción en la eficiencia de la red, la cual es menor que en un enlace punto-a-punto [5] [16].
- Es también importante recalcar el tema de la seguridad del sistema. La información que es transportada por la red fluye a través de un mismo canal físico, lo cual aumenta la probabilidad de escuchas. Esto disminuye la seguridad de la red, obligando, de esta manera, a establecer un alto nivel de encriptación [6] [7].

- Tampoco hay que olvidar que todos los abonados están conectados a un solo OLT. Una avería de este, supone una caída completa del sistema. Este problema se aborda duplicando los OLTs de cabecera, para que el sistema sea más fiable.
- Respecto de las pérdidas del sistema, sabemos que al utilizar fibra óptica, éstas son ridículamente bajas. Esto significa que, a priori, las distancias que se pueden abarcar son muy grandes. No obstante, la introducción del divisor óptico en el sistema para la distribución de la información, también introduce pérdidas. El número de etapas o puertos de salida del divisor es directamente proporcional con las pérdidas, es decir, a mayor número de usuarios, mayor es la atenuación del divisor. Esto se muestra en la Ecuación 1 de la página 15 [5].

Por tanto, a pesar de todos los inconvenientes citados anteriormente, las redes PON siguen siendo la mejor opción para FTTH, ya que el ahorro económico respecto a otras configuraciones es muy grande y la flexibilidad de la red acepta la conexión de multitud de usuarios con unas pérdidas aceptables.

Capítulo III - Cálculos y diseño de la red

En los dos capítulos anteriores se ha estudiado la composición, las características, los componentes y el futuro de las redes FTTH. A lo largo del presente capítulo, se describirá de una forma sencilla como se realiza el diseño de una red FTTH cualquiera, cumpliendo con los parámetros necesarios.

Para ello, primero se realizará un estudio de todos los cálculos necesarios y requerimientos básicos a la hora de diseñar la red. Estos requerimientos aparecen reflejados en el “Capítulo II - Redes PON” del presente proyecto.

Por tanto el capítulo se encuentra dividido en dos bloques claramente diferenciados: una primera sección dedicada a describir los parámetros típicos de los elementos usados, y una segunda sección dedicada a los cálculos necesarios para el diseño de una red FTTH.

1. Diseño de la red

Como ya sabemos, los elementos que componen la red FTTH son:

- OLT: es el que envía toda la información hacia los abonados a una longitud de onda determinada.
- ONT: situado en el hogar, recibe la señal que le llega y envía datos hacia el OLT.
- Divisor o splitter óptico: reparte la señal de manera adecuada para que las tramas de información lleguen a su correspondiente destinatario.
- Fibra óptica: el medio físico utilizado para el transporte de la señal.
- Conectores/empalmes: elementos que acoplan los tramos de fibra con otros elementos, incluyendo otros tramos de fibra.

Pues bien, todos ellos introducen pérdidas en la red. Dependiendo de nuestro diseño, los elementos van a estar estructurados de tal manera que van a producir más o menos pérdidas.

Para ayudar a comprender esto, se van a enumerar algunos parámetros típicos de los elementos utilizados.

1.1 Parámetros típicos

1.1.1 ONT y OLT

Como es de esperar, los elementos que contienen las características más importantes a la hora de realizar los cálculos son el OLT y el ONT, ya que ambos están dotados de un transmisor y un receptor. Además, poseen los mismos parámetros.

Los más evidentes, que ya han sido mencionados numerosas veces a lo largo del proyecto son: las longitudes de onda y las tasas binarias a las que funcionan los transmisores y receptores. En el capítulo anterior se ha explicado el funcionamiento del OLT y del ONT. Hemos visto que el transmisor del OLT funciona con dos longitudes de onda: 1490 nm, usada para transmisión de voz y datos, y 1550 nm, para la transmisión de vídeo. El ONT, por el contrario, utiliza una longitud de onda de 1310 nm para transmitir. Es evidente que los receptores de estos elementos deben funcionar de forma recíproca, es decir, los receptores deben funcionar a la misma longitud de onda con la que se está transmitiendo desde el otro extremo. Por otro lado, las tasas binarias son muy variadas dependiendo del estándar que se utilice, van desde los 155 Mbps hasta los 10 Gbps, aunque estos últimos todavía se encuentren en la fase experimental [10][17].

En lo que se refiere a la potencia, hay tres parámetros principales:

- La potencia transmitida: expresada normalmente en dBm. Obviamente, es un factor clave para que la transmisión pueda realizarse.
- La potencia máxima de entrada: es la potencia que es capaz de soportar el receptor.
- La sensibilidad: un factor a menudo olvidado en el diseño de redes de comunicaciones. Es un umbral que fija cual debe ser la potencia mínima recibida para poder ser detectada [14].

Otros parámetros que se pueden destacar [12]:

- Tiempo de subida: expresado en picosegundos. Es el tiempo que va a permitir hacer el cálculo de la capacidad del sistema, el balance de tiempos, que veremos más adelante.
- RIN: ruido relativo de intensidad insertado por los láseres transmisores. Está expresado en dB/Hz.
- Ancho espectral de la fuente: que viene en nanómetros.

- Relación de extinción: relación entre la potencia para "0" lógico respecto al "1" lógico.
- Dispersión cromática: cada componente espectral viaja con una velocidad distinta en el interior de la fibra. Las unidades son ps/(nm*km).

1.1.2 Otros elementos

Se trata de los demás elementos que componen la red: divisor, fibra, empalmes y conectores. Estos componentes no tienen tantas características relevantes para los cálculos, pero igualmente introducen pérdidas.

Los empalmes y los conectores son probablemente los que menos pérdida puedan generar. Éstos típicamente oscilan entre 0.05 y 0.5 dB cada uno [12]. Los conectores se usan para interconectar los componentes de la red (OLT, divisor, ONT) con la fibra óptica. Los empalmes, sin embargo, son usados para unir dos fibras ópticas cuando éstas son demasiado cortas para enlazar dos elementos.

La fibra óptica utilizada en FTTH es la fibra monomodo estándar (SSMF, G.652) [4]. Ya sabemos que es el mejor medio de transmisión para largas distancias, por la baja atenuación que tiene. A continuación se muestran las atenuaciones de la fibra para las longitudes de onda que nos interesan para nuestra red [20]:

- 1310 nm: 0.35 dB/km
- 1490 nm: 0.24 dB/km
- 1550 nm: 0.19 dB/km

Por último, veamos el divisor. Es el elemento clave de la red, que permite optimizar la transmisión de datos. No obstante, también es el que más pérdidas introduce, ya que éstas son directamente proporcionales a su número de salidas, tal y como hemos visto en el capítulo anterior (Ecuación 1 de la Página 15).

A parte de eso, cada divisor posee unas pérdidas por exceso, que suelen ser en torno a 1 dB. Esto quiere decir que si nuestro diseño es para un número elevado de usuarios o la posición geográfica de éstos no nos favorece, y debemos usar tres etapas de divisores, tan solo con el exceso en los divisores perdemos la mitad de nuestra potencia.

A parte de los componentes, existen algunos parámetros ajenos a éstos, como es el caso del margen de seguridad. Es un factor que tiene en cuenta imprevistos y degradaciones (mayores pérdidas por envejecimiento, mayores pérdidas en

conectores, etc.). Viene estandarizado por la recomendación ITU G.957 en la cual se define que su valor oscila entre los 3 y los 4.8 dB [12].

1.2 Cálculos

Una vez explicados los parámetros necesarios para el diseño, a continuación se describen los cálculos pertinentes para comprobar la viabilidad de nuestro diseño.

Para evaluar una red FTTH, y cualquier red óptica en general, se deben de realizar principalmente dos cálculos: el balance de potencias y el balance de tiempos.

1.2.1 Balance de potencias

Este es el primero de los dos cálculos que debemos realizar. Consiste, básicamente, en calcular la potencia que le llega al receptor al atravesar toda la red óptica. El valor obtenido debe ser comparado con la sensibilidad del receptor, ya que si la potencia que se recibe es inferior a la sensibilidad, la señal no podrá ser detectada.

Al tratarse de un sistema bidireccional, este cálculo debe realizarse en ambos sentidos, tanto descendente como ascendente. Cabe destacar, que el enlace ascendente es algo más delicado que el descendente, ya que el transmisor del ONT emite con mucha menos potencia que el OLT. Es por ello, por lo que éste último debe tener un receptor con una sensibilidad suficientemente baja [5] [21].

El balance se obtiene a partir de la siguiente fórmula [12]:

$$P_t - L_c - M_s \geq P_r$$

Ecuación 2: Balance de potencias

donde P_r es la potencia recibida mínima (sensibilidad), P_t es la potencia transmitida, L_c son las pérdidas del enlace y M_s es el margen de seguridad.

Se puede observar, que tres de los cuatro valores que están presentes en la fórmula conocidos, sin embargo, las pérdidas del enlace deben ser calculadas por el ingeniero.

Las pérdidas ópticas totales incluyen [12] [20]:

- Pérdidas de propagación en la fibra óptica.

- Pérdidas de distribución, introducidas por la división de la señal en el splitter.
- Pérdidas de exceso de los divisores.
- Penalizaciones de potencia.
- Pérdidas por conectores y empalmes.

Todos estos tipos de pérdidas ya han sido explicados a lo largo del presente proyecto salvo uno: las penalizaciones de potencia.

Se trata de unas pérdidas que se introducen en nuestro enlace debido a los transmisores utilizados o el propio canal. Suelen ser bastante bajas, su valor ronda 1 dB y es más bajo en el sentido ascendente, lo que se explicará más adelante.

Las penalizaciones de potencia más significativas para redes FTTH son tres [12]:

- Penalización por relación de extinción no nula:

$$P_{ER} = -10 \log_{10} \left(\frac{r_e - 1}{r_e + 1} \right)$$

Ecuación 3: Penalización por relación de extinción no nula

donde r_e es la relación de extinción (parámetro explicado en el punto anterior).

- Penalización por ruido de intensidad:
 - Es una degradación causada por el ruido relativo de intensidad (RIN) del láser.

$$P_{RIN} = -10 \log_{10} (1 - (RIN \cdot \Delta f_{eq}) q^2)$$

Ecuación 4: Penalización por ruido de intensidad

- Donde RIN es el ruido de intensidad de la fuente (dB/Hz), Δf_{eq} es el ancho de banda equivalente del receptor (Hz) y q es el BER (Bit Error Ratio).
- Penalización por dispersión cromática [12] [20]:
 - Una degradación de la señal debido a que las componentes que viajan por dentro de la fibra, lo hacen a distintas velocidades y la señal sufre una expansión o una compresión temporal. La fórmula general es la siguiente:

$$P_{CD} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)$$

Ecuación 5: Penalización por dispersión cromática

donde σ es el ancho temporal del pulso a una distancia L , y σ_o es el ancho temporal del pulso inicial.

- Este cálculo puede variar dependiendo de la fuente utilizada:

$$V = 2\sigma_w\sigma_o \qquad \sigma_w = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda \qquad \sigma_o = \frac{1}{4B}$$

Ecuación 6: Relaciones matemáticas para averiguar la anchura de la fuente

donde V es la relación entre el ancho espectral de fuente óptica sin modular (σ_w) y el ancho temporal del pulso inicial (σ_o), y $\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente en longitud de onda.

- Fuentes espectralmente anchas ($V \gg 1$):

$$P_{CD} = -5 \log_{10} (1 - (4BLD\Delta\lambda)^2)$$

Ecuación 7: Primera aproximación de la penalización por dispersión cromática

donde B es la tasa binaria (Gbps), L es la longitud del tramo de la fibra (km), D es la dispersión cromática ($\frac{ps}{nm \cdot km}$) y $\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente (nm)

- Fuentes espectralmente estrechas ($V \ll 1$):

$$P_{CD} = 5 \log_{10} [(1 + 8C\beta_2 B^2 L)^2 + (8\beta_2 B^2 L)^2]$$

Ecuación 8: Segunda aproximación de la penalización por dispersión cromática

donde C es el chirp, β_2 es el parámetro de dispersión, B es la tasa binaria (Gbps), L es la longitud del tramo de la fibra (km).

$$\beta_2 = -\frac{D \cdot \lambda^2}{2\pi c} [20]$$

Tal y como se ha indicado antes, la penalización en el caso del enlace ascendente va a ser algo menor que en el descendente, ya que el valor de la dispersión cromática del ONT es prácticamente despreciable.

A pesar de emitir con menor potencia, el upstream es perfectamente realizable, ya que sus pérdidas son mucho menores que en downstream, debido al divisor. Sus pérdidas son directamente proporcionales a sus salidas, mientras que para el envío de datos del usuario tan solo se dispone de una única salida (salvo en casos de usar divisores de 2x2).

1.2.2 Balance de tiempos

El segundo cálculo, no menos importante, permite determinar la capacidad del enlace óptico. En este caso no son necesarias ninguna de las características del

divisor, que causan tanta pérdida de potencia. También es menos complejo, tan solo hace falta una operación, el tiempo de subida del enlace [20]:

$$T_r = \sqrt{T_{tx}^2 + T_{MOD}^2 + T_{CD}^2 + T_{PMD}^2 + T_{rx}^2}$$

Ecuación 9: Balance de tiempos

donde T_{tx} es el tiempo de subida del transmisor, T_{MOD} es el tiempo subida de la dispersión modal de fibra multimodo, T_{CD} es el tiempo de subida de la dispersión cromática, T_{PMD} es el tiempo de subida de la PMD y T_{rx} es le tiempo de subida del receptor.

$$T_{CD} \approx |D|L\Delta\lambda \qquad T_{MOD} = \frac{440L}{B_{mod}} \qquad T_{PMD} = PMD\sqrt{L}$$

Ecuación 10: Relaciones matemáticas de la dispersión cromática, la dispersión modal y la PMD

donde D es la dispersión cromática ($\frac{ps}{nm \cdot km}$), L es la longitud de la fibra (km), $\Delta\lambda$ es el ancho de línea de la fuente (nm), B_{mod} es el ancho de banda de la dispersión modal (MHz·km) y PMD es la dispersión por polarización (ps/\sqrt{km}).

Es evidente que el tiempo de subida de la dispersión modal va a ser cero, ya que siempre utilizamos fibra monomodo. Además, en enlaces cortos como los usados en FTTH, el tiempo de subida por PMD es despreciable [12].

1.2.3 Criterios de viabilidad

Después de haber obtenido todos los parámetros de los cálculos anteriores, se debe comprobar si la red que se está diseñando va a poder funcionar de forma correcta.

Para el balance de tiempos existe un criterio general que sirve para cualquier red óptica, dependiendo de la codificación utilizada [20]:

$$T_r \leq \begin{cases} \frac{0.35}{B}, & \text{para RZ} \\ \frac{0.7}{B}, & \text{para NRZ} \end{cases}$$

donde B es el ancho de banda del canal.

Para redes FTTH nos tenemos que fijar en el caso de abajo, ya que tanto BPON y GPON como EPON utilizan NRZ [12].

Capítulo III - Cálculos y diseño de la red

Para el balance de potencias hay más criterios a los que tendremos que atender [5]:

- La potencia recibida debe de ser adecuada para el receptor, es decir, no debe exceder la máxima permitida ni ser inferior a la sensibilidad.
- Dependiendo del estándar utilizado, se definen unos rangos de pérdidas. Existen dos rangos distintos: el primero, definido por ITU-T (G.982) para BPON y GPON (Tabla 2) [18], y el segundo, para EPON, el cual basa sus rangos en las longitudes de la fibra (Tabla 3) [12].

BPON/GPON	
Clase A	5 - 20 dB
Clase B	10 - 25 dB
Clase C	15 - 30 dB

Tabla 2: Clases definidas en G.982 para BPON y GPON

EPON		
Upstream	10 km	5 - 20 dB
	20 km	10 - 24 dB
Downstream	10 km	5 - 19.5 dB
	20 km	10 - 23.5 dB

Tabla 3: Valores definidos para EPON

Por lo tanto, las pérdidas del enlace deben estar comprendidas entre los valores mostrados en las tablas.

Capítulo IV – Diseño e implementación del programa

El presente capítulo tiene como finalidad aplicar todos los métodos de diseño de una red FTTH, detallados en capítulos anteriores, para la implementación de un programa en MatLab para facilitar el diseño de estas redes.

El programa consistirá en ayudar a realizar el diseño de una red FTTH de una manera sencilla y gráfica. El usuario deberá configurar la distribución de las viviendas de la manera que desee y los valores de los componentes (algunos de ellos configurados por el propio programa), para que la aplicación efectúe todos los cálculos pertinentes e indique si el diseño es viable o no.

Por tanto, en el presente capítulo se va a describir el funcionamiento del programa y se van a destacar algunos detalles de cada una de sus partes, adjuntas en el Anexo.

1. Descripción de la aplicación

Para el desarrollo de la presente aplicación se ha decidido utilizar MatLab, un software matemático comúnmente utilizado en el ámbito académico, pues ofrece multitud de herramientas y funciones pre programadas útiles para desarrollo de proyectos de ingeniería.

Para generar elementos gráficos que intervienen en el presente programa, generalmente se ha utilizado la siguiente función:

```
uicontrol(...)
```

Los elementos gráficos que permite invocar esta función:

- 'checkbox': genera una acción cuando es seleccionado.
- 'edit': campo de texto editable habilitado para introducir o modificar texto.
- 'frame': etiquetas rectangulares que contienen y separan elementos de la figura.
- 'pushbutton': genera una acción cuando es pulsado.

- 'radiobutton': similar a 'checkbox', genera una acción cuando es activado.

A continuación se hará una breve descripción del funcionamiento general de la aplicación.

Como hemos visto, las redes FTTH, al ser redes ópticas, son de gran capacidad y por tanto admiten gran número de usuarios. Debido a esto, lo primero que hará la aplicación es permitir configurar la distribución de las viviendas a las que se pretende dar servicio.

Una vez escogida la distribución y la cantidad de viviendas, el programa mostrará una ventana con información sobre los divisores, en la cual el usuario podrá ver el número de etapas de divisores, así como las salidas de cada uno de ellos.

Finalmente, en la última ventana el usuario deberá rellenar todos los valores necesarios de los elementos para que la aplicación pueda realizar todos los cálculos explicados en el capítulo anterior. Al haber efectuado los cálculos, el programa indicará si la red que se ha diseñado es viable o no. En el caso de no serlo, se mostraría el motivo por el cual no es posible realizar el enlace y en cuál de los enlaces está el problema.

Con el fin de facilitar el proceso, se han añadido botones de ayuda a algunas partes del programa donde se ha considerado oportuno. Al pulsar estos botones, se muestran ventanas en las cuales se explican los campos menos evidentes o algunos datos sobre esa parte de la aplicación.

2. Funcionamiento de la aplicación

En esta parte del capítulo se va a intentar describir cada parte de la aplicación, con el fin de facilitar su uso.

El programa está estructurado de la siguiente manera:

- Elección de la distribución de las viviendas.
- Configuración de los parámetros de las viviendas.
- Configuración de los divisores.
- Configuración de los parámetros de los elementos de la red.
- Cálculos.

A continuación se va a detallar cada una de las partes expuestas anteriormente.

2.1 Distribución de las viviendas

En esta primera parte del programa el usuario tan solo deberá escoger entre las dos distribuciones posibles de las viviendas (Figura 20):

- Residencias individuales o chalets.
- Residencias multifamiliares o bloques de pisos.

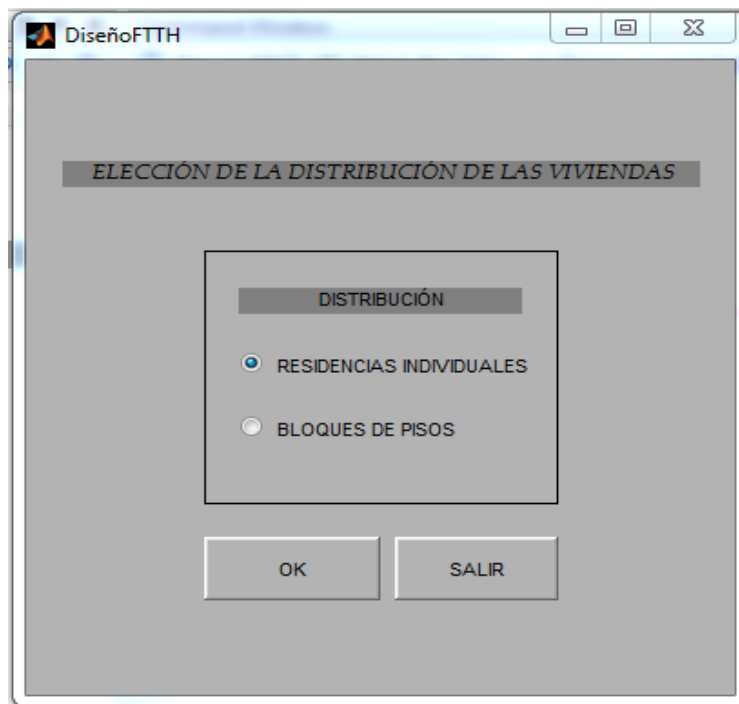


Figura 20: Elección del tipo de viviendas

El código de esta parte de la aplicación se encuentra en el archivo `distribución.m` del Anexo.

2.2 Parámetros de la urbanización

Si en el panel anterior la elección ha sido residencias individuales, la aplicación abre la siguiente ventana (Figura 21):

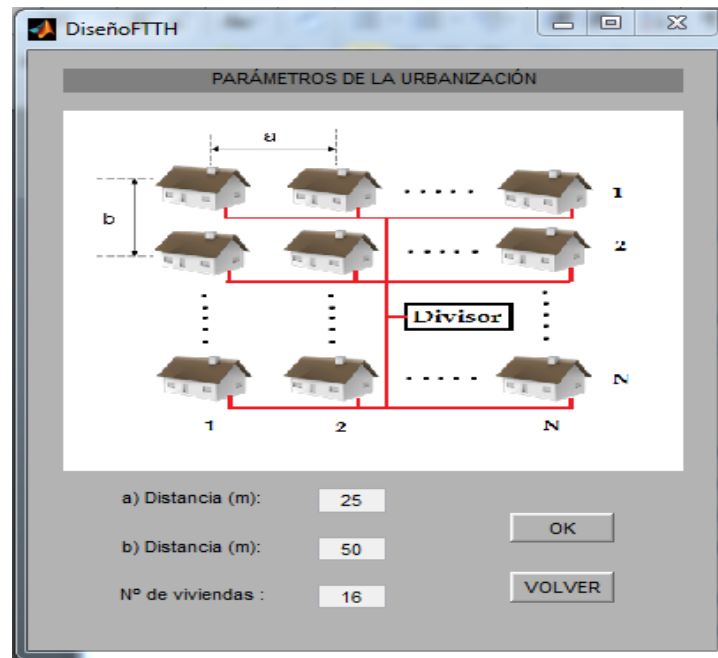


Figura 2114: Parámetros de la urbanización

Aquí el usuario debe introducir algunos datos sobre la posición de las casas dentro de la urbanización, así como el propio número de viviendas esta. A partir de estos datos, se calcula la longitud del tramo de la fibra óptica necesaria para llegar al hogar que se encuentre más alejado del divisor.

En esta parte del programa se generan una serie de variables que van a tener que ser utilizadas en funciones posteriores.

```
global variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv pr  
seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3
```

- `distr`: esta variable identifica cuál de las dos distribuciones posibles es la que se está utilizando. Para el caso de urbanización toma el valor de "0".
- `n`: almacena el número de plantas de la vivienda.
- `v`: almacena el número de viviendas por planta
- `e`: almacena el número de edificios.
- `tramo`: guarda la longitud del tramo de fibra hasta el abonado más lejano del splitter
- `info_div`: indica la cantidad de etapas de divisores.
- `pr seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3`: todas estas variables guardarán información de funciones posteriores, simplemente son inicializadas en esta para tener solo una variable global para todo el programa.

Capítulo IV – Diseño e implementación del programa

Las variables n y v no tienen mucho sentido en esta función, ya que ambos valen "1" al ser viviendas unifamiliares. Se trata de variables que serán útiles para el caso de edificios. Pero, como ya se ha dicho antes, se hace por convenio, para solo utilizar una única variable en todo el programa.

A continuación, todas las variables son guardadas en un archivo llamado `variables.mat`, que se genera en la misma carpeta del programa:

```
save variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv pr  
seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3;
```

El código fuente de esta parte se puede encontrar en el archivo `parametros_urbanizacion.m` del Anexo.

2.3 Parámetros del edificio

Se invoca esta función si el usuario ha decidido trabajar con viviendas multifamiliares, es decir, edificios (Figura 22).

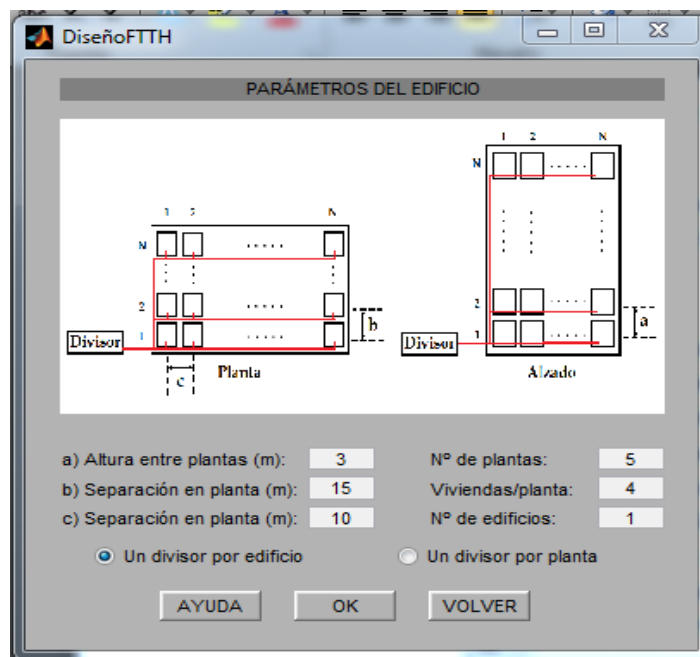


Figura 22: Parámetros de los edificios

Al igual que en la función de la urbanización, en esta el usuario también debe rellenar los campos que contienen información sobre las viviendas. Como se puede observar en la imagen, existen algunas diferencias respecto a la pantalla anterior. Aquí se ha añadido una opción nueva: se ofrece al usuario la posibilidad de elegir si poner un divisor por cada edificio o también añadir otros, situados en cada planta de los edificios. Por si surge alguna duda sobre este punto a lo largo del diseño, se ha añadido un botón de ayuda que hace saltar una ventana en la cual se hace una breve explicación (Figura 23).

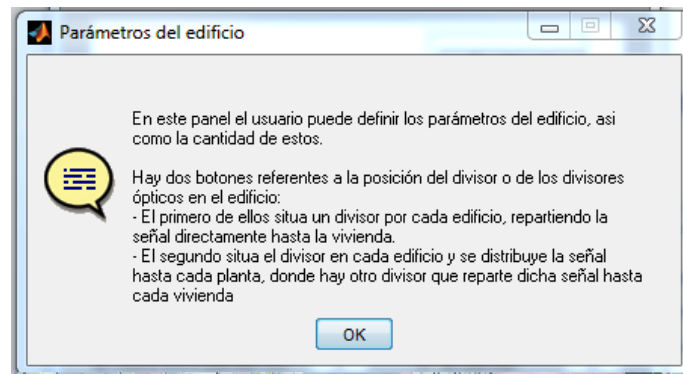


Figura 23: Ventana de ayuda de los edificios

Al igual que en el caso de la urbanización, se van a generar unas variables que contendrán la información sobre la distribución. Cabe destacar, que estas variables solo van a ser generadas en una de las funciones, pues el programa puede pasar tan solo por una de las distribuciones, o la urbanización o bien los edificios. No obstante se tratará exactamente de las mismas variables que las de la función descrita anteriormente.

En la presente función cambian los valores de las variables n y v , y toman directamente los valores introducidos por el usuario.

El código de los parámetros de los edificios se encuentra en la función `parametros_edificio.m` del Anexo.

2.4 Configuración de los divisores

Una vez hayamos acabado con la distribución de las viviendas, debemos configurar los divisores. Cualquiera de las dos funciones anteriores nos lleva a ésta.

El siguiente paso es que el programa recoja el número de los abonados o viviendas a los que se intenta prestar servicio y los transforme de la manera

adecuada. Es decir, de la información introducida por el usuario, debe calcular el número de salidas que van a tener los divisores y las etapas de división que van a hacer falta (Figura 24).

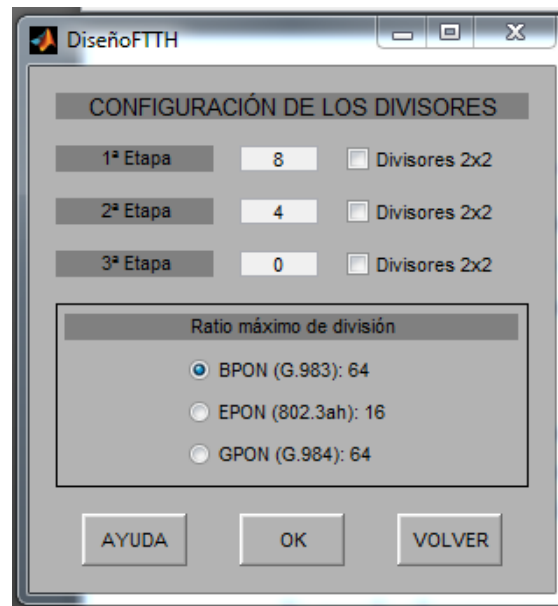


Figura 24: Configuración de los divisores.

Los valores que se muestran por pantalla, son los calculados por el programa. Lo que hace la aplicación es transformar el número de las viviendas en el número de salidas de los divisores (éstos valores siempre deben ser de potencia de dos).

Se puede observar que son mostrados en un campo editable, con el fin de que si los valores que obtiene la aplicación no son del agrado del usuario (o si se diera el caso de que no son correctos), éste pueda modificarlos. Para ello, el usuario dispone de un esquema que muestra el ratio máximo de división según el estándar que se use (el cual se deberá indicar para que el programa compruebe si los resultados son correctos), y además de un botón de ayuda, que explica esta parte del programa (Figura 25):

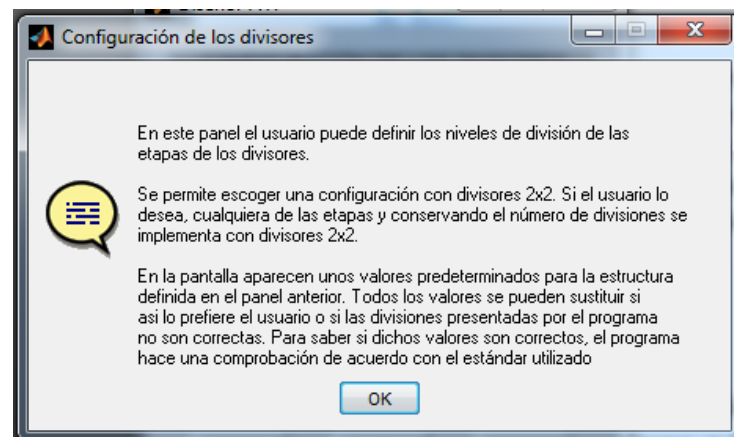


Figura 25: Ayuda de la configuración de los divisores

También, se ofrece la posibilidad de elegir utilizar divisores 2x2 (dos entradas y dos salidas) en lugar de los convencionales 1:N. Esto se puede hacer en cualquiera de las etapas, y simplemente consistirá en sustituir el divisor escogido por un conjunto de divisores 2x2. Es decir, en vez de usar un divisor 1:8, se implementa con un conjunto de $\{2 \times 2\} + \{2 \times 2 + 2 \times 2\} + \{2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2\}$ divisores. Este tipo de configuraciones tienen un gran inconveniente, y es que las pérdidas de los divisores son simétricas: son las mismas tanto para el downstream como para el upstream en esa parte de la red. El problema reside en el enlace ascendente, ya que esto supone una gran pérdida de potencia transmitida por el ONT, la cual es bastante baja.

El código de esta parte del proyecto se encuentra en la función `configuracion_divisores.m` del Anexo.

2.5 Configuración de los elementos

Este es el panel final que se va a aparecer al usuario. Su función es mostrar los resultados obtenidos tras recoger los datos introducidos por el usuario (Figura 26).

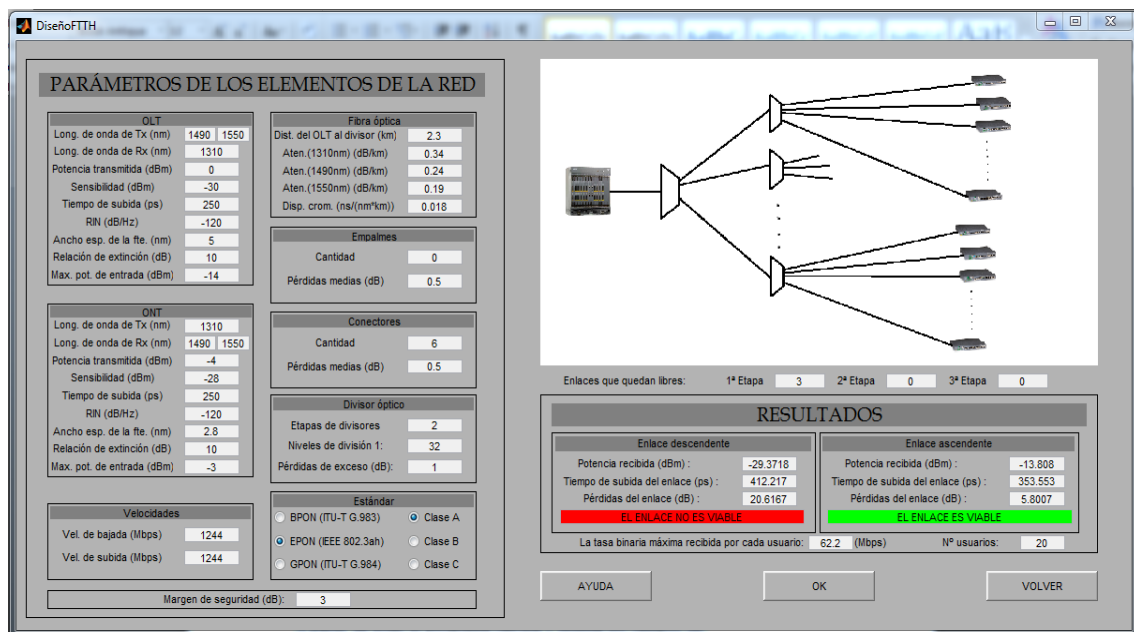


Figura 26: Configuración de los elementos de la red y los resultados

Esta parte está dividida principalmente en dos bloques: el bloque de la izquierda, donde el usuario introduce los valores de cada uno de los elementos, y el bloque de la derecha, en el cual se muestran los resultados del diseño.

Capítulo IV – Diseño e implementación del programa

El primer bloque, el de los datos, viene con los campos ya rellenos con algunos valores típicos y con datos cargados desde la variable global que se está utilizando a lo largo de todo el programa, la cual ya contiene valores de las configuraciones anteriores.

Primero el programa carga las variables globales y se rellenan los campos pertinentes:

```
load variables
```

A partir de éstas el programa calcula y rellena los campos de:

- Divisor óptico: las etapas de divisores y los niveles de división totales (se obtienen simplemente de multiplicar las salidas de cada etapa de división).
- Se calcula el número de conectores que se van a necesitar (son dos conectores por cada etapa de divisores, uno en el transmisor y otro en el receptor).
- En el campo de la longitud de la fibra óptica el usuario introducirá la distancia entre el OLT y el divisor, y a ésta se le sumará la longitud del tramo entre el divisor y el usuario más lejano (calculada anteriormente).
- Las tasas binarias junto con el estándar utilizado.

El segundo bloque es el que mostrará los resultados de la evaluación de la red:

- Se muestra un croquis para que el usuario pueda comprobar de manera gráfica si la distribución es la correcta. Para ello se utiliza la función `dibujar.m` adjunta en el Anexo.
- Justo debajo se muestran los enlaces que quedan libres en cada una de las etapas. Es importante recordar que se trata de enlaces por divisor. También se muestra la tasa binaria recibida por cada uno de los abonados, así como el número total de estos.
- En el apartado de resultados se muestran los valores obtenidos de las pérdidas, el balance de tiempos y el balance de potencias. También se nos indica si la red, con estos resultados, funcionaría correctamente. En el caso negativo, se mostraría el motivo. En el campo de las pérdidas del enlace se muestran tan solo las pérdidas de los elementos, sin incluir las penalizaciones de potencia. No obstante éstas si se tienen en cuenta para evaluar la viabilidad de la red.

Al efectuar los cálculos, el programa hará algunas comprobaciones de acuerdo con lo especificado en los estándares (Capítulos II y III):

- La longitud del tramo de la fibra óptica.
- Las divisiones máximas permitidas.
- Tasa binaria.

En el caso de existir algún dato erróneo, la aplicación lo indicará mediante una ventana de aviso, mostrando siempre cual es el inconveniente.

Como la cantidad de parámetros a rellenar es elevada, se dispone de un botón de ayuda que hace saltar una ventana con la información pertinente sobre las características de los elementos.

El código de esta función aparece en `principal.m` del Anexo.

2.6 Cálculos

Se trata de un conjunto de funciones que son llamadas desde `principal.m` (configuración de los elementos). Realizan los siguientes cálculos:

- Penalizaciones de potencia.
- Pérdidas del enlace.
- Balance de potencias.
- Balance de tiempos.

Todas ellas aparecen en el Anexo: `calculo_balance_potencias.m`, `calculo_balance_tiempos.m`, `calculo_penalizacion.m`, `calculo_perdidas.m`.

En el cálculo de las penalizaciones en potencia, más concretamente en la penalización por ruido de intensidad (Ecuación 4), era necesario calcular el valor de q que depende del BER (Bit Error Ratio), especificado en los estándares (Tabla 4) [12].

Estándar	BER
BPON	10^{-10}
EPON	10^{-12}
GPON	10^{-10}

Tabla 4: Valores del BER para distintos estándares

Existen una serie de valores aproximados de q para diferentes valores del BER, pero en nuestro caso se ha optado directamente por calcularlo, ya que MatLab dispone de las funciones necesarias.

$$BER = \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{q}{\sqrt{2}}\right)}{2}$$

Su cálculo en MatLab ha quedado de la siguiente manera:

```
q=erfcinv(BER/0.5)*sqrt(2);
```


Capítulo V – Conclusiones

A lo largo del proyecto, se han llevado a cabo dos líneas de actuación generales cuyo desarrollo ha dado como resultado un conocimiento detallados de una red FTTH, siendo éstas:

- Estudio teórico del funcionamiento de las redes ópticas.
- Diseño de una red FTTH.
- Estudio de la viabilidad del diseño.

El estudio teórico de los fundamentos de las redes ópticas se considera imprescindible para comprender de forma precisa las redes FTTH, así como necesario para poder realizar un diseño concreto de la red óptica pasivas sobre la que se construyen este tipo de redes.

Así pues, se ha detallado el funcionamiento de los principales elementos ópticos pasivos que intervienen en el diseño de las redes FTTH, tales como: tipos de fibras ópticas, empalmes, conectores y divisores ópticos. Esto ha permitido concretar los fundamentos de la tecnología óptica, con sus respectivas ventajas e inconvenientes.

Una vez conocidas la estructura y las características de estas redes, incluidas las limitaciones de las mismas y los elementos tanto activos como pasivos necesarios para la implementación de la red, se ha realizado una presentación general del objetivo del presente proyecto. Éste no es otro que implementar un programa, utilizando el entorno MatLab, con el fin de facilitar el diseño de las redes FTTH.

Así pues, fue necesario el estudio de los fundamentos físicos de la tecnología óptica, que detallaban y especificaban las teorías de transmisión a través de estos medios de transmisión. Esto fue absolutamente necesario para el correcto manejo de los cálculos imprescindibles para el diseño de la red.

Las funciones que debía realizar la aplicación:

- Permitir al usuario configurar de una manera sencilla y gráfica la distribución de las viviendas a las que se pretende prestar servicio.
- Realizar, de forma transparente al usuario, los cálculos referidos a la distribución de la señal hasta el abonado: etapas de división, salidas de cada uno de los divisores, longitud de la fibra desde el divisor hasta el hogar, etc.
- Permitir al usuario configurar cada uno de los elementos utilizados en la red.
- Hacer los cálculos necesarios para comprobar la eficacia del diseño y presentarlos al usuario.

En el proceso del diseño del programa se han tenido en cuenta dos consideraciones importantes. La primera de ellas es conseguir que el usuario pueda realizar el diseño de la red de forma más intuitiva posible, encargándose en todo momento el propio programa de realizar las configuraciones de manera más óptima. La segunda, es la posibilidad que se le brinda al usuario de poder cambiar las configuraciones hechas por la aplicación en cualquier momento.

El diseño no sólo contempla las configuraciones de distribución de los abonados, sino también los elementos ópticos usados en el sistema, tales como transmisores, receptores, fibras ópticas, divisores, empalmes y conectores. Todo con el fin de garantizar una buena calidad de servicio y optimizar nuestros recursos.

Al obtener los datos necesarios, el programa tiene en cuenta todos los cálculos para valorar la viabilidad física la red. Primero se realiza el balance de potencias, para el cual la aplicación extrae todo tipo de pérdidas existentes en la red, pérdidas de transmisión por fibra óptica, pérdidas por conectores/empalmes, penalizaciones de potencia, etc. En segundo lugar, se obtiene el balance de tiempos, que indicará si el enlace tiene una capacidad adecuada. Todo esto, evidentemente, se hace para ambos canales, tanto ascendente como descendente, siempre teniendo en cuenta las modificaciones a realizar para cada uno de ellos.

Al obtener los balances de la red, haciendo comparaciones necesarias y siempre teniendo en cuenta el estándar utilizado, el programa indica su viabilidad. En los casos en los cuales no se cumpla, la aplicación siempre dirá cuál ha sido el motivo, para facilitar la terea al usuario.

Capítulo V - Conclusiones

Con este proyecto, se ha podido comprobar que el avance tecnológico de las redes ópticas es cada vez mayor, y cada vez son más las empresas que se atreven y se lanzan a este terreno para poder seguir con su progreso. Los cálculos y las consideraciones teóricas a la hora del diseño no son nada complejos en comparación con el despliegue de la red, pero siempre viene bien tener un software a mano que pueda facilitar las cosas a los ingenieros.

Anexo

El presente anexo reúne todas las funciones utilizadas en el desarrollo de la aplicación.

➤ calculo_balance_potencias.m:

```
function Prx = calculo_balance_potencias(Pt,Lc,Ms);

% Funcion que devuelve la potencia que se recibe para ser comparada
% con la
% sensibilidad
% La condición del balance es  $Pr \leq Pt-Lc-Ms$ 
%  $Prx = \text{calculo\_balance\_potencias}(Pt,Lc,Ms)$ 
% Pr: potencia recibida mínima
% Pt: potencia transmitida
% Lc: las pérdidas totales del enlace
% Ms: margen de seguridad

Prx=Pt-Lc-Ms;
```

➤ calculo_balance_tiempos.m:

```
function Tr = calculo_balance_tiempos(D,L,AL,Ttx,Trx)

% Función que devuelve el tiempo de subida del enlace
% Criterio general  $Tr \leq 0.35/B$ , para RZ
%  $Tr \leq 0.7/B$ , para NRZ
%  $Tr = \text{calculo\_balance\_tiempos}()$ 
% Tr: tiempo de subida del enlace
% Ttx: tiempo de subuda del transmisor
% D: dispersión cromática (ps/(nm*km))
% AL: ancho de línea de la fuente (nm)
% L: la longitud de la fibra (km)
% Trx: tiempo de subida del receptor

% Tiempo de subida por dispersión cromática
Tcd = abs(D)*L*AL*10^3;

Tr = sqrt((Ttx^2)+(Tcd^2)+(Trx^2));
```

➤ calculo_penalizacion.m:

```
function P = calculo_penalizacion(Re,RIN,BER,B,L,D,AL,C,lambda)

% La función devuelve las pérdidas por penalización
%  $P = \text{penalización}(Re,RIN,BER,B,L,D,AL,C,\beta,\lambda)$ 
% Re: relación de extinción
% RIN: ruido relativo de intensidad del láser
% BER: bit error ratio
```

Anexo

```
% B: tasa binaria (Gbps)
% L: longitud de la fibra (km)
% D: dispersión (ns/nm*km)
% AL: ancho espectral de la fuente (nm)
% C: chirp
% lambda: longitud de onda del transmisor (nm)

% Penalización por relación de extinción no nula
Per = -10*log10((Re-1)/(Re+1));
% Penalización por ruido de intensidad
q=erfcinv(BER/0.5)*sqrt(2);
Prin = -10*log10(1-(((10^(RIN/10)) * ((B*10^9)/2)) * (q^2))));
% Penalización por dispersión cromática
sigma_w=(2*pi*(3*(10^5))*AL)/(lambda^2);
sigma_o=1/(4*B*10^-3);
V=2*sigma_w*sigma_o;
beta=((D*(10^3)*(lambda^2))/(2*pi*(3*10^5)));
Pcd = 0;
if V > 1 % Para fuentes espectralmente anchas
    Pcd = -5*log10(1-(4*B*L*D*AL)^2);
elseif V < 1 % Para fuentes espectralmente estrechas
    Pcd = 5*log10(((1+8*C*beta*(B^2)*L)^2)+((8*beta*(B^2)*L)^2));
end
P = Per + Prin + Pcd;
```

➤ calculo_perdidas.m:

```
function Lc = calculo_perdidas(N,E,A,D,Lc,Nc,Le,Ne,P);

%La función devuelve las pérdidas totales del enlace
%Lc = perdidas(N,A,L,E,Lc,Le,P)
% Lc: pérdidas del enlace (dB)
% N: número de salidas del divisor
% E: exceso en los divisores (dB)
% A: atenuación de la fibra (dB/km)
% D: longitud de la fibra (km)
% Lc: pérdidas por conector (dB)
% Nc: número de conectores
% Le: pérdidas por empalme (dB)
% Ne: número de empalmes
% P: penalización de potencia (dB)

perdidas_por_distribucion=10*log10(N)+E;
perdidas_de_la_fibra=A*D;
perdidas_de_conectores=Lc*Nc;
perdidas_de_los_empalmes=Le*Ne;
Lc=perdidas_por_distribucion+perdidas_de_la_fibra+perdidas_de_conector
es+perdidas_de_los_empalmes+P;
```

➤ configuracion_divisores.m:

```
function configuracion_divisores(valor);

% falta unba condicion cuando hay un divisor por planta

if nargin<1,
    valor= 'comienzo';
end
```

```

global DATOS % Variable global que recoge los valores de los
controles.
load variables
e1=1;e2=0;e3=0;

if strcmp(valor,'comienzo'),

    if distr==1,
        % Estos son los cálculos de la distribución de edificios
        if info_div==1,
            if e>1,
                e1=e;e2=n*v;e3=0;
            elseif e==1,
                e1=n*v;e2=0;e3=0;
            end
        elseif info_div==2,
            if e>1,
                e1=e;e2=n;e3=v;
            elseif e==1,
                e1=n;e2=v;
            end
        end
    elseif distr==0,
        % Estos son los cálculos de la distribución de la urbanización
        if e>16
            e1=e/16-mod(e/16,1)+1;
            e2=16;
        else
            e1=e;
        end
    end
    etapas=[e1 e2 e3];
    i=1;
    % Este código hace la transformación de las salidas de un
    % divisor en un valor que esta en base 2
    %=====
    while i<4
        if etapas(i)~=0
            if mod(log2(etapas(i)),2)>1,
                d=log2(etapas(i))-mod(log2(etapas(i)),2)+2;
            elseif mod(log2(etapas(i)),2)==0,
                d=log2(etapas(i))-mod(log2(etapas(i)),2);
            else
                d=log2(etapas(i))-mod(log2(etapas(i)),2)+1;
            end
            etapas(i)=2^d;
        end
        i=i+1;
    end
    %=====

    color=[.7 .7 .7];
    % inicializamos los graficos

set(gcf,'NumberTitle','off','position',[250,250,300,300],'Name','Diseño
oFTTH', ...

'menubar','none','backingstore','off','color',color,'Units','normalize
d');

```

```

uicontrol('style','text','fontsize',10,'units','normalized','position'
,[.05 .9 .9 .05], ...
    'string','CONFIGURACIÓN DE LOS
DIVISORES','backgroundcolor',[.5 .5 .5]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .8
.3 .05], ...
    'string','1ª Etapa','backgroundcolor',[.5 .5 .5]);

pr =
uicontrol('style','edit','units','normalized','string',etapas(1), ...
    'position',[.4 .8 .15 .05]);

div2x2_1 =
uicontrol('style','checkbox','units','normalized','string','Divisores
2x2', ...
    'position',[.6 .8 .3 .05],'backgroundcolor',color);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .7
.3 .05], ...
    'string','2ª Etapa','backgroundcolor',[.5 .5 .5]);

seg =
uicontrol('style','edit','units','normalized','string',etapas(2), ...
    'position',[.4 .7 .15 .05]);

div2x2_2 =
uicontrol('style','checkbox','units','normalized','string','Divisores
2x2', ...
    'position',[.6 .7 .3 .05],'backgroundcolor',color);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .6
.3 .05], ...
    'string','3ª Etapa','backgroundcolor',[.5 .5 .5]);

ter =
uicontrol('style','edit','units','normalized','string',etapas(3), ...
    'position',[.4 .6 .15 .05]);

div2x2_3 =
uicontrol('style','checkbox','units','normalized','string','Divisores
2x2', ...
    'position',[.6 .6 .3 .05],'backgroundcolor',color);

uicontrol('style','frame','fontsize',10,'units','normalized','position'
',[.05 .2 .9 .35], ...
    'backgroundcolor',color);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.065 .48
.865 .05], ...
    'string','Ratio máximo de división','backgroundcolor',[.5 .5
.5]);

bpon=uicontrol('style','radio','units','normalized','position',[.3
.4 .4 .05], ...

```

Anexo

```
'string','BPON (G.983):
64','backgroundcolor',color,'value',1,...
    'callback','configuracion_divisores(''B'')');

epon=icontrol('style','radio','units','normalized','position',[.3
.32 .4 .05], ...
    'string','EPON (802.3ah): 16','backgroundcolor',color,...
    'callback','configuracion_divisores(''E'')');

gpon=icontrol('style','radio','units','normalized','position',[.3
.24 .4 .05], ...
    'string','GPON (G.984): 64','backgroundcolor',color,...
    'callback','configuracion_divisores(''G'')');

icontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.1
.05 .2 .1], ...
    'String','AYUDA','BackgroundColor',color, ...
    'CallBack','configuracion_divisores(''ayuda'')');

icontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.4
.05 .2 .1], ...
    'String','OK','BackgroundColor',color, ...
    'CallBack','configuracion_divisores(''ok'')');

icontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.7
.05 .2 .1], ...
    'String','VOLVER','BackgroundColor',color, ...
    'CallBack','configuracion_divisores(''volver'')');

DATOS=[pr seg ter e1 e2 e3 bpon epon gpon div2x2_1 div2x2_2
div2x2_3];

elseif strcmp(valor,'ayuda'),
    msgbox({'En este panel el usuario puede definir los niveles de
división de las etapas de los divisores.';...
        ' ';...
        'Se permite escoger una configuración con divisores 2x2. Si el
usuario lo desea, cualquiera de las etapas y conservando el número de
divisiones se implementa con divisores 2x2.';...
        ' ';...
        'En la pantalla aparecen unos valores predeterminados para la
estructura definida en el panel anterior. Todos los valores se pueden
sustituir si así lo prefiere el usuario o si las divisiones
presentadas por el programa no son correctas. Para saber si dichos
valores son correctos, el programa hace una comprobación de acuerdo
con el estándar utilizado'},...
        'Configuración de los divisores','help');
elseif strcmp(valor,'B'),
    set(DATOS(8),'value',0);
    set(DATOS(9),'value',0);
    pr=str2double(get(DATOS(1),'string'));
    seg=str2double(get(DATOS(2),'string'));
    ter=str2double(get(DATOS(3),'string'));
    if pr>64 || seg>64 || ter>64
        msgbox('El ratio máximo de división para BPON es
64','ATENCIÓN','warn');
    end
elseif strcmp(valor,'E'),
    set(DATOS(7),'value',0);
    set(DATOS(9),'value',0);
```

Anexo

```
pr=str2double(get(DATOS(1),'string'));
seg=str2double(get(DATOS(2),'string'));
ter=str2double(get(DATOS(3),'string'));
if pr>16 || seg>16 || ter>16
    msgbox('El ratio máximo de división para EPON es
16', 'ATENCIÓN', 'warn');
end
elseif strcmp(valor, 'G'),
    set(DATOS(8), 'value', 0);
    set(DATOS(7), 'value', 0);
    pr=str2double(get(DATOS(1), 'string'));
    seg=str2double(get(DATOS(2), 'string'));
    ter=str2double(get(DATOS(3), 'string'));
    if pr>64 || seg>64 || ter>64
        msgbox('El ratio máximo de división para GPON es
64', 'ATENCIÓN', 'warn');
    end
elseif strcmp(valor, 'ok'),
    pr=str2double(get(DATOS(1), 'string'));
    seg=str2double(get(DATOS(2), 'string'));
    ter=str2double(get(DATOS(3), 'string'));
    bp=get(DATOS(7), 'value');
    ep=get(DATOS(8), 'value');
    gp=get(DATOS(9), 'value');
    div2x2_1=get(DATOS(10), 'value');
    div2x2_2=get(DATOS(11), 'value');
    div2x2_3=get(DATOS(12), 'value');

    % Los enlaces de cada etapa que quedan libres (enlaces de cada
divisor)
    enl1=pr-DATOS(4);
    enl2=seg-DATOS(5);
    enl3=ter-DATOS(6);

    if seg~=0 && ter~=0,
        ediv=3;
    elseif seg~=0 && ter==0,
        ediv=2;
    end

    if seg==0
        seg=1; ediv=1;
    end
    if ter==0
        ter=1;
    end

    info_div=pr*seg*ter;
    save variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv
pr seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3;
    close(gcf);
    principal;

elseif strcmp(valor, 'volver'),
    if distr==1,
        close(gcf);
        parametros_edificio;
    elseif distr==0,
        close(gcf);
        parametros_urbanizacion;
```



```
end  
end
```

➤ dibujar.m:

```
function dibujar(etapas)  
  
if etapas==1,  
    axes('Units','normalized','position',[0.47 0.45 0.5 0.52]);  
    [x,map]=imread('dibujo_1etapa.png','png');  
    image(x);colormap(map);axis off;hold on;  
elseif etapas==2,  
    axes('Units','normalized','position',[0.47 0.45 0.5 0.52]);  
    [x,map]=imread('dibujo_2etapa.png','png');  
    image(x);colormap(map);axis off;hold on;  
elseif etapas==3,  
    axes('Units','normalized','position',[0.47 0.45 0.5 0.52]);  
    [x,map]=imread('dibujo_3etapa.png','png');  
    image(x);colormap(map);axis off;hold on;  
end
```

➤ distribucion.m:

```
function distribucion(valor)  
  
if nargin<1,  
    valor= 'comienzo';  
end  
  
global DATOS % variable global que almacena los valores de los  
controles  
  
if strcmp(valor,'comienzo'),  
  
    color=[.7 .7 .7];  
    % inicializamos los graficos  
  
set(gcf,'NumberTitle','off','position',[250,250,390,390],'Name','Diseño  
oFTTH', ...  
  
'menubar','none','backingstore','off','color',color,'Units','normalize  
d');  
  
    uicontrol('style','text','fontname','book  
antiqua','fontsize',10,'fontangle','italic', ...  
            'string','ELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS  
VIVIENDAS','units','normalized','position',[.05 .8 .9 .04], ...  
            'backgroundcolor',[.5 .5 .5]);  
  
    uicontrol('style','frame','units','normalized','position',[.25 .3  
.5 .4], ...  
            'backgroundcolor',color);  
  
    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.3 .6 .4  
.04],'string','DISTRIBUCIÓN', ...  
            'backgroundcolor',[.5 .5 .5]);  
  
end
```

Anexo

```
    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.35 .387
.3 .05],'string','BLOQUES DE PISOS', ...
    'backgroundcolor',color,'HorizontalAlignment','left');

edificios=uicontrol('style','radio','units','normalized','position',[.
3 .4 .05 .05], ...
    'backgroundcolor',color,'callback','distribucion(''edif'')');

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.35 .487
.37 .05],'string','RESIDENCIAS INDIVIDUALES', ...
    'backgroundcolor',color,'HorizontalAlignment','left');

urbanizacion=uicontrol('style','radio','units','normalized','position'
,[.3 .5 .05 .05],'value',1, ...
    'backgroundcolor',color,'callback','distribucion(''urban'')');

uicontrol('style','pushbutton','units','normalized','position',[.25
.15 .25 .1],'string','OK', ...
    'backgroundcolor',color,'callback','distribucion(''ok'')');

uicontrol('style','pushbutton','units','normalized','position',[.52
.15 .23 .1],'string','SALIR', ...
    'backgroundcolor',color,'callback','distribucion(''salir'')');

    % Se guardan los valores de los controles en la variable global
    DATOS = [edificios urbanizacion];

elseif strcmp (valor, 'urban'),
    set(DATOS(1),'value',0); % si está marcado el boton de edificios
desmarco las residencias

elseif strcmp (valor,'edif'),
    set(DATOS(2),'value',0); % si está marcado el boton de las
residencias desmarco edificios

elseif strcmp (valor,'ok'),
    % Cuando pulso el OK se toman todos los datos de los controles
    % almacenados en la variable global y se llama a la función
    % correspondiente
    edificios = get(DATOS(1),'value');
    urbanizacion = get(DATOS(2),'value');
    if edificios==1,
        close(gcf);
        parametros_edificio;
    elseif urbanizacion==1,
        close(gcf);
        parametros_urbanizacion;
    end

elseif strcmp(valor,'salir'),
    close(gcf);
    clear global DATOS;

end
```

➤ parámetros_edificio.m:

```
function parametros_edificio(valor)
% Esta es la función en la cual definimos los parámetros de una finca,
% separación entre las viviendas y se obtiene la longitud del tramo de
% fibra más largo, que es sobre el cual se realizarán los cálculos
% a: altura entre plantas (m)
% b y c: distancias entre cada ONT en la planta

if nargin<1,
    valor= 'comienzo';
end

global DATOS % Variable global que recoge los valores de los
controles.
global variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv pr
seg ter ...
    enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3 % Estas son
variables que almacenan información útil
                                                    % para las gui's
siguientes.
if strcmp(valor,'comienzo'),

    color=[.7 .7 .7];
    % inicializamos los graficos

set(gcf,'NumberTitle','off','position',[250,250,390,390],'Name','Diseño
oFTTH', ...

'menubar','none','backingstore','off','color',color,'Units','normalize
d');

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .93
.9 .04], ...
    'string','PARÁMETROS DEL EDIFICIO','backgroundcolor',[.5 .5
.5]);

    axes('units','normalized','position',[.05 .4 .9 .5]);
    [x,map]=imread('dibujo_edificio.png','png');
    image(x);colormap(map);axis off;hold on;

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .3
.37 .04], ...
    'string','a) Altura entre plantas
(m):','backgroundcolor',color, ...
    'HorizontalAlignment','left');
    a = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','3',
...
    'position',[.42 .304 .1 .04]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .25
.37 .04], ...
    'string','b) Separación en planta
(m):','backgroundcolor',color, ...
    'HorizontalAlignment','left');
    b = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','15',
...
    'position',[.42 .254 .1 .04]);
```

Anexo

```
    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .2
.37 .04], ...
        'string','c) Separación en planta
(m):','backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','left');
    c = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','10',
...
        'position',[.42 .204 .1 .04]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.6 .3 .2
.04], ...
        'string','N° de plantas:', 'backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','left');
    n = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','5',
...
        'position',[.85 .304 .1 .04]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.6 .25
.23 .04], ...
        'string','Viviendas/planta:', 'backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','left');
    v = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','4',
...
        'position',[.85 .254 .1 .04]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.6 .2
.23 .04], ...
        'string','N° de edificios:', 'backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','left');
    e = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','1',
...
        'position',[.85 .204 .1 .04]);

    div_ed =
uicontrol('style','radio','units','normalized','string','Un divisor
por edificio', ...
        'position',[.1 .14 .6
.04], 'backgroundcolor',color, 'value',1, ...
        'Callback','parametros_edificio('div_ed')');

    div_pl =
uicontrol('style','radio','units','normalized','string','Un divisor
por planta', ...
        'position',[.55 .14 .6 .04], 'backgroundcolor',color, ...
        'Callback','parametros_edificio('div_pl')');

    uicontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.2
.05 .15 .05], ...
        'String','AYUDA','BackgroundColor',color, ...
        'Callback','parametros_edificio('ayuda')');

    uicontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.4
.05 .15 .05], ...
        'String','OK','BackgroundColor',color, ...
        'Callback','parametros_edificio('ok')');

    uicontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.6
.05 .15 .05], ...
        'String','VOLVER','BackgroundColor',color, ...
        'Callback','parametros_edificio('volver')');
```

Anexo

```
DATOS=[a b c n v e div_ed div_pl];

% Tan solo puede estar marcada una de las opciones
elseif strcmp(valor,'div_ed'),
    set(DATOS(8),'value',0);
elseif strcmp(valor,'div_pl'),
    set(DATOS(7),'value',0);
elseif strcmp(valor,'ayuda'),
    % AL pulsar el boton de AYUDA, se muestra una ventana con la
    % explicación de esta parte de la aplicación
    msgbox({'En este panel el usuario puede definir los parámetros del
    edificio, asi como la cantidad de estos.';...
    ' ';...
    'Hay dos botones referentes a la posición del divisor o de los
    divisores ópticos en el edificio.';...
    '- El primero de ellos situa un divisor por cada edificio,
    repartiendo la señal directamente hasta la vivienda.';...
    '- El segundo situa el divisor en cada edificio y se
    distribuye la señal hasta cada planta, donde hay otro divisor que
    reparte dicha señal hasta cada vivienda'},...
    'Parámetros del edificio','help');
elseif strcmp(valor,'ok'),

    % Al pulsar OK, se toman todos los datos introducidos por el
    usuario,
    % guardados en la variable global y se calcula la longitud de la
    fibra
    % hasta el hogar que se encuentra más alejado

    a=str2double(get(DATOS(1),'string'));
    b=str2double(get(DATOS(2),'string'));
    c=str2double(get(DATOS(3),'string'));
    n=str2double(get(DATOS(4),'string'));
    v=str2double(get(DATOS(5),'string'));
    e=str2double(get(DATOS(6),'string'));
    div_ed=get(DATOS(7),'value');
    div_pl=get(DATOS(8),'value');
    if b>c,
        l=n*a+b*(v/(v/2))+c;
    elseif b<=c,
        l=n*a+b+c*(v/(v/2));
    end
    distr=1; % Este valor va a indicar que la distribución que utilizo
es de edificios
    tramo_largo=1;
    tramo_corto=(a+b+c)/2;
    if div_ed==1,
        info_div=1; % indica que solo hay 1 etapa de división
    elseif div_pl==1,
        info_div=2; % indica que hay 2 etapas de división
    end
    save variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv
pr seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3;
    close(gcf);
    configuracion_divisores;

elseif strcmp(valor,'volver'),
    close(gcf);
    distribucion;
```

end

➤ `parámetros_urbanizacion.m`:

```
function parametros_urbanizacion(valor)

% Esta es la función en la cual definimos los parámetros de una
urbanización,
% separación entre las viviendas y se obtiene la longitud del tramo de
% fibra más largo, que es sobre el cual se realizarán los cálculos
% a y b: distancias entre cada casa (m)

if nargin<1,
    valor= 'comienzo';
end

global DATOS % variable global que almacena los valores de los
controles
global variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv pr
seg ter ...
    enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3 % Estas son
variables que almacenan información útil
                                                    % para las gui's
siguientes.

if strcmp(valor,'comienzo'),

    color=[.7 .7 .7];
    % inicializamos los graficos

set(gcf,'NumberTitle','off','position',[250,250,390,390],'Name','Diseño
oFTTH', ...

'menubar','none','backingstore','off','color',color,'Units','normalize
d');

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .93
.9 .04], ...
        'string','PARÁMETROS DE LA URBANIZACIÓN','backgroundcolor',[.5
.5 .5]);

    axes('units','normalized','position',[.05 .3 .9 .6]);
    [x,map]=imread('dibujo_urbanizacion.png','png');
    image(x);colormap(map);axis off;hold on;

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .23
.37 .04], ...
        'string','a) Distancia (m):','backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','center');
    a = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','25',
...
        'position',[.42 .23 .1 .04]);

    uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .15
.37 .04], ...
        'string','b) Distancia (m):','backgroundcolor',color, ...
        'HorizontalAlignment','center');
```

Anexo

```
b = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','50',
...
    'position',[.42 .15 .1 .04]);

uicontrol('style','text','units','normalized','position',[.05 .07
.37 .04], ...
    'string','N° de viviendas :','backgroundColor',color, ...
    'HorizontalAlignment','center');
e = uicontrol('style','edit','units','normalized','string','16',
...
    'position',[.42 .07 .1 .04]);

uicontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.7
.18 .15 .05], ...
    'String','OK','BackgroundColor',color, ...
    'Callback','parametros_urbanizacion(''ok'')');

uicontrol('Style','Pushbutton','Units','normalized','Position',[.7
.08 .15 .05], ...
    'String','VOLVER','BackgroundColor',color, ...
    'Callback','parametros_urbanizacion(''volver'')');

DATOS=[a b e];% Se almacenan los valores de los controles en la
variable global

elseif strcmp(valor,'ok'),

    % Al pulsar OK, se toman todos los datos introducidos por el
    usuario,
    % guardados en la variable global y se calcula la longitud de la
    fibra
    % hasta el hogar que se encuentra más alejado

    a=str2double(get(DATOS(1),'string'));
    b=str2double(get(DATOS(2),'string'));
    e=str2double(get(DATOS(3),'string'));

    distr=0; % Este valor indica que la distribución utilizada es una
    urbanización
    tramo_largo=((sqrt(e)-1)/2)*(a+b);
    tramo_corto=(a+b)/2;
    n=1; % numero de plantas
    v=1; % numero de viviendas por planta
    if e>16
        info_div=2;
    else
        info_div=1;
    end
    save variables distr n v e tramo_largo tramo_corto info_div ediv
pr seg ter enl1 enl2 enl3 bp ep gp div2x2_1 div2x2_2 div2x2_3;
    close(gcf);
    configuracion_divisores;

elseif strcmp(valor,'volver'),
    close(gcf);
    distribucion;

end
```

➤ principal.m:

```
function principal(valor)

if nargin<1,
    valor= 'comienzo';
end

global DATOS_OLT % variables que almacenan los valores de los
controles
global DATOS_ONT
global DATOS_FIBRA
global DATOS_ODN
global DATOS_ESTANDARES
global DATOS_RESULTADOS
global var
load variables % Se cargan las variables de los parametros de los
edificios

if strcmp(valor,'comienzo'),

    % inicializamos los graficos           %[x_pos y_pos x y]

set(gcf,'NumberTitle','off','position',[100,100,1190,590],'Name','Dise
ñoFTTH', ...
    'menubar','none','backingstore','off','color',[0.7 0.7
0.7],'Units','normalized')

    textcolor=[.7 .7 .7];

    % Marco de los parámetros
    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.008
0.02 0.43 0.95],...
        'BackgroundColor',textColor);

    uicontrol('style','text','units','normalized','fontname','book
antiqua','fontsize',15, ...
        'string','PARÁMETROS DE LOS ELEMENTOS DE LA
RED','backgroundcolor',[.5 .5 .5], ...
        'position',[0.02 0.905 0.4 0.04]);

    %=====
    % Definición de los parámetros del OLT
    %=====

    % Marco del OLT
    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.028
0.585 0.185 0.295],...
        'BackgroundColor',textColor);

    % Título
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','OLT', ...
        'position',[0.03 0.856 0.181 0.02],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

    % Longitud de onda del Tx
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Long. de
onda de Tx (nm)', ...
```


Anexo

```
'position',[0.03 0.83 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

londaTx1_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.15 0.829 0.029 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',1490);

londaTx2_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.18 0.829 0.029 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',1550);

% Longitud de onda del Rx
icontrol('Style','text','units','normalized','string','Long. de
onda de Rx (nm)', ...
'position',[0.03 0.8 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

londaRx_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',[
0.15 0.8 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',1310);

% Potencia transmitida
icontrol('Style','text','units','normalized','string','Potencia
transmitida (dBm)', ...
'position',[0.03 0.77 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

Ptx_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.77 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',0);

% Sensibilidad

icontrol('Style','text','units','normalized','string','Sensibilidad
(dBm)', ...
'position',[0.03 0.74 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

sens_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.1
5 0.74 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',-30);

% Tiempo de subida
icontrol('Style','text','units','normalized','string','Tiempo de
subida (ps)', ...
'position',[0.03 0.71 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

t_subida_OLT=icontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.15 0.71 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',250);

% Se muestran velocidades típicas de cada estándar
if bp==1,
vel_d=1244;
```

Anexo

```
        vel_u=622;
    elseif ep==1,
        vel_d=1244;
        vel_u=1244;
    elseif gp==1,
        vel_d=2488;
        vel_u=1244;
    end

    % RIN
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','RIN
(dB/Hz)', ...
        'position',[0.03 0.68 0.11
0.025], 'HorizontalAlignment','center', ...
        'BackgroundColor',textColor);

RIN_OLT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.68 0.05 0.025], ...
        'HorizontalAlignment','center','string',-120);

    % Ancho espectral de la fuente
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Ancho esp.
de la fte. (nm)', ...
        'position',[0.03 0.65 0.11
0.025], 'HorizontalAlignment','center', ...
        'BackgroundColor',textColor);

an_es_OLT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.
15 0.65 0.05 0.025], ...
        'HorizontalAlignment','center','string',5);

    % Relación de extinción
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Relación
de extinción (dB)', ...
        'position',[0.03 0.62 0.11
0.025], 'HorizontalAlignment','center', ...
        'BackgroundColor',textColor);

re_OLT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.62 0.05 0.025], ...
        'HorizontalAlignment','center','string',10);

    % Máxima potencia de entrada
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Max. pot.
de entrada (dBm)', ...
        'position',[0.03 0.59 0.11
0.025], 'HorizontalAlignment','center', ...
        'BackgroundColor',textColor);

pot_max_OLT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[
0.15 0.59 0.05 0.025], ...
        'HorizontalAlignment','center','string',-14);

    %=====  

    % Definición de los parámetros del ONT  

    %=====  

    sep=.425;

    % Marco del ONT
```

Anexo

```
uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.028
0.685-sep 0.185 0.295],...
    'BackgroundColor',textColor);

% Título
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','ONT', ...
    'position',[0.03 0.956-sep 0.181 0.02],'BackgroundColor',[.5
.5 .5]);

% Longitud de onda del Tx
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Long. de
onda de Tx (nm)', ...
    'position',[0.03 0.93-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

londaTx_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[
0.15 0.929-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',1310);

% Longitud de onda del Rx
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Long. de
onda de Rx (nm)', ...
    'position',[0.03 0.9-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

londaRx1_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.15 0.9-sep 0.029 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',1490);

londaRx2_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.18 0.9-sep 0.029 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',1550);

% Potencia transmitida
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Potencia
transmitida (dBm)', ...
    'position',[0.03 0.87-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

Ptx_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.87-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',-4);

% Sensibilidad

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Sensibilidad
(dBm)', ...
    'position',[0.03 0.84-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

sens_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.1
5 0.84-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',-28);

% Tiempo de subida
```

Anexo

```
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Tiempo de
subida (ps)', ...
    'position',[0.03 0.81-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

t_subida_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',
[0.15 0.81-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',250);

% RIN
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','RIN
(dB/Hz)', ...
    'position',[0.03 0.78-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

RIN_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.78-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',-120);

% Ancho espectral de la fuente
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Ancho esp.
de la fte. (nm)', ...
    'position',[0.03 0.75-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

an_es_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.
15 0.75-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',2.8);

% Relación de extinción
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Relación
de extinción (dB)', ...
    'position',[0.03 0.72-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

re_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.15
0.72-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',10);

% Máxima potencia de entrada
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Max. pot.
de entrada (dBm)', ...
    'position',[0.03 0.69-sep 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

pot_max_ONT=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[
0.15 0.69-sep 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',-3);

%=====
% VELOCIDADES DEL ENLACE
%=====

% Marco de velocidades
```

Anexo

```
    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.028
0.085 0.185 0.13],...
    'BackgroundColor',textColor);

    % Título

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Velocidades',
...
    'position',[0.03 0.1885 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

    % Tasa binaria de subida
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Vel. de
bajada (Mbps)', ...
    'position',[0.03 0.15 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

tasa_bin_d=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0
.15 0.15 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',vel_d);

    % Tasa binaria de bajada
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Vel. de
subida (Mbps)', ...
    'position',[0.03 0.11 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

tasa_bin_u=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0
.15 0.11 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',vel_u);

%=====
% PARÁMETROS DEL CANAL
%=====

    uicontrol('Style','frame','units','normalized','position',[0.028
0.035 0.385 0.033], ...
    'BackgroundColor',textColor);

    % Margen de seguridad
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Margen de
seguridad (dB):', ...
    'position',[0.13 0.039 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);
    Ms=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.25
0.039 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',3);

%=====
% FIBRA ÓPTICA
%=====

    % Marco de la fibra
    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.228
0.7 0.185 0.18],...
```

Anexo

```
'BackgroundColor',textColor);

% Título
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Fibra
óptica', ...
'position',[0.23 0.8535 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

% Longitud total del tramo
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Dist. del
OLT al divisor (km)', ...
'position',[0.23 0.827 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

long_fibra=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0
.35 0.827 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string',2);

% Atenuaciones

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Aten.(1310nm)
(dB/km)', ...
'position',[0.23 0.797 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

aten1310=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.3
5 0.797 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string','0.34');

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Aten.(1490nm)
(dB/km)', ...
'position',[0.23 0.767 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

aten1490=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.3
5 0.767 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string','0.24');

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Aten.(1550nm)
(dB/km)', ...
'position',[0.23 0.737 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);

aten1550=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.3
5 0.737 0.05 0.025], ...
'HorizontalAlignment','center','string','0.19');

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Disp.
crom. (ns/(nm*km))', ...
'position',[0.23 0.707 0.115
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
'BackgroundColor',textColor);
```

Anexo

```
disp=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.707 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',0.018);

%=====
% EMPALMES
%=====

% Marco de empalmes
uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.228
0.555 0.185 0.13],...
    'BackgroundColor',textColor);

% Título
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Empalmes',
...
    'position',[0.23 0.6585 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

% Cantidad
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Cantidad',
...
    'position',[0.23 0.62 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

nemp=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.62 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string','0');

% Pérdidas por empalme
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Pérdidas
medias (dB)', ...
    'position',[0.23 0.58 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

aemp=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.58 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string','0.5');

%=====
% CONECTORES
%=====

% Marco de conectores
uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.228
0.41 0.185 0.13],...
    'BackgroundColor',textColor);

% Título
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Conectores',
...
    'position',[0.23 0.5135 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);
```

Anexo

```
% Se obtienen el número de conectores necesarios para cada etapa
en el
% caso de utilizar divisores 2x2
var1=0;
var2=0;
var3=0;
if div2x2_1==1,
    var1=log2(pr);
else
    if pr~=1
        var1=1;
    end
end
if div2x2_2==1,
    var2=log2(seg);
else
    if seg~=1
        var2=1;
    end
end
if div2x2_3==1,
    var3=log2(ter);
else
    if ter~=1
        var3=1;
    end
end
if div2x2_1==0 && div2x2_2==0 && div2x2_3==0,
    var=ediv;
else
    var=var1+var2+var3;
end
conectores=2+2*var;
% Cantidad
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Cantidad',
...
    'position',[0.23 0.475 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

ncon=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.475 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',conectores);

% Pérdidas por conector
uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Pérdidas
medias (dB)', ...
    'position',[0.23 0.435 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

acon=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.435 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string','0.5');

%=====
% DIVISOR
%=====

% Marco de conectores
```


Anexo

```
    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.228
0.25 0.185 0.15],...
    'BackgroundColor',textColor);

    % Título
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Divisor
óptico', ...
    'position',[0.23 0.3735 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

    % Cantidad
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Etapas de
divisores', ...
    'position',[0.23 0.335 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);

    et_div=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.335 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',ediv);

    % Niveles de división
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Niveles de
división 1:', ...
    'position',[0.23 0.3 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);
    div=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.3 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string',info_div);

    % Exceso en los divisores
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Pérdidas
de exceso (dB):', ...
    'position',[0.23 0.265 0.11
0.025],'HorizontalAlignment','center', ...
    'BackgroundColor',textColor);
    exc=uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[0.35
0.265 0.05 0.025], ...
    'HorizontalAlignment','center','string','1');

    %=====
    % ESTÁNDAR UTILIZADO
    %=====

    uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.228
0.085 0.185 0.15],...
    'BackgroundColor',textColor);
    uicontrol('Style','text','units','normalized','string','Estándar',
...
    'position',[0.23 0.208 0.18 0.022],'BackgroundColor',[.5 .5
.5]);

    % BPON
    bpon=uicontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.23 0.18 0.1
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','BPON (ITU-T
G.983)', 'BackgroundColor',textColor,'value',bp, ...
    'callback','principal(''B'')');
```

```

% EPON
epon=icontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.23 0.14 0.1
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','EPON (IEEE
802.3ah)','BackgroundColor',textColor,'value',ep, ...
    'callback','principal(''E'')');

% GPON
gpon=icontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.23 0.1 0.1
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','GPON (ITU-T
G.984)','BackgroundColor',textColor,'value',gp, ...
    'callback','principal(''G'')');

% Clase A
claseA=icontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.35 0.18 0.05
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','Clase A','BackgroundColor',textColor,'value',1, ...
    'callback','principal(''classA'')');

% Clase B
claseB=icontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.35 0.14 0.05
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','Clase B','BackgroundColor',textColor, ...
    'callback','principal(''classB'')');

% Clase C
claseC=icontrol('style','radio','units','normalized', ...
    'position',[0.35 0.1 0.05
0.025],'HorizontalAlignment','center',...
    'string','Clase C','BackgroundColor',textColor, ...
    'callback','principal(''classC'')');

%=====
% DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE LA RED
%=====

dibujar(ediv);

icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.47
0.41 0.15 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Enlaces que quedan
libres:');

icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.63
0.41 0.045 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','1ª Etapa');

icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.68
0.41 0.045 0.025],...
    'string',en11);

icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.73
0.41 0.045 0.025],...

```

Anexo

```
'BackgroundColor',textColor,'string','2ª Etapa');

uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.78
0.41 0.045 0.025],...
    'string',enl2);

uicontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.83
0.41 0.045 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','3ª Etapa');

uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.88
0.41 0.045 0.025],...
    'string',enl3);

%=====
% RESULTADOS
%=====

uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.47
0.13 0.5 0.27],...
    'BackgroundColor',textColor);

uicontrol('Style','text','units','normalized','string','RESULTADOS','f
ontname','book antigua',...
    'fontsize',15,'position',[0.48 0.345 0.48
0.04],'BackgroundColor',[.5 .5 .5]);

% Enlace descendente
uicontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.48
0.165 0.237 0.17],...
    'BackgroundColor',textColor);
uicontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.483
0.303 0.23 0.025],...
    'BackgroundColor',[.5 .5 .5],'string','Enlace descendente');
uicontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.493
0.27 0.12 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Potencia recibida (dBm
:');

bpot_down=uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.
65 0.27 0.05 0.025]);

uicontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.487
0.24 0.145 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Tiempo de subida del
enlace (ps) :');

bt_down=uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.65
0.24 0.05 0.025]);

uicontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.487
0.21 0.145 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Pérdidas del enlace (dB
:');

perdidas_down=uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position'
,[0.65 0.21 0.05 0.025]);
```

Anexo

```
resultado_down=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',
',[0.487 0.18 0.22 0.025],...
    'backgroundColor',textColor);

s=.24;

% Enlace ascendente
icontrol('Style','frame','Units','normalized','Position',[0.48+s
0.165 0.233 0.17],...
    'BackgroundColor',textColor);
icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.483+s
0.303 0.226 0.025],...
    'BackgroundColor',[.5 .5 .5],'string','Enlace ascendente');
icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.493+s
0.27 0.12 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Potencia recibida (dBm)
:');

bpot_up=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.65
+s 0.27 0.05 0.025]);

    icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.487+s
0.24 0.145 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Tiempo de subida del
enlace (ps) :');

bt_up=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.65+s
0.24 0.05 0.025]);

    icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.487+s
0.21 0.145 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Pérdidas del enlace (dB)
:');

perdidas_up=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[
0.65+s 0.21 0.05 0.025]);

resultado_up=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',
',[0.487+s 0.18 0.22 0.025],...
    'backgroundColor',textColor);

% Tasa binaria máxima recibida por cada usuario
icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.5
0.136 0.21 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','La tasa binaria máxima
recibida por cada usuario:');

tasa_usuario=icontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',
',[0.71 0.136 0.04 0.025]);
    icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.75
0.136 0.03 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','(Mbps)');

% Numero total de usuarios
icontrol('Style','text','Units','normalized','Position',[0.82
0.136 0.07 0.025],...
    'BackgroundColor',textColor,'string','Nº usuarios:');
```

Anexo

```
uicontrol('Style','edit','Units','normalized','Position',[0.9
0.136 0.04 0.025],...
    'string',n*v*e);

% Boton AYUDA
uicontrol('style','pushbutton','units','normalized', ...
    'position',[0.47 0.05 0.1
0.05], 'HorizontalAlignment','center',...

'string','AYUDA','BackgroundColor',textColor,'callback','principal('a
yuda')');

% Boton OK
uicontrol('style','pushbutton','units','normalized', ...
    'position',[0.67 0.05 0.1
0.05], 'HorizontalAlignment','center',...

'string','OK','BackgroundColor',textColor,'callback','principal('ok'
)');

% Boton VOLVER
uicontrol('style','pushbutton','units','normalized', ...
    'position',[0.87 0.05 0.1
0.05], 'HorizontalAlignment','center',...

'string','VOLVER','BackgroundColor',textColor,'callback','principal('
volver')');

% Almaceno los valores de todos los controles en sus
correspondientes
% variables
DATOS_OLT=[londaTx1_OLT londaTx2_OLT londaRx_OLT Ptx_OLT sens_OLT
t_subida_OLT ...
    RIN_OLT an_es_OLT re_OLT pot_max_OLT];
DATOS_ONT=[londaTx_ONT londaRx1_ONT londaRx2_ONT Ptx_ONT sens_ONT
t_subida_ONT ...
    RIN_ONT an_es_ONT re_ONT pot_max_ONT];
DATOS_FIBRA=[long_fibra aten1310 aten1490 aten1550 disp];
DATOS_ODN=[nemp aemp ncon acon et_div div exc Ms tasa_bin_d
tasa_bin_u];
DATOS_ESTANDARES=[bpon epon gpon claseA claseB claseC];
DATOS_RESULTADOS=[bpot_down bt_down perdidas_down resultado_down
bpot_up bt_up perdidas_up resultado_up tasa_usuario];

% Para que pueda ser marcado tan solo un estándar
% Tambien muestra algunas de las velocidades de cada uno
elseif strcmp(valor,'B'),
    set(DATOS_ESTANDARES(2),'value',0);
    set(DATOS_ESTANDARES(3),'value',0);
    set(DATOS_ODN(9),'string',1244);
    set(DATOS_ODN(10),'string',622);
elseif strcmp(valor,'E'),
    set(DATOS_ESTANDARES(1),'value',0);
    set(DATOS_ESTANDARES(3),'value',0);
    set(DATOS_ESTANDARES(4),'value',0);
    set(DATOS_ESTANDARES(5),'value',0);
    set(DATOS_ESTANDARES(6),'value',0);
    set(DATOS_ODN(9),'string',1244);
    set(DATOS_ODN(10),'string',1244);
elseif strcmp(valor,'G'),
```

Anexo

```
set(DATOS_ESTANDARES(1), 'value', 0);
set(DATOS_ESTANDARES(2), 'value', 0);
set(DATOS_ODN(9), 'string', 2488);
set(DATOS_ODN(10), 'string', 1244);
% Para que pueda ser marcado tan solo una clase
elseif strcmp(valor, 'classA'),
    set(DATOS_ESTANDARES(5), 'value', 0);
    set(DATOS_ESTANDARES(6), 'value', 0);
elseif strcmp(valor, 'classB'),
    set(DATOS_ESTANDARES(4), 'value', 0);
    set(DATOS_ESTANDARES(6), 'value', 0);
elseif strcmp(valor, 'classC'),
    set(DATOS_ESTANDARES(4), 'value', 0);
    set(DATOS_ESTANDARES(5), 'value', 0);

elseif strcmp(valor, 'ayuda'),
    % Al pulsar el boton de ayuda se muestra una ventana explicando
    los
    % campos de los elementos y el funcionamiento de esta parte de la
    % aplicación
    msgbox({'En esta parte del programa se permite al usuario definir
    los parámetros de los elementos utilizados en la red FTTH.';...
    ' ';...
    'Una vez rellenos todos los datos, al pulsar el boton OK, se
    muestran los resultados obtenidos de los cálculos pertinentes para la
    comprobación de la viabilidad de la red. Tambien se muestra un croquis
    de la red mostrando como llega la señal desde el nodo central al
    abonado.';},...
    'AYUDA', 'help');

elseif strcmp(valor, 'ok'),

    % Al pulsar OK se toman los datos introducidos por el usuario
    guardados
    % en las variables correspondientes

    londaTx1_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(1), 'string'));
    londaTx2_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(2), 'string'));
    londaRx_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(3), 'string'));
    Ptx_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(4), 'string'));
    sens_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(5), 'string'));
    t_subida_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(6), 'string'));
    RIN_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(7), 'string'));
    an_es_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(8), 'string'));
    re_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(9), 'string'));
    pot_max_OLT=str2double(get(DATOS_OLT(10), 'string'));

    londaTx_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(1), 'string'));
    londaRx1_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(2), 'string'));
    londaRx2_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(3), 'string'));
    Ptx_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(4), 'string'));
    sens_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(5), 'string'));
    t_subida_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(6), 'string'));
    RIN_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(7), 'string'));
    an_es_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(8), 'string'));
    re_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(9), 'string'));
    pot_max_ONT=str2double(get(DATOS_ONT(10), 'string'));

    long_fibra=str2double(get(DATOS_FIBRA(1), 'string'));
    aten1310=str2double(get(DATOS_FIBRA(2), 'string'));
```

Anexo

```
aten1490=str2double(get(DATOS_FIBRA(3),'string'));
aten1550=str2double(get(DATOS_FIBRA(4),'string'));
disp=str2double(get(DATOS_FIBRA(5),'string'));

nemp=str2double(get(DATOS_ODN(1),'string'));
aemp=str2double(get(DATOS_ODN(2),'string'));
ncon=str2double(get(DATOS_ODN(3),'string'));
acon=str2double(get(DATOS_ODN(4),'string'));
et_div=str2double(get(DATOS_ODN(5),'string'));
div=str2double(get(DATOS_ODN(6),'string'));
exc=str2double(get(DATOS_ODN(7),'string'));
Ms=str2double(get(DATOS_ODN(8),'string'));
tasa_bin_d=str2double(get(DATOS_ODN(9),'string'));
tasa_bin_u=str2double(get(DATOS_ODN(10),'string'));

bpon=get(DATOS_ESTANDARES(1),'value');
epon=get(DATOS_ESTANDARES(2),'value');
gpon=get(DATOS_ESTANDARES(3),'value');
claseA=get(DATOS_ESTANDARES(4),'value');
claseB=get(DATOS_ESTANDARES(5),'value');
claseC=get(DATOS_ESTANDARES(6),'value');

long1=long_fibra+tramo_largo/1000;
long2=long_fibra+tramo_corto/1000;

% Si el usuario ha introducido un valor incorrecto en los niveles
de
% división del divisor, se rectifica el valor
if mod(log2(div),2)>1,
    div=log2(div)-mod(log2(div),2)+2;
elseif mod(log2(div),2)==0,
    div=log2(div)-mod(log2(div),2);
else
    div=log2(div)-mod(log2(div),2)+1;
end
ap=2^div;
set(DATOS_ODN(6),'string',ap);

% Si las velocidades introducidas no coinciden con el estándar
% utilizado, el programa lo indica mediante una ventana de error
if bpon==1,
    BER=10^(-10);
    if long1>20
        msgbox('La distancia máxima entre OLT y ONT para BPON no
debe superar los 20 km','ERROR','error');
    end
    if tasa_bin_d~=155 && tasa_bin_d~=622 && tasa_bin_d~=1244,
        msgbox('Las tasas binarias del OLT para BPON solo pueden
ser: 155, 622 ó 1244 Mbps','ERROR','error');
    elseif tasa_bin_u~=155 && tasa_bin_u~=622,
        msgbox('Las tasas binarias del ONT para BPON solo pueden
ser: 155 ó 622 Mbps','ERROR','error');
    end
elseif epon==1,
    BER=10^(-12);
    if long1>20
        msgbox('La distancia máxima entre OLT y ONT para EPON no
debe superar los 20 km','ERROR','error');
    end
end
```

Anexo

```
if tasa_bin_d~=1244,
    msgbox('La tasa binaria del OLT para EPON solo puede ser:
1244 Mbps','ERROR','error');
elseif tasa_bin_u~=1244,
    msgbox('La tasa binaria del ONT para EPON solo puede ser:
1244 Mbps','ERROR','error');
end
elseif gpon==1,
    BER=10^(-10);
    if long2<10 || long1>20
        msgbox('La distancia máxima entre OLT y ONT para GPON debe
estar comprendida entre los 10 y los 20 km','ERROR','error');
    end
    if tasa_bin_d~=2488 && tasa_bin_d~=1244,
        msgbox('Las tasas binarias del OLT para GPON solo pueden
ser: 1244 ó 2488 Mbps','ERROR','error');
    elseif tasa_bin_u~=155 && tasa_bin_u~=622 && tasa_bin_u~=2488
&& tasa_bin_u~=1244,
        msgbox('Las tasas binarias del ONT para GPON solo pueden
ser: 155, 622, 1244 ó 2488 Mbps','ERROR','error');
    end
end

% Cálculo del balance de potencias y de tiempos en el sentido
descendente
% 1490 nm

P1490_max=calculo_penalizacion(re_OLT,RIN_OLT,BER,(tasa_bin_d/1000),lo
ng1,disp,an_es_OLT,1,londaTx1_OLT);

Lc1490_max=calculo_perdidas(ap,var*exc,aten1490,long1,acon,ncon,aemp,n
emp,P1490_max);

set(DATOS_RESULTADOS(3),'string',calculo_perdidas(ap,var*exc,aten1490,
long1,acon,ncon,aemp,nemp,0));
Pr1490_min=calculo_balance_potencias(Ptx_OLT,Lc1490_max,Ms);
set(DATOS_RESULTADOS(1),'string',Pr1490_min);

% Éste es el cálculo de la potencia máxima que le llegará al
% usuario más cercano al divisor

P1490_min=calculo_penalizacion(re_OLT,RIN_OLT,BER,(tasa_bin_d/1000),lo
ng2,disp,an_es_OLT,1,londaTx1_OLT);

Lc1490_min=calculo_perdidas(ap,var*exc,aten1490,long2,acon,ncon,aemp,n
emp,P1490_min);
Pr1490_max=calculo_balance_potencias(Ptx_OLT,Lc1490_min,Ms);

% 1550 nm

P1550=calculo_penalizacion(re_OLT,RIN_OLT,BER,(tasa_bin_d/1000),long1,
disp,an_es_OLT,1,londaTx2_OLT);

Lc1550=calculo_perdidas(ap,var*exc,aten1550,long1,acon,ncon,aemp,nemp,
P1550);
Pr1550=calculo_balance_potencias(Ptx_OLT,Lc1550,Ms);

Tr_down=calculo_balance_tiempos(disp,long1,an_es_OLT,t_subida_OLT,t_su
bida_ONT);
```


Anexo

```
set (DATOS_RESULTADOS (2), 'string', Tr_down);

% Cálculo del balance de potencias y de tiempos en el sentido
ascendente
% 1310 nm

p=1;
s=1;
t=1;
if div2x2_1==1,
    p=pr;
end
if div2x2_2==1,
    s=seg;
end
if div2x2_3==1,
    t=ter;
end
divisiones=p*s*t;

P1310_max=calculo_penalizacion(re_ONT,RIN_ONT,BER, (tasa_bin_u/1000), lo
ng1,0,an_es_ONT,1,londaTx_ONT);

Lc1310_max=calculo_perdidas (divisiones, var*exc, aten1310, long1, acon, nco
n, aemp, nemp, P1310_max);

set (DATOS_RESULTADOS (7), 'string', calculo_perdidas (divisiones, var*exc, a
ten1310, long1, acon, ncon, aemp, nemp, 0));
Pr1310_min=calculo_balance_potencias (Ptx_ONT, Lc1310_max, Ms);
set (DATOS_RESULTADOS (5), 'string', Pr1310_min);

% Éste es el cálculo de la potencia máxima, ya que se considera
una
% distancia de 0 metros entre el usuario y el divisor

P1310_min=calculo_penalizacion(re_ONT,RIN_ONT,BER, (tasa_bin_u/1000), lo
ng2,0,an_es_ONT,1,londaTx_ONT);

Lc1310_min=calculo_perdidas (divisiones, var*exc, aten1310, long2, acon, nco
n, aemp, nemp, P1310_min);
Pr1310_max=calculo_balance_potencias (Ptx_ONT, Lc1310_min, Ms);

Tr_up=calculo_balance_tiempos (0, long1, an_es_ONT, t_subida_ONT, t_subida_
OLT);
set (DATOS_RESULTADOS (6), 'string', Tr_up);
num_viv=n*v*e; % numero de abonados
set (DATOS_RESULTADOS (9), 'string', tasa_bin_d/num_viv);

% Se hacen las comparaciones pertinentes de los resultados para
% averiguar la viabilidad de los enlaces

down=1; % El enlace descendente es viable
up=1; % El enlace ascendente es viable
bpd=1; % Se cumple el balance de potencias
bpu=1;
btd=1; % Se cumple el balance de tiempos
btu=1;
maxd=1; % La potencia recibida no sobrepasa el limite
```

Anexo

```
maxu=1;
cld=1; % La potencia recibida es la suficiente
clu=1;
% Se comprueba si se han cumplido los balances de potencias
if bpon==1 || gpon==1,
    if claseA==1
        if Lc1490_min<5 || Lc1490_max>20
            cld=0;
        end
        if Lc1310_min<5 || Lc1310_max>20
            clu=0;
        end
    elseif claseB==1,
        if Lc1490_min<10 || Lc1490_max>25
            cld=0;
        end
        if Lc1310_min<10 || Lc1310_max>25
            clu=0;
        end
    elseif claseC==1,
        if Lc1490_min<15 || Lc1490_max>30
            cld=0;
        end
        if Lc1310_min<15 || Lc1310_max>30
            clu=0;
        end
    end
elseif epon==1,
    if long1<=10,
        if Lc1490_min<5 || Lc1490_max>19.5
            cld=0;
        end
        if Lc1310_min<5 || Lc1310_max>20
            clu=0;
        end
    elseif long2>10 && long1<=20
        if Lc1490_min<10 || Lc1490_max>23.5
            cld=0;
        end
        if Lc1310_min<10 || Lc1310_max>24
            clu=0;
        end
    end
end

% Se comprueba si se cumplen los balances de tiempos
if (Tr_down*(10^-12))>=(0.7/(tasa_bin_d/1000))
    down=0;btd=0;
end
if (Tr_up*(10^-12))>=(0.7/(tasa_bin_u/1000))
    up=0;btu=0;
end

% Se comprueba que la potencia recibida no sobrepase la máxima
% admitida por el receptor
if Pr1490_max>pot_max_ONT
    maxd=0;
end
if Pr1310_max>pot_max_OLT
    maxu=0;
end
```

Anexo

```
% Se comprueba que la potencia recibida sea la necesaria para
poder
% ser detectada (balance de potencias)
if Pr1490_min<sens_ONT
    down=0;bpd=0;
end
if Pr1310_min<sens_OLT
    up=0;bpu=0;
end

% Finalmente se muestran los resultados en la pantalla
% Se muestra la viabilidad de la red
if down==0,
    set(DATOS_RESULTADOS(4),'string','EL ENLACE NO ES
VIABLE','backgroundColor',[1 0 0]);
else
    set(DATOS_RESULTADOS(4),'string','EL ENLACE ES
VIABLE','backgroundColor',[0 1 0]);
end

if up==0,
    set(DATOS_RESULTADOS(8),'string','EL ENLACE NO ES
VIABLE','backgroundColor',[1 0 0]);
else
    set(DATOS_RESULTADOS(8),'string','EL ENLACE ES
VIABLE','backgroundColor',[0 1 0]);
end

% Se muestra un mensaje con la condición que no se cumple y el
% enlace descendente o ascendente
if btd==0,
    msgbox('NO SE CUMPLE EL BALANCE DE TIEMPOS','Enlace
descendente','warn');
end
if btu==0,
    msgbox('NO SE CUMPLE EL BALANCE DE TIEMPOS','Enlace
ascendente','warn');
end
if bpd==0,
    msgbox('NO SE CUMPLE EL BALANCE DE POTENCIAS','Enlace
descendente','warn');
end
if bpu==0,
    msgbox('NO SE CUMPLE EL BALANCE DE POTENCIAS','Enlace
ascendente','warn');
end
if maxd==0,
    msgbox('LA POTENCIA RECIBIDA SOBREPASA LA MÁXIMA PERMITIDA POR
EL RECEPTOR','Enlace descendente','warn');
end
if maxu==0,
    msgbox('LA POTENCIA RECIBIDA SOBREPASA LA MÁXIMA PERMITIDA POR
EL RECEPTOR','Enlace ascendente','warn');
end
aviso={'LAS PÉRDIDAS DEL ENLACE NO COINCIDEN CON LA CLASE
UTILIZADA';...
' ';...
'BPON/GPON';...
' ';...
' - Clase A: 5 - 20 dB';...
' ';...}
```

Anexo

```
' - Clase B: 10 - 25 dB';...
';...
' - Clase C: 15 - 30 dB';...
';...
'EPON';...
';...
' - Upstream      10 km: 5 - 20 dB';...
';...
' - Upstream      20 km: 10 - 24 dB';...
';...
' - Downstream: 10 km: 5 - 19.5 dB';...
';...
' - Downstream: 20 km: 10 - 23.5 dB'};
if cld==0,
    msgbox(avisos,'Enlace descendente','warn');
end
if clu==0,
    msgbox(avisos,'Enlace ascendente','warn');
end

elseif strcmp(valor,'volver'),
    % Al pulsar el boton SALIR, cierra la ventana gráfica y borra las
    variables
    close(gcf);
    clear global DATOS_OLT;
    clear global DATOS_ONT;
    clear global DATOS_FIBRA;
    clear global DATOS_ODN;
    clear global DATOS_ESTANDARES;
    clear global DATOS;
    configuracion_divisores;

end
```

Bibliografía

- [1] "FTTx PON EXFO Guide", <http://www.exfo.ru> (4-3-2011)
- [2] Miguel Lattanzi, Agustín Graf, "Redes FTTx: Conceptos y Aplicaciones". IEEE Argentina. (4-3-2011)
- [3] Apuntes de clase de COMUNICACIONES OPTICAS II "Tema 8: Presente y futuro del sector, Redes de acceso ópticas". Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Madrid, Curso 2009-2010.
- [4] Marcelo Abreu, Aldo Castagna, Pablo Cristiani, Pedro Zunino, Enrique Roldós, Gustavo Sandler, "Características generales de una red de fibra óptica al hogar (FTTH)". Memoria de trabajos de difusión científica y técnica, num 7 (2009).
- [5] Josep Prat, P.E. Balaguer, J.M. Gené, O.Díaz, S. Figuerola, "FTTx Concepts and Applications", Ed. Springer, 2002.
- [6] C. Lin, Ed. Wiley, "Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home: Systems, Technologies and Deployment Strategies", 2006.
- [7] J. Prat, "Next-Generation FTTH Passive Optical Networks". Ed. Springer Science + Business Media B. V. 2008.
- [8] "FTTx PON Guide Testing Passive Optical Networks", <http://www.exfo.com> (4-3-2011).
- [9] Juan Sebastian Guevara Henao, "Tecnologías de redes PON", Consulta Tecnologías de redes PON (14-5-2011).
- [10] Ramón Jesús Millán Tejedor, "GPON (Gigabit Passive Optical Network)", QUÉ ES..., dic.-ene. 2008.
- [11] Jani Saheb Shaik, N.R. Patil, "FTTH Deployment Options for Telecom Operators", Sterlite Optical Technologies Ltd (14-5-2011).
- [12] Apuntes del Seminario "Redes de acceso basadas en fibra óptica: FTTx". Master oficial en Tecnologías, Sistemas y Redes de Telecomunicaciones (UPV). Curso 2010-2011.
- [13] <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es> (30-6-2011)

Bibliografía

- [14] <http://es.wikipedia.org> (30-6-2011)
- [15] <http://www.telnet-ri.es/index.php?id=279> (30-6-2011)
- [16] Enrique Prados, "Redes FTTH" (14-5-2011)
- [17] ADC KRONE "Está su red lista para GPON".
<http://www.adckrone.com/eu/es/webcontent/support/PDFs/whitepapers/105525ES.pdf> (14-5-2011)
- [18] UIT-T "Recomendación UIT-T G-983.1: Sistemas de acceso óptica de banda ancha basados en redes ópticas pasivas" (01/2005).
- [19] UIT-T "Recommendation ITU-T G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics" (03/2008).
- [20] Apuntes de clase de "Comunicaciones Ópticas". Ingeniería técnica de Telecomunicación, Esp. Sistemas de Telecomunicaciones (UPV).
Curso 2009-2010.
- [21] Alpha ENGINYERIA DE TELECOMUNICACIONS "Proyecto de red FTTH GPON de Ribera-Roja d'Ebre" (07/10/2009).