



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS
PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES**

Manuel Fernando Román Velásquez

Asesorado por el Ing. Luis Armando Gálvez Catalán

Guatemala, octubre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS
PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL FERNANDO ROMÁN VELÁSQUEZ
ASESORADO POR EL ING. LUIS ARMANDO GÁLVEZ CATALÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

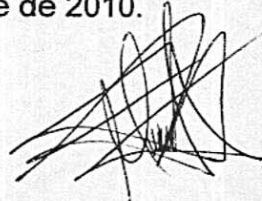
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. José Anibal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de noviembre de 2010.



Manuel Fernando Román Velásquez

Guatemala, 09 de junio de 2014

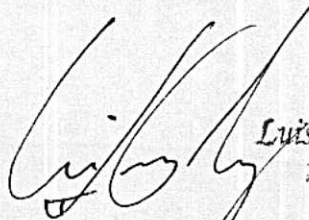
Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Área Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería USAC.

Ingeniero Guzmán:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "ANALISIS E IMPLEMENTACION DE TECNOLOGIA GPON, REDES OPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES", desarrollado por el estudiante Manuel Fernando Román Velásquez, con carné No. 2002-12360, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Luis Armando Gálvez Catalán
INGENIERO ELECTRÓNICO
COL. No. 9294

Ing. Luis Armando Gálvez Catalán
ASESOR
Colegiado 9294



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 32. 2014
Guatemala, 20 de JUNIO 2014.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES, del estudiante Manuel Fernando Román Velásquez, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



SFO



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 32. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MANUEL FERNANDO ROMÁN VELÁSQUEZ titulado: ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 18 DE JULIO 2,014.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 552.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA GPON, REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT, EN REDES DE TELECOMUNICACIONES**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Fernando Román Velásquez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 15 de octubre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme las bendiciones necesarias para finalizar mis estudios universitarios.
- Mis padres** José Manuel Román Palacios y Silvia Mercedes Velásquez Toledo, por haberme apoyado en todo el camino recorrido y por ser motivadores de mi superación.
- Mi esposa** Diana Lisseth Barrera Lemus, por ser mi apoyo en los triunfos y fracasos y alentarme a no detenerme nunca.
- Mis hijos** Fernanda Lisseth y Ángel David Román Barrera, por ser la motivación de mi vida.
- Mis hermanos** Douglas Velásquez y Gabriela Román Velásquez, por apoyarme en todo momento en mis estudios.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres

Manuel Román Palacios y Silvia Velásquez Toledo, por haber realizado tantos sacrificios durante todo el camino recorrido hasta mi graduación y haberme dado incluso lo que a ellos les faltaba para salir adelante.

Mi esposa e hijos

Diana, Fernanda y Ángel David Román Barrera, por motivarme día a día a finalizar mi carrera y animarme cada vez que veía frustrado mi sueño de graduarme.

Mis hermanos y sus familias

Por haberme acompañado en cada momento de la carrera y previo a ella, apoyándome en los momentos difíciles y de triunfos.

Mis abuelos

Por su cariño y cuidados hacia mi persona, ayudándome siempre a ser una mejor persona.

Familia Velásquez

Por compartir mi vida, recibir valiosos consejos y ejemplos de cada uno de ellos.

Familia Barrera Lemus

Por dejarme formar parte de su familia y apoyarme en los triunfos y fracasos.

**Ing. Luis Armando
Gálvez Catalán**

Por su amistad y aceptar ser mi asesor de trabajo de graduación, sin el cual no habría logrado esta meta.

**Amigos y compañeros
de trabajo**

Por compartir los momentos de trabajo arduo, deseos de superación, trabajo en equipo y amistad: Ing. Marcos Morales, Ing. Otto Arévalo, Ing. Antonio Figueroa, Ing. César Montejo, Ing. Christian Rojas, Luis Sarat, Ing. Juan Carlos González, Juan Ochoa, César Ramírez, Hugo Juarez, Deyvis Chuvac, Carlos Gómez, Carlos Aguilar, Luis Torres, Sergio Sigüenza, Ing. Tomás Arévalo, Sidney Cobaquil, Ing. Benjamín Alvarado, Miguel Salguero, Hector Coy, Wuilson Hernández, Renato Vásquez, Ingrid Contreras, Erick Camas, Ing. Pablo Chávez, Manolo Barillas, Gelión Osorio y Roberto Hsu.

**Amigos y compañeros
de estudio**

Por su gran amistad y ser apoyo en cada momento durante el camino de la carrera: Axel Morales, José Pérez, José Marroquin, Williams Morales, Mario Raxón, Edson López, Oscar Osorio, Hector Tzoc y Erick Moya.

Amigos de infancia

Por compartir cada día y hacer más sencillo haber llegado a este momento: Hiram Salazar, Pablo Monroy, Eduardo Guerra, Sergio Umaña, Salvador Ajuria, José Calito, Josué Monroy, Sergio Girón, Manolo Cabrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE COMUNICACIÓN Y SUS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	1
1.1. Tipos de redes de comunicaciones	2
1.2. Redes de comunicación convergentes	2
1.3. Topología física y lógica de una red	3
1.4. Principios de la comunicación	5
1.4.1. Origen, canal y destino	5
1.4.2. Protocolos de comunicación	6
1.4.3. Codificación y decodificación de la información.....	8
1.4.4. Encapsulación y desencapsulación de los mensajes	9
1.4.5. Tamaño de los mensajes.....	9
1.4.6. Sincronía de los mensajes.....	10
1.4.7. Patrones de los mensajes	11
1.5. Diseño jerárquico de redes de comunicación	11
1.6. Principales dispositivos que forman una red de comunicaciones.....	14
1.7. Medios de transmisión en las redes de comunicación	17

1.8.	Multiplexación y demultiplexación de la información	37
2.	REDES ÓPTICAS PASIVAS –PON (<i>PASSIVE OPTICAL NETWORKS</i>).....	41
2.1.	Introducción a los sistemas FTTH	41
2.2.	Configuraciones de una red FTTH	44
2.2.1.	Configuración punto a punto	45
2.2.2.	Configuración punto a multipunto	46
2.3.	Funcionamiento genérico de una red PON	50
2.3.1.	La OLT	51
2.3.2.	La ONT	56
2.3.3.	El divisor óptico (<i>splitter</i>)	60
2.4.	Multiplexación por división de onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)	67
2.5.	Variantes de las redes PON.....	70
2.5.1.	Estándar APON (<i>ATM Passive Optical Network</i>)	70
2.5.2.	Estándar BPON (<i>Broadband Passive Optical Network</i>).....	71
2.5.3.	Estándar EPON (<i>Ethernet PON</i>)	72
2.5.4.	Estándar GPON (<i>Gigabit Passive Optical Network</i>).....	74
3.	GPON – REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT (<i>GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORKS</i>).....	75
3.1.	Tasas de transmisión GPON.....	75
3.2.	Longitudes de onda GPON	77
3.3.	Cantidad de divisores y usuarios	77
3.4.	Arquitectura y configuración de una red GPON	79
3.5.	Atenuación de potencia óptica	83

3.6.	Codificación de la información.....	83
3.7.	Distancias permitidas en las redes GPON.....	84
3.8.	Corrección de errores.....	84
3.9.	Canales de transmisión.....	86
3.9.1.	Canal descendente.....	86
3.9.2.	Canal ascendente.....	97
4.	CASO DE APLICACIÓN DE UNA RED GPON.....	101
4.1.	Escenarios que GPON puede sustituir.....	103
4.2.	Solución GPON.....	106
4.2.1.	Esquemas de red GPON.....	107
5.	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN GPON.....	117
5.1.	Criterios de selección.....	117
5.2.	Escenario de aplicación.....	122
	CONCLUSIONES.....	139
	RECOMENDACIONES.....	141
	BIBLIOGRAFÍA.....	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Topología física de red.....	4
2.	Topología lógica de red.....	5
3.	Origen, canal y destino en la comunicación	6
4.	Diseño jerárquico de red	13
5.	Símbolo del <i>switch</i>	15
6.	Símbolo del <i>router</i>	16
7.	Cable UTP y conectores RJ-45.....	21
8.	Cable STP y su construcción	22
9.	Cable coaxial y su construcción	23
10.	Transmisión por microondas y sus principales componentes	27
11.	Reflexión total de la luz	28
12.	Fenómeno de refracción de la luz	29
13.	Ejemplo de reflexión de la luz	31
14.	Ejemplo de refracción de la luz	31
15.	Construcción de un cable de fibra óptica	36
16.	Elementos de un cable de múltiples hilos de fibra óptica	37
17.	Alcance de las redes FTTx.....	43
18.	Esquema genérico de una red PON	48
19.	Topologías lógicas de las redes PON	50
20.	Funcionamiento de la OLT a nivel global	55
21.	Funcionamiento del protocolo de difusión en una red PON	58
22.	Funcionamiento óptico interno de una ONT	59
23.	Funcionamiento genérico de un divisor óptico	61

24.	Comportamiento de un divisor FBT	63
25.	Comportamiento de un divisor PLC	64
26.	Representación básica de un sistema WDM	69
27.	GPON, interfaces UNI y SIN	80
28.	Esquema básico GPON	81
29.	Esquema de diversificación OLT	82
30.	Esquema diversificación total	82
31.	Codificación NRZ	84
32.	Transmisión en el canal descendente GPON	86
33.	Procedimiento <i>Sub Bytes</i> del proceso AES	87
34.	Procedimiento <i>Shift Rows</i> del proceso AES	88
35.	Procedimiento <i>Mix Columns</i> del proceso AES.....	89
36.	Procedimiento <i>Add RoundKey</i> del proceso AES	90
37.	Encapsulado de la trama ethernet sobre GEM	92
38.	Encapsulado de la trama ATM sobre GEM.....	94
39.	Encapsulación de la trama TDM	96
40.	Pila de protocolos en canal descendente: transmisión Ethernet.....	97
41.	Pila de protocolos en canal descendente: transmisión ATM.....	97
42.	Sincronización mediante el proceso <i>Ranging</i>	99
43.	Retardo de ecualización o <i>Ranging Time</i>	100
44.	Esquema general de entrega de clientes PDH: cobre y fibra	104
45.	Esquema general de entrega de clientes IP en cobre	105
46.	Esquema general de entrega de clientes IP en fibra óptica	106
47.	Esquema básico GPON	109
48.	Esquema GPON con aplicación de configuraciones redundantes.....	111
49.	Distribución de zonas en Quetzaltenango, Región Central.....	123
50.	Distribución hipotética de usuarios para aplicación GPON	124
51.	Identificación de zonas de potencial crecimiento GPON	125
52.	Nodos para ubicación de las OLT	127

53.	Ruta de fibra de interconexión de nodos.....	129
54.	Ubicación de <i>splitter</i> de primera etapa 2:N	130
55.	Ubicación de <i>splitter</i> de segunda etapa	131
56.	Distribución GPON entre nodo C y D.....	134
57.	Detalle de atenuaciones en esquema GPON.....	135

TABLAS

I.	Características principales de las redes FTTx	42
II.	Especificaciones de divisores 1x2 hasta 1x64	66
III.	Clasificación de las redes GPON en función de la calidad.....	79
IV.	Atenuación máxima por tipo de red GPON	133
V.	Atenuación por tipo de <i>splitter</i>	133
VI.	Atenuación por elementos de fibra óptica	134
VII.	Cálculo de la atenuación total de un segmento GPON	136

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
B	Ancho de banda
Θ	Ángulo Theta
bps	Bits por segundo
C	Capacidad del canal
byte	Conjunto de 8 bits
dB	Decibelio
bit	Dígito básico de la numeración binaria
E1	Formato de transmisión TDM con capacidad de 2.048 Mbps
E3	Formato de transmisión TDM con capacidad de 34 Mbps
GHz	Giga Hertz
Gbps	Gigabit por segundo
Hz	Hertzio, hercio o hertz
n1	Índice de refracción n1
n2	Índice de refracción n2
kbps	Kilobits por segundo
Kg	Kilogramo
λ	Longitud de onda
MHz	Mega Hertz
Mbps	Megabit por segundo
mts	Metros
mm	Milímetros

nm	Nanómetros
N	Nivel de ruido
S	Nivel de señal
ILmax	Pérdidas de inserción máximas - <i>maximal insertion loss</i>
ILmin	Pérdidas de inserción mínimas - <i>minimal insertion loss</i>

GLOSARIO

Ancho de banda	Rango de frecuencias en el cual se concentra la mayor parte de potencia de la señal. Tasa de transferencia máxima permitida por el sistema y por el medio.
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> – Modo de Transferencia Asíncrono. Método de transmisión que combina varios tipos de información para aprovechar al máximo el canal de transporte, utilizando conmutación de paquetes.
CDM	<i>Code División Multiplexing</i> – Técnica de Multiplexación en la que múltiples señales de datos se combinan sobre una banda de frecuencias en común.
Crosstalk	Fenómeno electromagnético en el que las señales en un circuito o conductor aparecen o afectan a un vecino.
Emisor	Objeto que recibe los mensajes dentro de un sistema de comunicación.
Ethernet	Tecnología más utilizada para la transmisión de datos.

FDM	<i>Frequency División Multiplexing</i> – Multiplexación por división de frecuencia. Técnica por la cual el ancho de banda se divide en varias sub-bandas de frecuencia.
Fibra óptica	Guía de ondas luminosas en forma de filamento.
Frecuencia	Número de repeticiones de una onda periódica en un lapso de tiempo.
Gateway	Interfaz que sirve como medio de comunicación entre dos segmentos de red distintos.
Interferencia electromagnética	Afectación sobre un elemento de comunicaciones por un agente externo.
Internet	Conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas entre sí.
IP	<i>Internet Protocol</i> – Protocolo de internet. Protocolo de comunicación de datos digitales que se clasifica en la capa de red del modelo OSI.
Longitud de onda	Distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos de una onda.

PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i> – Jerarquía digital plesiócrona. Tecnología utilizada para enviar varios tipos de información sobre un mismo medio utilizando TDM.
Protocolo	Conjunto de reglas y estándares que controlan el intercambio de información.
Receptor	Objeto que emite los mensajes dentro de un sistema de comunicación.
Red	Conjunto de equipos y software que interconectados entre sí comunican a usuarios.
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> – Jerarquía digital síncrona. Tecnología utilizada para la transmisión de información de forma sincrónica.
STM-1	<i>Synchronous Transport Module</i> – Módulo de transporte síncrono. Unidad básica de la jerarquía SDH y con capacidad de 155 Mbps.
Topología	Esquema definido para una red de comunicaciones.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se presenta la tecnología GPON, Red Óptica Pasiva con Capacidad Gigabit, la cual es una red de acceso, basada principalmente en el despliegue y utilización de la fibra óptica, lo más cercano posible a las localidades de los usuarios de redes de telecomunicaciones. Esto debido a la capacidad física que tiene la fibra óptica, de transportar grandes cantidades de información.

En el primer capítulo, se presentan los fundamentos teóricos que permiten comprender de una mejor manera las redes GPON y su funcionamiento, tales como conceptos de redes, esquemas de diseño, dispositivos utilizados y medios de transmisión que comunican las redes de telecomunicaciones.

En el capítulo dos, se analizan los fundamentos de las redes ópticas pasivas (PON), las tecnologías complementarias que GPON necesitan para su funcionamiento como TDM, TDMA y WDM, así como las variantes y los equipos principales que conforman las redes PON.

En el tercer capítulo, se explica la tecnología GPON, con las características que se consideran básicas para comprender su funcionamiento, tales como: tasas de transmisión, longitudes de onda, atenuación permitida, codificación de los mensajes, corrección de errores, entre otros.

En el cuarto capítulo se describen los casos en los que se considera conveniente la aplicación de redes GPON, y los esquemas de protección que

puede utilizar esta tecnología, para la protección de los diversos tipos de servicios que se entreguen por medio de ellas.

En el quinto capítulo, se muestra con ejemplos, un modelo de diseño que puede utilizarse para la implementación de GPON, desde la propuesta de diseño, análisis de cobertura, despliegue de fibra óptica necesaria, equipos a utilizar y cálculo de presupuesto óptico que se utiliza para la cobertura de clientes.

OBJETIVOS

General

Realizar una propuesta de implementación de GPON, redes ópticas pasivas con capacidad gigabit, en el campo de las redes de telecomunicaciones.

Específicos

1. Presentar una introducción a las redes de telecomunicaciones y sus principios de funcionamiento.
2. Explicar los principios de funcionamiento de las redes ópticas pasivas (PON).
3. Dar a conocer el funcionamiento, características de transmisión y componentes de la tecnología GPON.
4. Presentar los casos de aplicación y variantes de las redes GPON.
5. Realizar una propuesta de implementación completa de redes GPON.

INTRODUCCIÓN

Desde el momento en que el ser humano ha tenido la necesidad de comunicarse, la tendencia interminable de mejorar cada vez más el método de comunicación se ha hecho presente de época en época. Por esta razón se puede observar que constantemente se tiene evolución y mejora constante de los métodos de comunicación, las tecnologías, dispositivos y todo elemento que participa en este proceso.

Actualmente, en la era de las telecomunicaciones, en donde la mayoría de personas del planeta tiene acceso a algún medio de comunicación como teléfono, televisión, correo convencional y un porcentaje muy alto de esa mayoría lo tiene a servicios de internet, teléfono celular, televisión digital, redes sociales, entre otros. Se ve que la necesidad de comunicación se ha convertido en una obligación para hacer transferencias monetarias, acceso a noticias, comercio individual y de empresas, entre otros.

Mientras las telecomunicaciones prestan los medios para que se den estos tipos de intercambio de información, van creciendo las capacidades que cada usuario individual o colectivo necesita utilizar, al punto que las capacidades convencionales que se han tenido en estas redes, se mantienen también en una evolución constante.

En el proceso de esta evolución se tiene la necesidad puntual de optimizar las redes de fibra óptica, con las cuales se cuenta actualmente y que a su crecimiento sea posible obtener el mayor beneficio.

El estándar GPON, que es una variante de las redes PON, es una de las opciones que permite hoy en día el aprovechamiento de la capacidad de transporte de la fibra óptica, permitiendo llevar los servicios mencionados anteriormente a cada uno de los usuarios finales de una red de servicios de telecomunicaciones.

Con GPON se puede lograr la entrega de velocidades de transmisión de 1,2 Gbps de subida, 2,4 Gbps de bajada y distancias de hasta 20 kilómetros desde la localidad del proveedor de servicios hasta el cliente, lo cual es considerablemente mayor que las tecnologías anteriores al despliegue de fibra al cliente como el cobre, por ejemplo.

El estándar GPON permite a la vez la optimización de las redes de fibra óptica para los proveedores de servicios, ya que por cada hilo de fibra que sale de sus equipos se pueden entregar hasta 128 clientes, en lugar de los esquemas tradicionales de entrega de servicios, en los que se utiliza uno o dos hilos de fibra por cliente y las distancias no llegan a ser tan altas como las mencionadas. A la vez GPON, aprovecha al máximo los recursos del proveedor, ya que se cambia del esquema de puerto por cliente, al de muchos clientes por puerto de sus equipos.

1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES DE COMUNICACIÓN Y SUS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Una red o infraestructura de comunicaciones es un sistema construido para proporcionar la capacidad de mantener a distancia, un intercambio de información (en forma de datos, vídeo o una mezcla de los anteriores) y/o una comunicación de voz, con los respectivos elementos necesarios para lo anterior. Actualmente existe una tendencia clara que indica que todo tipo de información sea transportada por medio de las redes de datos.

Los elementos necesarios para formar una red de comunicaciones, comprenden equipos, programas informáticos y procedimientos para disponer de acceso a los servicios, el transporte de la información y los medios y procedimientos necesarios para poner en contacto a los extremos finales de la red que desean intercambiar información. Además, muchas veces los usuarios se encuentran en extremos pertenecientes a diferentes tipos de redes de comunicaciones, o en redes de comunicaciones que aun siendo iguales, son de distinta propiedad. En estos casos, hace falta contar con procedimientos de interconexión.

Dicho lo anterior, se puede mencionar que hay muchos tipos de redes que proporcionan diferentes clases de servicios. Por ejemplo, en el transcurso de un día, una persona puede hacer una llamada telefónica, mirar un programa de televisión, escuchar la radio, buscar algo en internet e incluso jugar un videojuego con alguien que se encuentra en otro país. Todas estas actividades dependen de redes distintas que deben ser sólidas y confiables. Las redes

tienen la capacidad de conectar personas y equipos sin importar en qué posición geográfica se encuentren.

1.1. Tipos de redes de comunicaciones

Debido a la gran cantidad de servicios que se valen de las redes de comunicaciones para llevar información, las características de la información transmitida, el número de usuarios que intervienen en el proceso de comunicación, entre otros. Hay una gran variedad de redes de comunicaciones, entre las cuales se pueden mencionar como las más sobresalientes:

- Red telefónica fija
- Red de telefonía móvil
- Red de televisión
- Redes de computadoras y datos

1.2. Redes de comunicación convergentes

La tecnología de comunicaciones en la década de mil novecientos noventa, y antes, requería redes independientes y dedicadas para diversos tipos de transmisión, tales como: voz, vídeo y datos informáticos. Cada una de estas redes requería un tipo diferente de dispositivo para poder tener acceso a la red. Los teléfonos, los televisores y las computadoras utilizaban tecnologías específicas y diversas estructuras de redes dedicadas para comunicarse. Sin embargo llegó el momento en que los usuarios finales desearon tener acceso a todos estos servicios de red de manera simultánea y buscando tener un único dispositivo que facilitara esto.

Se dio entonces la creación de una nueva clase de red, que proporciona más que un único tipo de servicio. A diferencia de las redes dedicadas, estas

nuevas redes, llamadas Convergentes, pueden proporcionar servicios de voz, vídeo y datos por el mismo canal de comunicación o la misma estructura de red.

En la actualidad, es posible ver transmisiones de vídeo en directo en la computadora, hacer llamadas telefónicas a través de internet o realizar búsquedas en internet mediante un televisor. Las redes convergentes hacen esto posible.

1.3. Topología física y lógica de una red

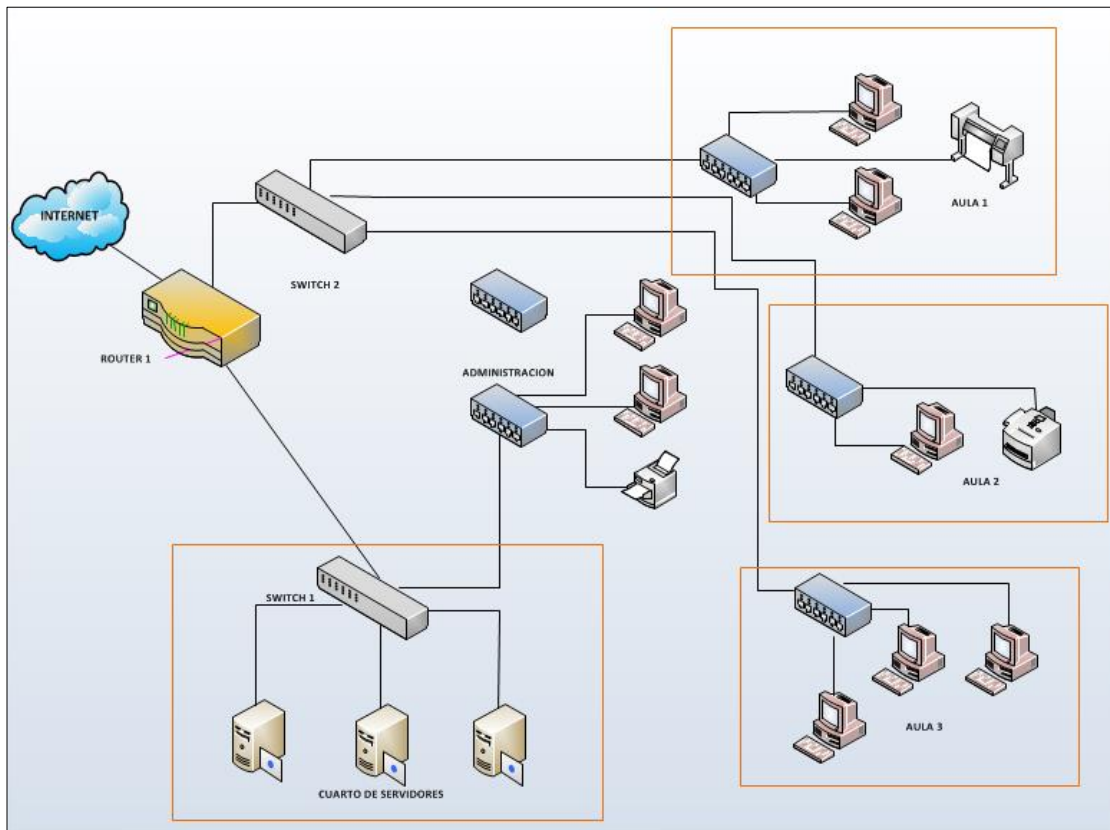
Se puede entender como topología, la forma en la que están interconectados los diferentes equipos en una red. En una red simple, compuesta por solo algunos componentes, es sencillo visualizar cómo se conectan los mismos. A medida que las redes crecen, es más difícil tener un memorizado de la ubicación de cada componente y cómo está conectado a la red.

Cuando se instala una red, se crea un mapa de la topología física para registrar dónde está ubicado cada elemento de red y cómo está conectado a la red. El mapa de la topología física también muestra cómo está distribuido el cableado y las ubicaciones de los dispositivos que funcionan en la red. En estos mapas de la topología, se utilizan íconos para representar los dispositivos físicos reales. Es muy importante mantener y actualizar los mapas de la topología física para facilitar futuras tareas de instalación y resolución de problemas.

Además del mapa de la topología física, a veces es conveniente tener también una representación lógica de la topología de red. Un mapa de la topología lógica agrupa los elementos de red, según el uso que hacen de la red, independientemente de la ubicación física que tengan. En el mapa de la

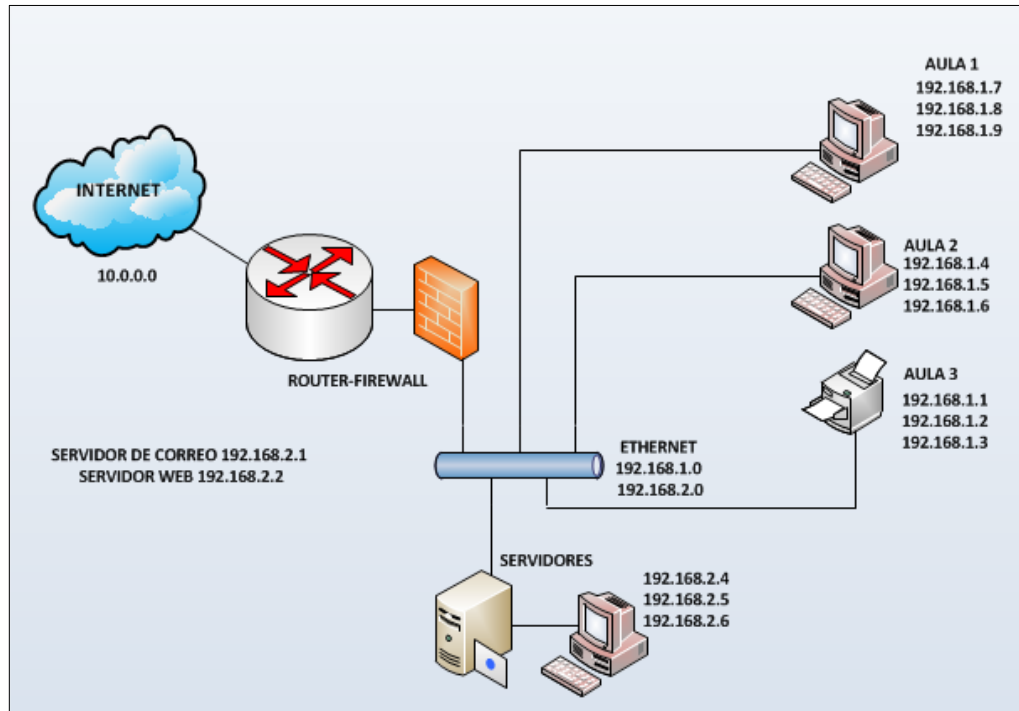
topología lógica se pueden registrar los nombres de los elementos de red, las direcciones, la información de los grupos y las aplicaciones. En las figuras 1 y 2, se muestran ejemplos de topología física y lógica de red.

Figura 1. **Topología física de red**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 2. **Topología lógica de red**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

1.4. Principios de la comunicación

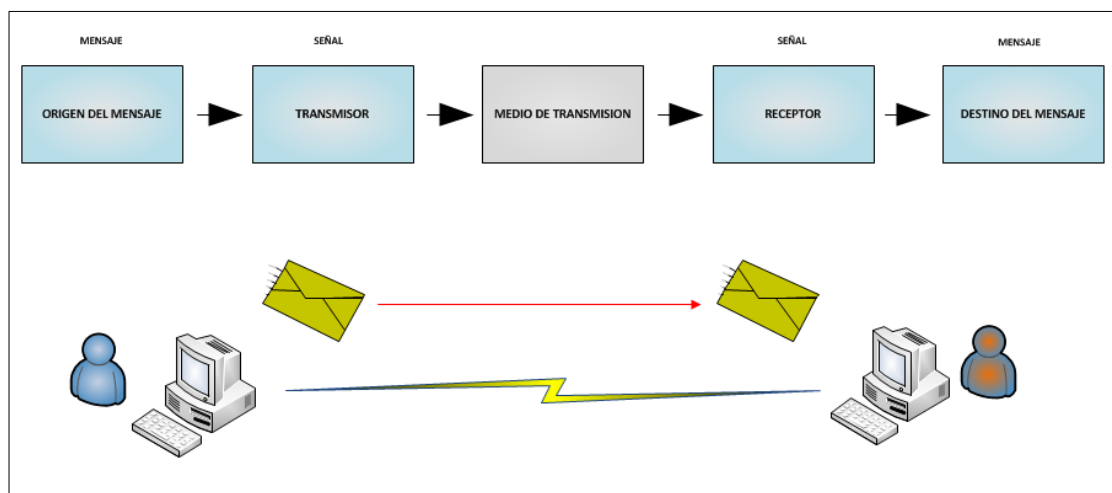
Los aspectos básicos de la comunicación entre dos puntos pueden ser los siguientes:

1.4.1. Origen, canal y destino

Todos los métodos de comunicación tienen como mínimo, tres elementos en común. El primero de estos elementos es el origen del mensaje, o emisor. El origen de un mensaje puede ser una persona o un dispositivo electrónico que necesite comunicar un mensaje a uno u otros individuos o dispositivos. El

segundo elemento de la comunicación es el destino, o receptor, del mensaje. El receptor recibe el mensaje y lo interpreta. El tercer elemento, llamado canal, proporciona el camino por el que el mensaje viaja desde el origen hasta el destino. Origen, canal y destino, se pueden observar en la figura 3.

Figura 3. **Origen, canal y destino en la comunicación**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

1.4.2. **Protocolos de comunicación**

En cualquier conversación, se deben seguir reglas, o protocolos, que los dos participantes deben respetar para que el mensaje se transmita y se comprenda correctamente. Los protocolos, se forman por “campos” necesarios para una comunicación satisfactoria, y entre estos “campos” se encuentran:

- Identificación del emisor y el receptor.
- Identificación del medio o canal de comunicación acordado (en persona, teléfono, cables, ondas electromagnéticas, entre otros).

- Identificación del modo de comunicación adecuado (hablado, escrito, ilustrado, interactivo o de una vía).
- Acordar un idioma común.
- Identificar la gramática y estructura del mensaje a transmitir.
- Velocidad y momento de entrega (Cantidad de información enviada por unidad de tiempo y confirmación de recibida la misma).

Los protocolos son específicos de las características del origen, el canal y el destino del mensaje. Las reglas utilizadas para comunicarse a través de un medio (por ejemplo, una llamada telefónica) no son necesariamente las mismas que las que se utilizan para comunicarse a través de otro medio (por ejemplo, vía un enlace de computadoras).

Los protocolos definen los detalles de la transmisión y la entrega de mensajes. Entre estos detalles se incluyen los siguientes aspectos:

- Formato de mensaje: estructura definida del mensaje, para asegurar su envío, recepción e interpretación correctos. Debe contener:
 - Un identificador del destinatario
 - Un saludo inicial
 - El contenido del mensaje
 - Un indicador de cierre
 - Un identificador del emisor
- Tamaño del mensaje: es necesario definir el tamaño de los mensajes, para que sean procesados correctamente y de acuerdo al medio o canal utilizado.

- Sincronización: es determinante que los participantes de un sistema de comunicación sean estrictos en los tiempos que indican cuándo enviar información, la velocidad con la que lo hacen, cómo detectar el inicio y fin de un segmento de mensaje y cuánto tiempo esperar una respuesta.
- Encapsulación, por ejemplo cuando los mensajes enviados cambian de alguna manera en su recorrido dentro de la red, por ejemplo ethernet sobre SDH.
- Codificación.
- Patrón estándar del mensaje.

1.4.3. Codificación y decodificación de la información

La codificación es el proceso que consiste en convertir el mensaje que se desea transmitir desde el idioma o lenguaje utilizado en la comunicación, hacia los símbolos o los sonidos necesarios para poder efectuar la transmisión. La decodificación revierte este proceso para interpretar la idea o recuperar el contenido del mensaje.

La codificación entre dispositivos de comunicación, debe tener el formato adecuado para el medio. Cuando se utiliza comunicación en formato digital, por ejemplo, el *host* emisor, primero convierte en bits los mensajes que se desean enviar a través de la red. Cada bit se codifica en un patrón de impulsos electrónicos, ondas de luz o en ondas electromagnéticas, según el medio de red a través del cual se transmitan los bits. El *host* de destino recibe y decodifica las señales para interpretar el mensaje.

1.4.4. Encapsulación y desencapsulación de los mensajes

Además de tener el formato correcto, la mayoría de los mensajes también debe colocarse, o encapsularse, en un almacenador para la entrega. El almacenador tiene la dirección del emisor y la del receptor, cada una colocada en el lugar adecuado del almacenador. Si la dirección de destino y el formato no son correctos, el contenido del almacenador no se entrega.

El proceso que consiste en colocar un formato de mensaje dentro de otro formato de mensaje, el almacenador, se denomina Encapsulación. Cuando el destinatario revierte este proceso y quita el mensaje del almacenador, se produce la Desencapsulación del mensaje.

1.4.5. Tamaño de los mensajes

Cuando se envía un mensaje largo de un equipo a otro a través de una red, es necesario separarlo en partes más pequeñas, para que los mensajes sean procesados de manera apropiada por los elementos de red. Las divisiones que se realizan, varían en tamaño dependiendo de la transmisión utilizada. Tal es el caso de tecnologías como redes ethernet y redes TDM (SDH, PDH), por mencionar algunas. Los paquetes IP de una red ethernet, tienen un tamaño diferente a una trama STM-1 de una red SDH.

Las reglas que controlan el tamaño de las partes, o tramas que se comunican a través de la red, son muy estrictas y son diferentes, de acuerdo con el canal utilizado. Los mensajes que son demasiado largos o demasiado cortos no se entregan.

Las restricciones de tamaño de los mensajes, requieren que el elemento de origen divida un mensaje largo en fragmentos individuales que cumplan los requisitos de tamaño mínimo y máximo. Cada fragmento se encapsula en una trama separada con la información de la dirección y se envía a través de la red. En el *host* receptor, los mensajes se desencapsulan y se vuelven a unir para su procesamiento e interpretación.

1.4.6. Sincronía de los mensajes

La sincronía es un factor determinante dentro del proceso de comunicación en una red, para que un mensaje pueda recibirse y comprenderse correctamente. Esto debido a que es necesario tener una correcta temporización, para que cada elemento de una red, sepa cuándo participar, la velocidad con la que debe comunicarse y cuánto tiempo debe esperar para tener una respuesta. Si no existe sincronía entre equipos que se encuentran dentro de una red, cada uno de ellos operará a una velocidad distinta que el otro, produciendo diversos problemas tales como:

- Ruido en servicios de voz
- Mala transmisión de servicios de fax
- Retardos en las redes de datos
- Pérdida de llamadas
- Congelamientos de imagen en servicios de video
- Caídas en los sistemas de telecomunicaciones

Estos problemas y otros se incrementarán conforme las velocidades de transmisión sean mayores, y las tecnologías de transmisión involucren un mayor procesamiento de datos.

Además de estas características es necesario que los equipos sepan cómo y cuándo responder cuando se produce algún error en la comunicación.

1.4.7. Patrones de los mensajes

Se definen los patrones de los mensajes en base al tipo de comunicación que se desea llevar a cabo por medio de una red de comunicaciones. Estos patrones pueden ser:

- Mensajes *Unicast*: este tipo de patrón se da cuando un emisor quiere comunicarse exclusivamente con un receptor único. Se conoce a este patrón como una comunicación uno a uno.
- Mensajes *Multicast*: este patrón se da cuando un emisor quiere comunicarse con un grupo específico de elementos de la red.
- Mensajes *Broadcast*: este patrón se da cuando un emisor necesita realizar comunicación con todos los elementos de la red de comunicaciones.

1.5. Diseño jerárquico de redes de comunicación

El diseño jerárquico de una red consiste en dividir una red grande en partes más pequeñas, más fáciles de administrar y que permitan limitar el tráfico que transita entre la red y que sin el diseño jerárquico, puede saturar las redes grandes que no se dividen. También permite que una comunicación entre áreas totalmente diferentes, requiera un proceso más sencillo, por tener un mejor control sobre las diversas áreas en las que se divide una gran red.

En el trabajo con redes, el diseño jerárquico se utiliza para agrupar dispositivos en varias redes organizadas mediante un enfoque en capas (de

acuerdo a sus funciones operativas). Se trata de grupos más pequeños y fáciles de administrar que permiten que el tráfico local siga siendo local. Solo el tráfico que está destinado a otras redes se transfiere a una capa superior.

Un diseño jerárquico en capas, hace más eficiente a una red, debido a que los equipos de cada capa tendrán funciones específicas, en lugar de ocuparse de muchas funciones a la vez, evitando el manejo de muchos protocolos y tecnologías que se tiene en redes sin diseño jerárquico. El diseño jerárquico optimiza las funciones de cada equipo, aumentando la relación costo-beneficio, permite un mejor diseño de red, escalabilidad, mantenimiento y detección de fallas.

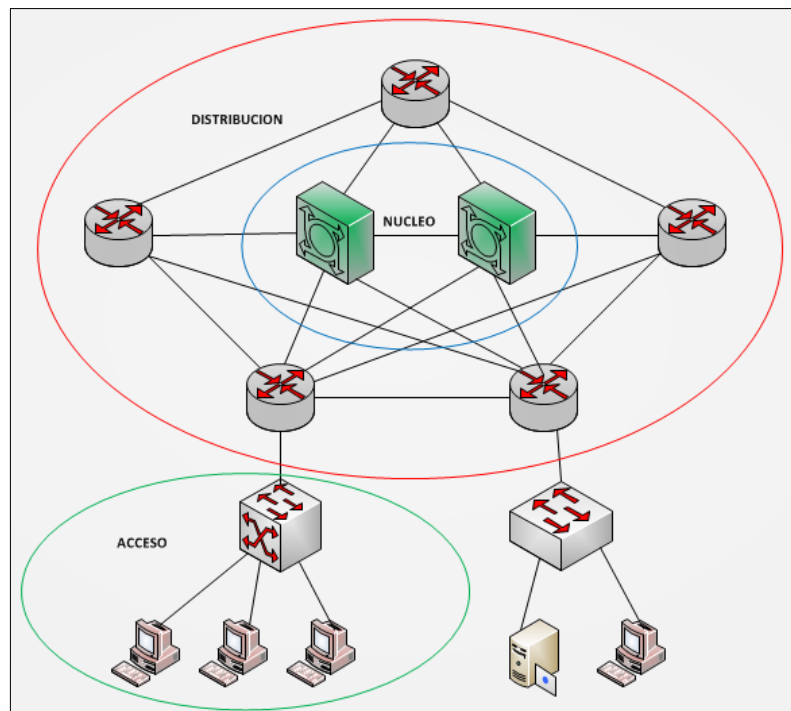
Las capas en las que puede estar segmentada una red pueden ser las siguientes:

- Capa de acceso: capa que proporciona conexiones a los sistemas de una red local o de usuarios finales. El ejemplo más básico de la capa de acceso es una serie de equipos de usuario final, conectados a un equipo que brinde conectividad a todos con la red de distribución, como un *switch*.
- Capa de distribución: capa que interconecta las redes locales más pequeñas o de la capa de acceso, para lograr que el tráfico local de una red pueda comunicarse con otras redes locales, que pueden estar separadas físicamente por mucha distancia. Los equipos en esta capa pueden o no estar conectados entre sí y tienen conectividad con la capa núcleo, la cual los comunica a altas velocidades. Esta capa puede realizar las funciones de ruteo, filtrado, seguridad, entre otros. De la

información proveniente de la capa de acceso hacia la capa núcleo o viceversa. En esta capa se encuentra por ejemplo el *router*.

- Capa núcleo: capa que brinda conexiones de alta velocidad entre dispositivos de la capa de distribución y que se comunica con otras capas núcleo de otras redes. También es llamada el *Backbone* (columna vertebral) de la red. Su función principal es la comunicación de paquetes a la mayor velocidad posible. En la figura 4, se muestra un ejemplo de diseño jerárquico de red.

Figura 4. **Diseño jerárquico de red**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

1.6. Principales dispositivos que forman una red de comunicaciones

Existen muchos dispositivos que pueden formar parte de una red de comunicaciones y que cumplen funciones específicas para que la transferencia de información se logre entre los usuarios de la misma. Lo anterior va de la mano con el tipo de información que se desea transmitir por medio de esa red de comunicaciones, ya que la información puede ser datos, voz, voz y datos, entre otros. Entre los dispositivos más importantes que se pueden encontrar en las redes de datos están:

- *Switch*: es un dispositivo de redes que funciona en la capa 2 del modelo OSI. En su función más simple, se utiliza como punto central de conexión de varias terminales. En una función más compleja, se conecta a uno o más *Switch* para crear, administrar y mantener enlaces. Procesa todos los tipos de tráfico de la misma forma, sin importar su uso.

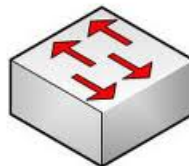
El *switch* envía tráfico basándose en las direcciones MAC *Media Access Control* (Control de Acceso al Medio) de los dispositivos, siendo una dirección MAC, una dirección física, única, que identifica a cada equipo dentro de la red.

Cada *switch* mantiene una tabla de direcciones MAC en la memoria de alta velocidad, en la cual se encuentra cada dirección de los dispositivos que el *switch* ve conectados a él. Con lo anterior, el *switch* puede enviar la información hacia cualquiera de los equipos conectados a él o a alguna red externa, basándose en la dirección MAC.

Cuando un equipo se conecta a un puerto del *switch*, crea una conexión dedicada entre ese puerto del *switch* y la matriz de conexiones que tiene

almacenada. Cuando dos equipos conectados desean comunicarse entre sí, el *switch* analiza la tabla de conmutación y establece una conexión virtual, o micro segmento, entre los puertos. El *switch* mantiene el circuito virtual hasta el final de la sesión. Al mismo tiempo puede haber varias conexiones virtuales activas, las cuales se dan entre distintos puertos del *switch*, no sobre el mismo. Se muestra en la figura 5 el símbolo más común del *switch*.

Figura 5. **Símbolo del *switch***



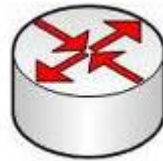
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Se puede mencionar, brevemente, que el *switch* puede utilizarse para direccionar el tráfico de una manera ordenada y evitar que el mismo se dirija a todos los elementos conectados a sus puertos. Son parte fundamental de la conmutación de tráfico entre las redes, por la rapidez de envío de tramas entre puertos y por consiguiente entre equipos. Permiten establecer configuraciones con redundancia que brinden la mayor protección a la red contra puntos de falla y brindan la posibilidad de conexión de varias redes o equipos, por su alto número de puertos.

- *Router*: es un dispositivo que tiene hardware y software especializado, utilizado para la interconexión de redes de comunicación, que permite conocer la ruta más apropiada para los paquetes de datos que se envían

entre las redes comunicadas. El *router* opera en la capa tres del modelo OSI. En la figura 6 se puede observar su símbolo.

Figura 6. **Símbolo del *router***



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Un *router* utiliza una tabla, llamada tabla de enrutamiento, que contiene todas las redes conectadas localmente y las interfaces que están conectadas a cada red. El *router* utiliza su tabla de enrutamiento, para determinar qué ruta o camino debe asignar a un paquete de información buscando la información guardada en su tabla de enrutamiento. También conoce las redes que se puede alcanzar por una interfaz, aunque las redes no estén conectadas localmente sino se alcancen por otra red.

Al realizar el análisis, de hacia dónde enviar la información, el *router* toma en cuenta los siguientes parámetros de cada ruta: dirección de destino, máscara de subred, interfaces de siguiente salto hacia otras redes y métrica o costo de la ruta, la cual se ve afectada por la cantidad de saltos, velocidad del enlace físico, hacia el destino.

Cuando un *router* recibe un paquete, examina la dirección IP de destino en ese paquete, para determinar a dónde debe reenviarlo. El *router* luego busca en la tabla de enrutamiento un valor de destino equivalente. El

router busca la máscara de subred asignada a cada posible ruta en la tabla. El *router* aplica cada máscara de subred a la dirección IP de destino en el paquete, específicamente, el campo de red de la misma. Luego, se compara la dirección de red resultante con la dirección de red de la ruta en la tabla. Si se produce una coincidencia, el paquete se envía a la interfaz correcta o al *gateway* correspondiente.

Si la dirección de red coincide con más de una ruta en la tabla de enrutamiento, el *router* utiliza la ruta que tenga la coincidencia de la dirección de red más específica o más larga. Todo el proceso anterior se lleva a cabo para que el paquete de datos sea encaminado hacia la red con la dirección correcta.

Entre las principales aplicaciones de un *router* se encuentran:

- La división de una red, en subredes más pequeñas sea por motivos de seguridad o motivos relacionados con la organización y administración de la misma
- Transferir el tráfico de una red a otra, dirigiendo el tráfico hacia redes remotas que no se encuentran conectadas localmente
- Aplicación de protocolos de enrutamiento, para mantener actualizada su tabla de enrutamiento, para determinar qué camino debe tomar la información para llegar a su destino correcto.

1.7. Medios de transmisión en las redes de comunicación

En el modelo de un sistema de comunicaciones, el medio de transmisión constituye el canal que permite el intercambio entre dos terminales. Dependiendo de la forma de conducir la señal a través del medio, los medios de

transmisión se pueden clasificar en dos grandes grupos, medios de transmisión guiados y medios de transmisión no guiados (cuando se produce radiación electromagnética).

Entre los medios guiados, se pueden mencionar los siguientes:

- Transmisión por impulsos eléctricos/cableado metálico, constituidos por un cable con conductores eléctricos que se encargan de la conducción de las señales desde un extremo al otro. Las principales características de los medios de este tipo, son el tipo de conductor utilizado, la velocidad máxima de transmisión, las distancias máximas que puede ofrecer entre repetidores, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y la facilidad de instalación. Su principal clasificación es en cable par trenzado y cable coaxial.

El cable par trenzado (TP *Twisted Pair*), es el más utilizado por la tecnología ethernet moderna, lo que hace este cable el más común en las redes locales. Los cables de par trenzado están compuestos por uno o más pares de cable de cobre aislados, trenzados entre sí y cubiertos por una funda protectora. Los cables se trenzan por dos razones principales:

- Para anular las interferencias de fuentes externas, como cables por los que circula corriente eléctrica.
- Para evitar el fenómeno de diafonía (*Crosstalk*) que se explica brevemente a continuación.

Los cables de par trenzado son sensibles a interferencias electromagnéticas, como la diafonía, un tipo de ruido que se manifiesta

cuando se agrupan los cables por largas distancias. La señal de un cable puede filtrarse e ingresar en los cables adyacentes.

En el cableado de par trenzado, el largo y la cantidad de trenzados por unidad afecta la resistencia a la interferencia que tiene el cable. El cable de par trenzado adecuado para transportar tráfico telefónico, conocido como CAT3, tiene 3 o 4 giros por pie, lo que lo hace menos resistente. El cable adecuado para la transmisión de datos, conocido como CAT5, tiene 3 o 4 giros por pulgada, lo que lo hace más resistente a la interferencia.

Existen dos tipos principales de cables de par trenzado: par trenzado no blindado (*UTP Unshielded Twisted Pair*) y par trenzado blindado (*STP Shielded Twisted Pair*).

Para el cable par trenzado no blindado UTP, sus especificaciones dictan el número de vueltas permitidas por pie de cable; el número de vueltas depende del objetivo y aplicación para la cual se instala el cable. El número de vueltas por medida de longitud, es un parámetro importante, debido a que es la base para la cancelación de fenómenos como las interferencias electromagnéticas.

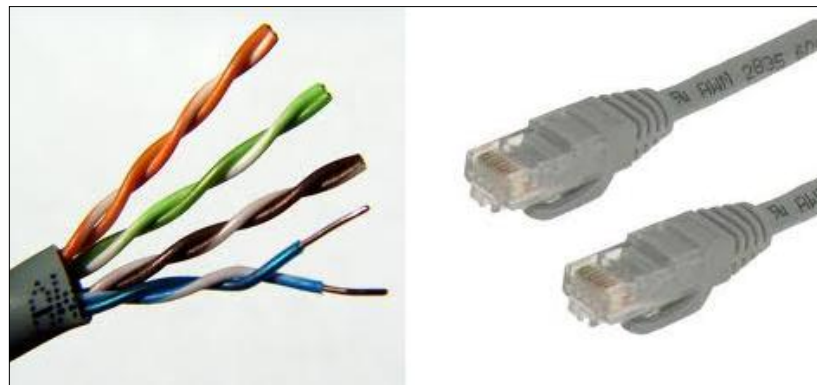
La especificación 568A, Estándar de cableado para localidades comerciales, de la Asociación de Industrias Electrónicas e Industrias de la Telecomunicación (EIA/TIA), especifica el tipo de cable UTP que se va a utilizar en una gran variedad de situaciones y construcciones. Su objetivo es asegurar la categoría del Cable UTP a utilizar en cada aplicación. Estos estándares definen cinco categorías de UTP:

- Categoría 1: hace referencia al cable telefónico UTP tradicional que resulta adecuado para transmitir voz, pero no datos.
- Categoría 2: certifica el cable UTP para transmisión de datos de hasta 4 megabits por segundo (Mbps), este cable consta de cuatro pares trenzados de hilo de cobre.
- Categoría 3: esta categoría certifica el cable UTP para transmisión de datos de hasta 16 Mbps, este cable consta de cuatro pares trenzados de hilo de cobre con tres entrelazados por pie.
- Categoría 4: esta categoría certifica el cable UTP para transmisión de datos de hasta 20 Mbps, este cable consta de cuatro pares trenzados de hilo de cobre.
- Categoría 5: esta categoría certifica el cable UTP para transmisión de datos de hasta 100 Mbps, este cable consta de cuatro pares trenzados de hilo de cobre.
- Categoría 5a: también conocida como Categoría 5+ o Cat5e. Ofrece mejores prestaciones que el estándar de Categoría 5. Para ello se deben cumplir especificaciones tales como una atenuación a la relación de *Crosstalk* de 10 dB a una frecuencia de 155 MHz.
- Categoría 6: posee las características necesarias para evitar el *Crosstalk* y el ruido. Puede utilizarse para el transporte de señales con frecuencia de 250MHz y 1 Gbps.

- Categoría 7: sus especificaciones para eliminación de ruido, son más estrictas que las categorías anteriores, ya que el blindaje ha sido agregado a cada par de cable individualmente y para el cable entero. Esta categoría fue emitida para permitir transporte de señales de hasta 10 Gbps en distancias de 100 mts.

Todas las categorías de cable UTP para datos terminan, tradicionalmente, en un conector RJ-45. En la figura 7 se puede observar el cable par trenzado no blindado UTP y la forma de sus conectores.

Figura 7. **Cable UTP y conectores RJ-45**



Fuente: *Cable UTP*. http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_par_trenzado. Consulta: 05/02/2014.

El cable STP, es similar al UTP, con la diferencia que cada par tiene una pantalla protectora, además de tener una lámina externa de aluminio o cobre trenzado alrededor del conjunto de pares, diseñada para la absorción de interferencias como el *Crosstalk* o la interferencia electromagnética. Con esto se pueden soportar mayores tasas de transmisión y a distancias mayores.

En la figura 8 se observa el cable par trenzado blindado STP y su construcción básica.

Figura 8. **Cable STP y su construcción**



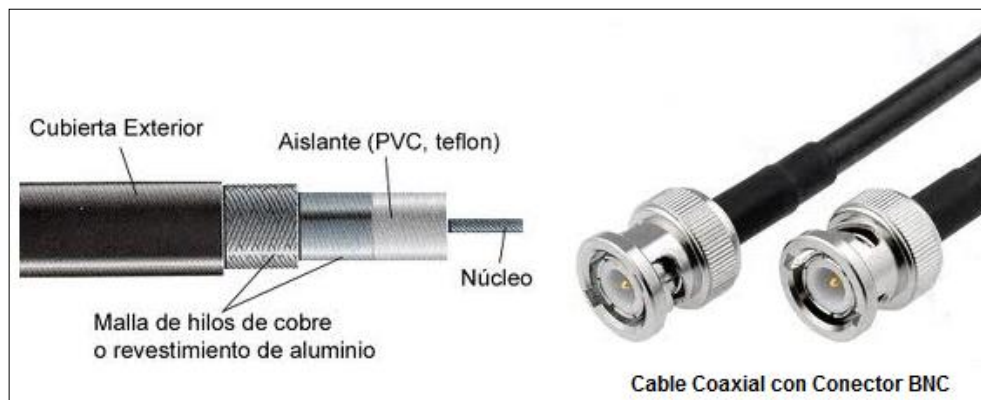
Fuente: *Cable STP*. http://es.wikipedia.org/wiki/Shielded_twisted_pair. Consulta: 05-02-2014.

El cable coaxial, proporciona un blindaje mejorado, en comparación con el cable UTP, por lo que tiene una menor relación señal/ruido y, por lo tanto, puede transportar más datos. Es utilizado a menudo para transmisión de señal de TV, conexión de equipos de interfaces PDH, entre otros. Su construcción es generalmente, una trenza metálica protectora contra interferencia electromagnética, aislante contra interferencias y mayor solidez, y el conductor en sí, que en la mayor parte de casos está hecho de cobre y se remata con un conector BNC o un conector F para servicios de TV.

A pesar de que el cable coaxial ha mejorado las características de la transmisión de datos, el cableado de par trenzado lo ha reemplazado en las redes de área local. Algunas de las razones para el reemplazo son que, en comparación con el UTP, el cable coaxial es físicamente más

difícil de instalar, más costoso y menos útil para la resolución de problemas. En la figura 9, se puede observar la construcción del cable coaxial mencionado.

Figura 9. **Cable coaxial y su construcción**



Fuente: *Cable Coaxial*. [https://www.google.com.gt/coaxial cable](https://www.google.com.gt/coaxial%20cable). Consulta: 06-02-2014.

- Transmisión por ondas electromagnéticas – redes inalámbricas, son el tipo de transmisión entre dos nodos o equipos sin necesidad de una conexión física. La transmisión se da por ondas electromagnéticas, las cuales viajan a través del aire o espacio vacío.

Entre sus principales ventajas está el poder comunicar sitios, los cuales no pueden hacerlo por medio de cableados físicos, reducción en los costos de transmisión, ya que se elimina todo el cable ethernet y conexiones físicas entre nodos, lo cual requiere espacios físicos reducidos para instalación de equipos. Sirven para comunicar equipos que se encuentran en constante movimiento, tales como teléfonos celulares, computadoras personales, entre otros.

A su vez, las principales limitaciones o problemas que presenta un sistema de comunicación por ondas electromagnéticas tiene, son: interferencias, en donde las frecuencias en las que operan los equipos a comunicar, sean similares a las de otros sistemas, lo cual puede causar pérdidas o caída completa del sistema de comunicación. También se ven afectados por las condiciones climáticas y la forma del terreno. En lo referente a permisos, es necesario contar con los mismos para licencias de transmisión y uso de frecuencias.

Entre algunos tipos más sobresalientes de redes inalámbricas, se pueden mencionar desde las redes infrarrojas, las cuales tienen una energía relativamente baja y no pueden atravesar paredes ni obstáculos. Se usan comúnmente para conectar equipos en comunicación uno a uno.

Se encuentran también los sistemas de ondas de radio frecuencia (RF), las cuales tienen la característica de poder atravesar paredes y otros obstáculos, lo que brinda una mayor capacidad de transmisión y alcance que el infrarrojo. Las ondas de radio frecuencia son ampliamente utilizadas para comunicar dispositivos de telefonía celular.

Transmisión por micro ondas, es otro tipo de transmisión inalámbrica, que se utiliza con mayor frecuencia en redes de telecomunicaciones, para servir como medio de transmisión entre sitios remotos, los cuales no pueden comunicarse por medios físicos. Micro ondas, son las ondas electromagnéticas cuyas frecuencias van desde los 500 MHz hasta los 300 GHz y permiten establecer comunicación a muy largas distancias, con gran capacidad de transporte (actualmente al menos 155 Mbps), utilizan antenas de bajo tamaño.

Por ejemplo, el rango de frecuencias 12, 18 y 23 GHz, es capaz de conectar dos localidades entre 1 y 25 kilómetros de distancia una de la otra. Los enlaces que operan entre 2 y 6 GHz puede transmitir a distancias entre 30 y 50 kilómetros.

Generalmente, un sistema de transmisión por microondas, está compuesto por una IDU (*Indoor Unit*), la cual se compone de los módulos necesarios que permitan las conexiones eléctricas u ópticas a nivel local, unidades para generar la modulación hacia la unidad de RF, módulos de ventilación y alimentación. Las IDU se encuentran instaladas generalmente, a nivel de nodo o gabinetes terrestres.

La Unidad de RF u ODU (*Outdoor Unit*), incluye las interfaces de aire que permitan la transmisión hacia las antenas y los amplificadores de potencia. Se instalan normalmente cerca de las antenas, para disminuir la pérdida de potencia en las líneas de guía de onda o cable coaxial.

Otro componente de este tipo de transmisión, son los cables o guías de onda, que realizan la conexión entre las IDU y las ODU. Por último se encuentran las antenas, las cuales se encargan de convertir una señal eléctrica en una señal electromagnética que puede propagarse por el aire.

Una antena es un dispositivo diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia/desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma señales eléctricas en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa.

Existen actualmente, muchos tipos de antenas, las cuales han sido diseñadas dependiendo del uso necesario. En algunos casos, deben expandir en la mayor área posible, la potencia radiada, en cuyo caso son llamadas omnidireccionales. En otros casos deben ser directivas, para concentrar toda la potencia radiada en una determinada dirección.

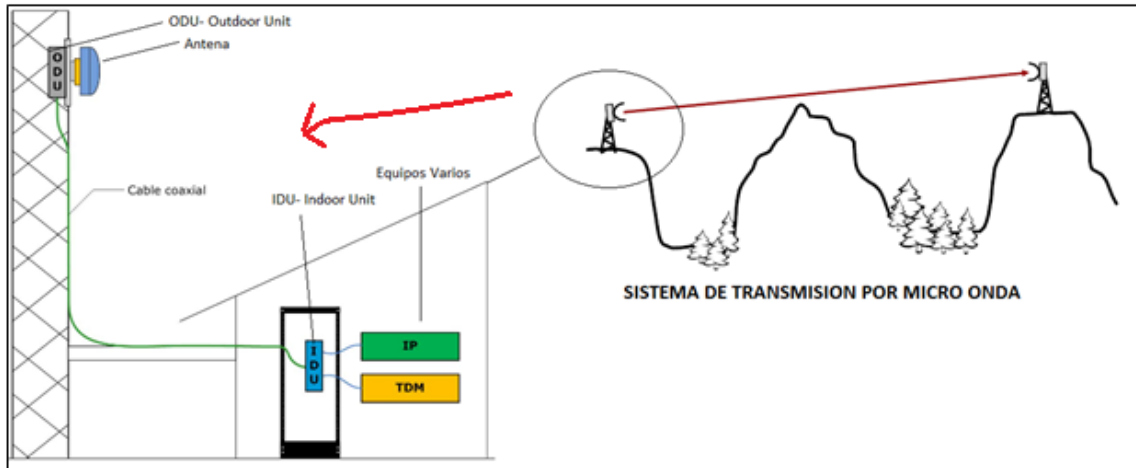
Para los enlaces de micro ondas, se utilizan las antenas directivas de tipo parabólico, con diámetros de alrededor de 0,3 a 3 mts. Estas necesitan una línea de vista o trayecto libre entre una y otra, para que el haz de transmisión no se vea afectado.

Las características de las antenas, dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de radiofrecuencia transmitida o recibida. Algunos de los parámetros importantes a tomar en cuenta en la implementación de antenas son: patrón de radiación, ancho de banda, directividad, ganancia, eficiencia, impedancia de entrada, ancho de haz y polarización.

Entre las consideraciones principales para implementar un enlace de micro ondas, se pueden resumir los factores: línea de vista, factores climáticos y topográficos de la región, gases y vapores, capacidad requerida del enlace, espacio y altura para instalación de antenas, entre otros.

En la figura 10 se puede observar a la derecha, un sistema de transmisión por micro ondas, el cual permite comunicación en lugares limitados para los tendidos de cable. A la izquierda se muestran los principales componentes de estos sistemas.

Figura 10. **Transmisión por microondas y sus principales componentes**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint 2010.

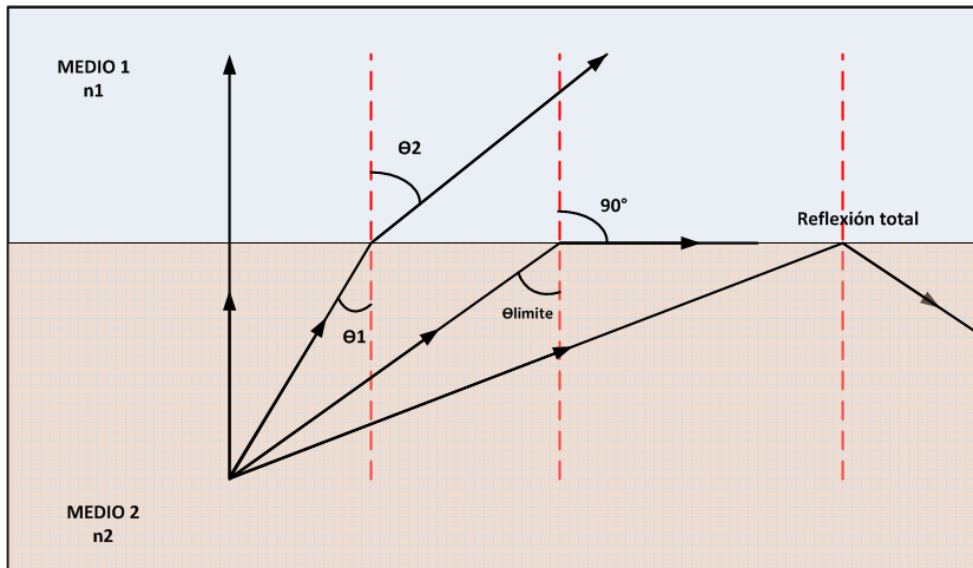
- Transmisión por pulsos luminosos-fibra óptica, cuyo principio es transmitir una señal a través de una fibra óptica, a un receptor distante. La señal eléctrica es convertida al dominio óptico en el transmisor y se vuelve a convertir en la señal original eléctrica en el receptor. La fibra óptica se comporta como una guía de onda, dieléctrica, que opera a frecuencias ópticas.

Cuando la luz llega a una superficie que funciona como límite, con un índice de refracción menor, se refleja en gran parte y si hay una mayor diferencia de índices de refracción y mayor el ángulo de incidencia, se habla entonces de reflexión interna total.

La reflexión total se consigue cuando un rayo de luz se propaga en un medio con índice de refracción n_1 , incidiendo con un ángulo θ_1 sobre una superficie, sobre un medio con índice n_2 . Si $n_1 > n_2$, el rayo de luz

puede reflejarse por completo dentro del medio de índice de refracción mayor. Este fenómeno es aprovechado en la fibra óptica para que a través de su núcleo sea transportada la información en forma de impulsos de luz. En la figura 11 se puede observar que en cierto ángulo límite, el rayo de luz se reflejará por completo dentro del medio.

Figura 11. **Reflexión total de la luz**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

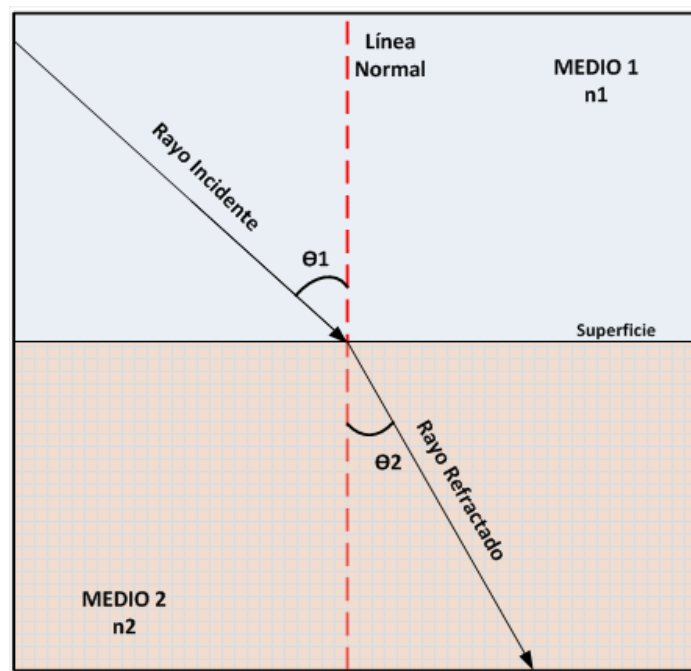
En el interior de una fibra óptica, la luz se va reflejando contra las paredes en ángulos muy abiertos, de tal forma que prácticamente avanza por su centro. De este modo, se pueden guiar las señales luminosas sin pérdidas por largas distancias.

Al hablar de transmisión óptica, es necesario hablar de refracción, la cual se puede explicar como el cambio de dirección que experimenta la luz al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide

oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina por el cambio de velocidad de propagación de la onda.

En la figura 12 se muestra cómo un rayo de luz, se ve afectado por el fenómeno de refracción al incidir sobre una superficie.

Figura 12. **Fenómeno de refracción de la luz**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

El funcionamiento de la fibra óptica para el transporte de luz, explicado anteriormente, se sustenta principalmente con la Ley de Snell, la cual considera que al haber dos medios caracterizados por índices de refracción n_1 y n_2 separados por una superficie S , los rayos de luz que

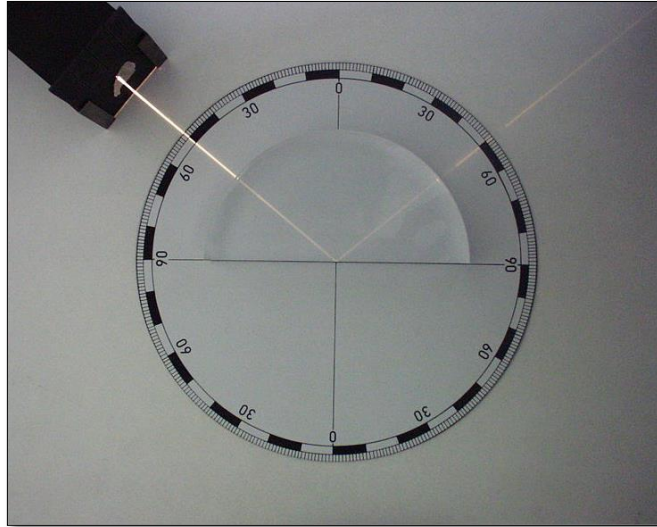
atraviesen los dos medios, se reflejarán en la superficie, variando su dirección de propagación dependiendo del cociente entre los índices de refracción n_1 y n_2 .

Para un rayo luminoso con un ángulo de incidencia θ_1 sobre el primer medio, ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, se tendrá que el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo de refracción θ_2 cuyo valor se obtiene por medio de la Ley de Snell. De las s mostradas anteriormente, se puede definir la Ley de Snell de acuerdo a la ecuación (1.1)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{1.1}$$

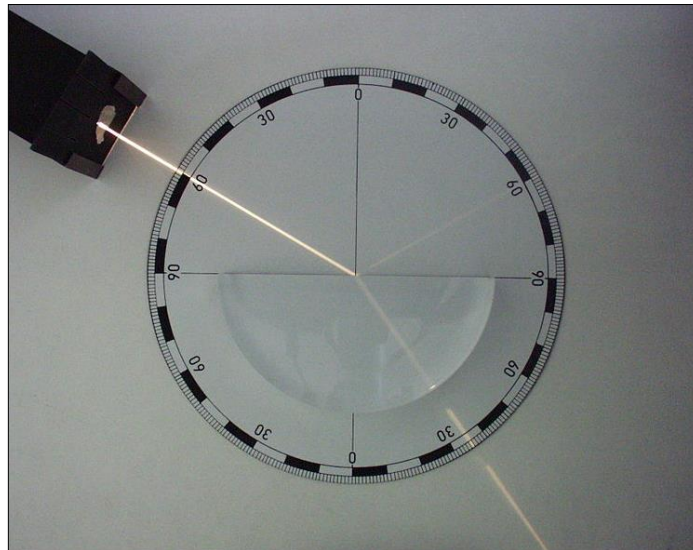
En las figuras 13 y 14 se observa el fenómeno de reflexión y refracción de la luz, aprovechados en la fibra óptica para la transmisión de la misma.

Figura 13. **Ejemplo de reflexión de la luz**



Fuente: *Reflexión de la luz*. [http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi3n_\(f3sica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi3n_(f3sica)). Consulta: 10-02-2014.

Figura 14. **Ejemplo de refracci3n de la luz**



Fuente: *Refracci3n de luz*. [http://es.wikipedia.org/wiki/Refracci3n_\(f3sica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Refracci3n_(f3sica)). Consulta: 10-02-2014.

Características de la fibra óptica: la implementación de un sistema de comunicación óptico tiene varias ventajas sobre otros métodos de transmisión, tales como cobre e inalámbricos:

- Una señal puede ser enviada a distancias muy grandes, de hasta 200 km, sin necesidad de regeneración.
- La señal transmitida no es sensible a perturbaciones electromagnéticas. Como la fibra no conduce electricidad, es prácticamente insensible a perturbaciones de RF.
- El cable de fibra óptica es apropiado para transmitir datos a velocidades muy altas y con grandes capacidades debido a la carencia de atenuación de la señal y a su pureza.
- La fibra óptica provee una capacidad mucho mayor que el cobre o cables coaxiales. La capacidad de transportar información de un sistema de comunicación (óptico, en el presente caso), es directamente proporcional a su ancho de banda y se ve afectado por el ruido. Se puede definir la capacidad de un canal de comunicaciones por la ecuación de Shannon (1.2):

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ bps} \quad (1.2)$$

La ecuación indica que la capacidad de un canal de comunicaciones, es proporcional al ancho de banda y a la relación señal a ruido del canal.

- 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 o por los impulsos electromagnéticos
- El cable de fibra óptica es mucho más ligero y pequeño que los cables de cobre. Un cable de 64 fibras ópticas, tiene un diámetro total de 15 a 20 mm. y un peso promedio de 250 Kg/km. Comparando estos valores con los de un cable de 900 pares de cobre calibre 0,4 con peso aproximado 4 000 Kg/Km y diámetro 40 a 50 mm, se puede ver la diferencia en lo mencionado.

Por tanto, un cable de fibra puede contener un número mucho mayor de fibras en un área mucho menor. Por ejemplo, un solo cable de fibra, puede contener 144 fibras en un diámetro aproximado de 25 mm.

- La fibra óptica es muy confiable, flexible (teniendo un ángulo de doblez máximo aproximado de 35° o un valor mínimo de radio de curvatura de 20 veces el diámetro del cable) y no sensible a vibraciones.
- La vida media de la fibra óptica y el tiempo medio para la ocurrencia de fallos en ella, es mucho mayor a los mismos tiempos para los conductores de cobre.
- Algunos de los factores más importantes a tomar en cuenta de un sistema de comunicaciones óptico, son atenuación, ancho de banda, dispersión y la construcción de la fibra en sí.

La atenuación, se define como la pérdida de potencia óptica, conforme la señal atraviesa la fibra y se puede dar fundamentalmente por absorción, dispersión. La disminución del nivel de potencia se expresa en dB o como una relación pérdida por unidad de distancia (dB/km).

En algún punto, el nivel de potencia, se vuelve muy bajo para que el receptor pueda distinguir entre la señal óptica pura y el ruido ambiental, que dentro de la fibra óptica, se debe fundamentalmente a la vibración térmica de los electrones. Estas características, constituyen la atenuación óptica.

La dispersión, se define como el esparcimiento o ensanchamiento de los pulsos de luz conforme la luz atraviesa la fibra. A la vez se va limitando la capacidad de transporte de información, porque se reduce el ancho de banda efectivo disponible para transmitir. La dispersión afecta predominantemente a altas tasas de transmisión o en transmisión a muy largas distancias.

El ancho de banda, se define por el contenido de frecuencias que puede transferirse por un medio, y según el principio de la transformada de Fourier, la duración de los impulsos determina el contenido de frecuencias y por tanto, es la cantidad de información que se puede transmitir por la fibra óptica en un periodo de tiempo dado.

También se le puede definir como el tamaño del rango de frecuencias que pueden transmitirse por una fibra óptica. El ancho de banda determina la máxima capacidad de información

transmitida en un canal por una distancia determinada. La misma se puede expresar en MHz*km (Mega Hertz por kilómetro).

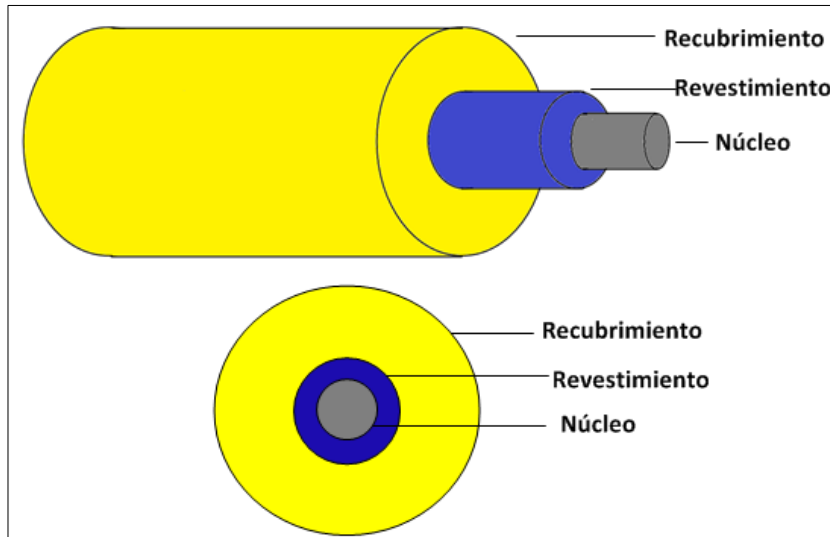
- La construcción de la fibra es un parámetro muy importante para que se cumpla con la transmisión de luz con grandes capacidades.

La fibra óptica puede presentarse como un solo hilo o como un cable con varios pares de hilos. Cada hilo de fibra óptica está constituido por un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, cada uno rodeado de una capa de revestimiento que tiene un índice de refracción ligeramente menor, de forma que actúa como una capa reflejante (a modo de espejo) consiguiendo que las ondas de luz que intentan escapar del núcleo sean reflejadas y retenidas en el mismo.

Todo se rodea de un forro protector que protege mecánicamente el mismo, a modo de amortiguador, protegiendo el núcleo y el revestimiento de posibles daños agentes externos.

En la figura 15 se observa la construcción de un cable de fibra óptica básico.

Figura 15. **Construcción de un cable de fibra óptica**

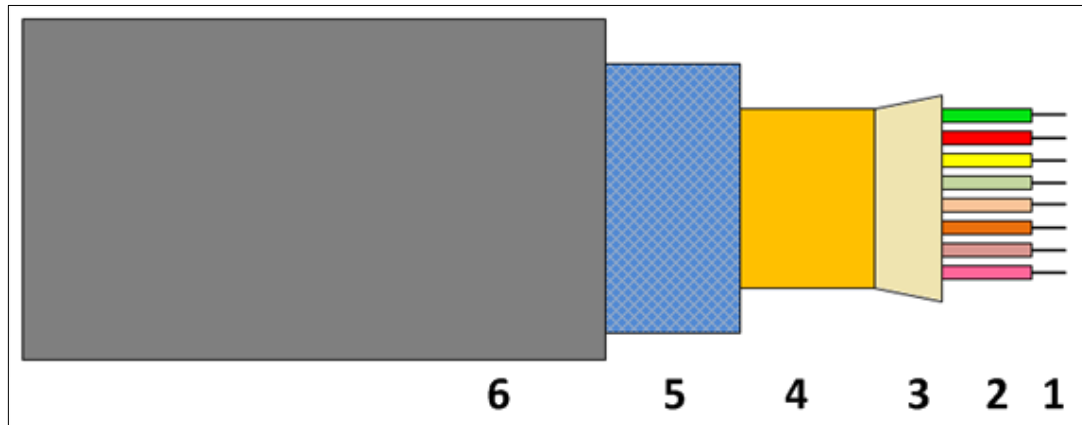


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Paint 2010.

Cabe destacar que las fibras ópticas no suelen presentarse como cables aislados, sino que suelen fabricarse como estructuras agrupadas bajo una misma cubierta, típicamente de 8, 24, 48, 96 y 144 fibras. Lo anterior se muestra en la figura 16, en donde se pueden observar los siguientes elementos:

- Hilos de fibra óptica.
- Protección secundaria.
- Elemento de tracción, generalmente de aramida, fibra de vidrio o Kevlar.
- Cubierta interna protectora de PE, PVC o poliuretano.
- Coraza protectora, generalmente de acero.
- Cubierta exterior protectora.

Figura 16. **Elementos de un cable de múltiples hilos de fibra óptica**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

1.8. Multiplexación y demultiplexación de la información

Se define a la multiplexación de la información, como el proceso de combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión, usando para esto un dispositivo llamado multiplexor. Un multiplexor consta de circuitos combinatoriales con varias entradas y una única salida de datos y entradas de control, las cuales son capaces de seleccionar solamente una de las entradas de datos cada vez, para permitir su transmisión desde la entrada seleccionada hacia la salida mencionada.

En el campo de la electrónica, el multiplexor se utiliza como dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido. Para ello lo que hace es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varios equipos o nodos puedan comunicarse al mismo tiempo o intervalos sucesivos dentro de un período de tiempo.

Una señal que ha sido multiplexada, debe demultiplexarse en el extremo contrario para obtener cada una de las señales individuales, que fueron colocadas dentro del medio de comunicación compartido. Este proceso es llamado demultiplexación. Para el proceso se utiliza un dispositivo llamado demultiplexor, que puede recibir a través de una interfaz compartida, una señal compleja multiplexada (puede ser tanto analógica como digital, y estar multiplexada en cualquiera de las distintas formas posibles para cada una de ellas) y separar las distintas señales integrantes de la misma encaminándolas a las salidas correspondientes para cada señal.

Existen muchas estrategias de multiplexación, según el protocolo de comunicación empleado, que pueden combinarse para alcanzar el uso más eficiente; las más utilizadas son:

- Multiplexación por división de tiempo o TDM (*Time division multiplexing*).
- Multiplexación por división de frecuencia o FDM (*Frequency - division multiplexing*).
- Multiplexación por división de longitud de onda o WDM (*Wavelength división multiplexing*).
- Multiplexación por división en código o CDM (*Code division multiplexing*).

Cuando se habla de multiplexación por división de longitud de onda WDM se refiere a la tecnología que combina o multiplexa varias señales ópticas sobre una sola fibra óptica, mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda. Cada portadora es creada por un diodo Laser de alta precisión, el cual es muy preciso y tiene una dispersión cromática mínima.

El objetivo de una combinación de este tipo es aprovechar el grandísimo ancho de banda de la fibra óptica, para transportar muchas señales, cada una con una longitud de onda diferente viajando por el mismo medio. Se puede mencionar que una sola fibra tiene el potencial de anchos de banda de hasta 50 THz (10^{12} Hz) y utilizando WDM, este ancho de banda puede ser dividido en múltiples canales no traslapados en frecuencia o longitud de onda. Con esto se puede transportar por una sola fibra, hasta 100 canales con velocidades de transmisión de hasta 10 Gbps y más.

Uno de los puntos más importantes para WDM, es la forma de acomodar la información de tasas bajas de transmisión dentro de tubos de muy altas capacidades. Algunas formas de implementación basadas en WDM son las siguientes:

- *SDM (Space - Division Multiplexing)*, multiplexación por división de espacio, la cual divide el espacio físico asignado para cada longitud de onda dentro de la fibra óptica, para incrementar el ancho de banda de transporte.
- *FDM (Frequency - Division Multiplexing)*, multiplexación por división de frecuencia, la cual divide el espectro de frecuencia disponible en un grupo de canales independientes. El uso de FDM en una red óptica, es llamado *DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)*, multiplexación por división de longitud de onda densa, que permite transportar sobre un hilo de fibra óptica hasta 72 portadoras ópticas, según la rejilla de portadoras definida por la recomendación ITU-T G.694.1.
- *TDM (Time - Division Multiplexing)*, multiplexación por división de tiempo, divide el ancho de banda en el dominio del tiempo en intervalos de

tiempo, llamados *time-slots* de tamaño fijo. Usando TDM, múltiples señales pueden compartir una longitud de onda, si no se traslapan en el tiempo.

- PDM (*Packet - Division Multiplexing*), multiplexación que provee servicios de “circuitos virtuales” en una red IP/MPLS sobre una arquitectura de red WDM. El ancho de banda de un canal WDM es compartido por múltiples flujos de tráfico o circuitos virtuales.

2. REDES ÓPTICAS PASIVAS –PON (*PASSIVE OPTICAL NETWORKS*)

Sistemas FTTX

Los sistemas FTTx (*Fiber To The x*) son medios de transmisión para redes de acceso de banda ancha sobre fibra óptica, desde las centrales de servicios hasta las instalaciones de los clientes o hasta puntos muy cercanos a ellos.

El acrónimo FTTx se origina como generalización de las distintas configuraciones desplegadas (FTTN, FTTC, FTTB, FTTH), diferenciándose por la última letra que denota los distintos destinos de la fibra, nodo, acera, edificio y hogar (*Node, Curve, Building y Home*).

2.1. Introducción a los sistemas FTTX

Los sistemas de transmisión FTTx comprenden un conjunto de tecnologías basadas en el transporte de señales digitales a través de fibra óptica como medio de transmisión. Existen diferentes niveles de alcance, en función del grado de acercamiento de la fibra óptica hasta el usuario final, que surgen como consecuencia de un mayor o menor abaratamiento de estos sistemas.

Todas las redes FTTx admiten una configuración lógica de red en árbol o estrella, en bus, y en anillo, y en todas ellas con la posibilidad siempre de utilizar componentes activos dependiendo de la localización de los usuarios o

clientes finales. Las denominaciones y características, según el grado de penetración de las redes FTTx, se recogen en la tabla siguiente:

Tabla I. **Características principales de las redes FTTx**

Denominación	Alcance	Distancia Métrica
FTTH	<i>Fiber To The Home</i> (Fibra hasta el Hogar)	Fibra óptica desde la central hasta el punto terminal de red en cada hogar
FTTB	<i>Fiber To The Building or Bussiness</i> (fibra hasta el edificio o negocio)	Fibra óptica desde la central hasta el cuarto de telecomunicaciones del edificio, sin incluir tendido hasta el hogar
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i> (fibra hasta la acera)	Fibra Óptica desde la central hasta una distancia del edificio entre 300 – 600 m
FTTN	<i>Fiber To The Node</i> (fibra hasta el nodo)	Fibra óptica desde la central hasta el nodo donde se concentran los servicios, normalmente a una distancia del edificio entre 1,5 – 3 km

Fuente: elaboración propia.

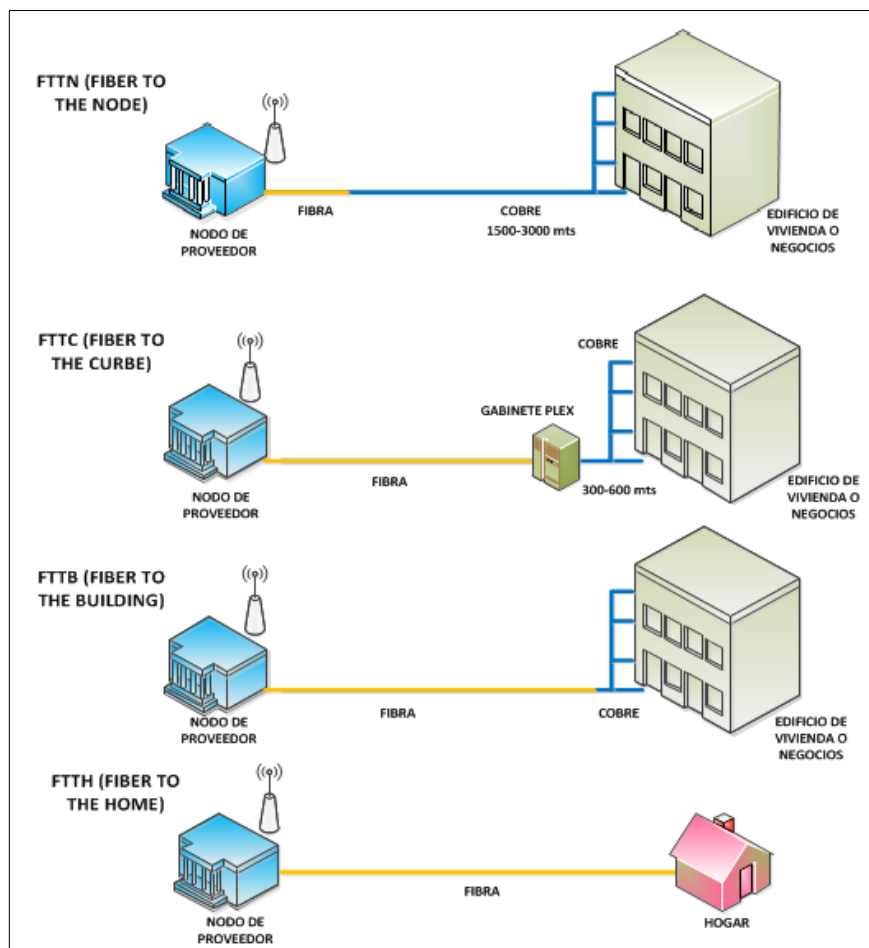
Existen otras denominaciones que, de forma paralela, fueron surgiendo según fue avanzando esta tecnología, y que sin embargo, no se consideran estandarizadas. No obstante, es conveniente nombrarlas, debido a que en muchos ambientes, utilizan esta nomenclatura:

- **FTTC:** *Fiber To The Cabinet* (fibra hasta el armario de distribución, normalmente de accesos a la intemperie).

- FTTP: *Fiber To The Premises* (fibra hasta las instalaciones internas del cliente).
- FTTO: *Fiber To The Office* (fibra hasta la oficina).
- FTTU: *Fiber To The User* (fibra hasta el usuario).

El alcance mencionado por cada uno de los tipos de sistema FTTX puede observarse de una mejor manera en la figura 17:

Figura 17. Alcance de las redes FTTx



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

La utilización de fibra óptica como medio de transmisión hasta puntos muy cercanos a los usuarios finales, garantiza una red completamente adaptada tanto a las necesidades de capacidad actuales, como futuras. La reutilización de esta infraestructura física supone un ahorro económico a lo largo del tiempo, a pesar de su fuerte desembolso inicial en la fase de despliegue, amortizándolo en muy poco tiempo.

En Guatemala, la instalación de fibra óptica hasta edificios residenciales es aún muy limitada, dado el grado de despliegue de tecnologías alternativas más maduras, y aparentemente más económicas para los operadores, que en su mayoría utilizan los conductores de cobre, como principal medio de transmisión. Sin embargo, la demanda exponencial de aumento de ancho de banda y velocidad de transmisión, es superior al que estas tecnologías son capaces de ofrecer, y en términos de evolución, están llegando a la limitación más importante e insalvable: el medio físico no soporta grandes cantidades de datos a muy altas velocidades, lo cual es obligatorio para tecnologías actuales y futuras.

De ahí que sea necesario un cambio drástico del medio de transmisión, que permita establecer un medio de banda ancha mucho mayor, siendo este, la fibra óptica.

2.2. Configuraciones de una red FTTX

Las redes FTTX, por ejemplo la FTTH, contemplan la instalación de fibra óptica en toda la red, desde las centrales de servicios, hasta cada hogar o usuario final. Cualquier tipo de red FTTH, sea cual sea su configuración y arquitectura final, plantea la utilización del medio físico a través de la multiplexación por longitud de onda óptica (WDM, *Wavelength Division*

Multiplexing) desde la central hasta cada usuario, para poder usar el mismo hilo de fibra óptica, para transmisión y recepción. Se profundizará en este tema más adelante, en este capítulo.

La interconexión entre el cliente final y el nodo de distribución que prestará los servicios, puede realizarse a través de varias configuraciones físicas, que se detallan a continuación.

2.2.1. Configuración punto a punto

La configuración punto a punto, en cuanto a fibra óptica se refiere, se concreta exactamente en enlaces entre el nodo central y el usuario final.

Los enlaces de transmisión punto a punto son explotados por empresas que disponen de acceso a la fibra óptica en planta externa, y que necesitan conectar ubicaciones apartadas con una cierta capacidad de comunicaciones, que puede variar desde un enlace de voz o telefonía, hasta un enlace de datos de alta velocidad o una mezcla de servicios de telefonía y comunicaciones de datos de alta velocidad.

En cuanto a la parte activa de la red se refiere, cabe destacar que los equipos utilizados para la transmisión de información en enlaces punto a punto son PDH o SDH, ethernet así como WDM. Estos enlaces tienen la característica principal de ser de alta capacidad.

En caso de utilizar esta configuración para usuarios domésticos, supondría un elevado coste de despliegue, además, rompería el esquema de configuración global de la red, debido a que la configuración en estrella o árbol,

se iría desmantelando, aumentando el coste de ampliación de la red, así como el de operación y mantenimiento.

2.2.2. Configuración punto a multipunto

Comúnmente, a esta configuración se la denomina PON (*Passive Optical Network*) o Red Óptica Pasiva.

La arquitectura basada en redes PON o redes ópticas pasivas, se define como un sistema que no tiene elementos electrónicos activos entre las instalaciones del proveedor de servicios y las instalaciones del cliente final. Toda red PON consta de los siguientes elementos pasivos:

- OLT: terminación óptica de línea (*Optical Line Termination*). Consiste en un elemento pasivo ubicado en la cabecera de la red o central de servicios.

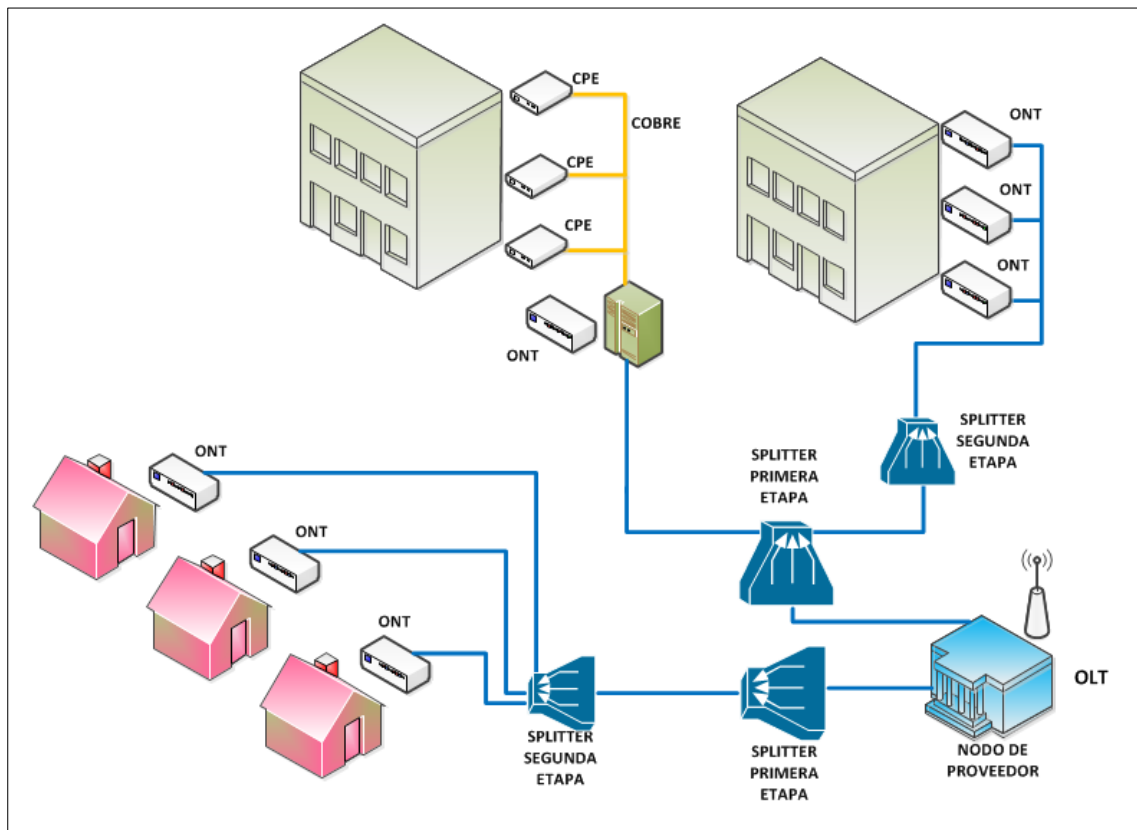
ONT: terminación óptica de red (*Optical Network Termination*). Consiste en un equipo activo en términos de electrónica y pasivo en términos de que el control de la comunicación lo efectúa la OLT. La ONT se ubica en las dependencias de los usuarios finales. Algunas veces se les conoce como ONU (*Optical Network Unit*) unidad óptica de red y la diferencia entre ambos nombres es que cuando el equipo entrega servicios a un único usuario final se le conoce como ONT, mientras que al brindar servicios a varios usuarios finales se le conoce como ONU. A la OLT se pueden conectar los equipos CPE – *Customer Premises Equipment* (equipo local de cliente), el cual se encarga de la entrega final de los servicios a través de la ONT.

- *Splitter*: divisor óptico pasivo. Se le considera como uno de los elementos principales de la red, ya que es el encargado de direccionar las señales desde el equipo activo de la red, hasta cada usuario en particular. La función de los *splitter*, es bastante simple. Dependiendo de la dirección del haz de luz procedente de un extremo, divide el haz entrante en múltiples haces de luz, distribuyéndolos hacia múltiples fibras, o bien, combina varias señales de luz dentro de una misma fibra óptica, para completar el proceso inverso.
- ODN: red de distribución óptica (*Optical Distribution Network*). Consiste en la red de fibra óptica que distribuye la señal desde la central de servicios hasta los elementos finales, que en el caso de las redes FTTH, llega hasta los hogares. Está constituida por cables de fibra óptica, los divisores pasivos o *splitter* y los armarios y paneles distribuidores de fibra óptica.

Con la topología punto a multipunto, varios usuarios comparten el mismo canal físico gracias a la función de los divisores ópticos o *splitter* y a la aplicación de tecnologías de multiplexación. Con esto, por ejemplo, una señal de video puede ser transmitida a múltiples usuarios.

En la figura 18 se muestran los elementos que constituyen una red PON genérica:

Figura 18. Esquema genérico de una red PON



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Tal y como se puede observar en la figura 18, basta con una sola OLT como cabecera de la red, para dar servicio a varias ONT implicadas en la misma.

La señal luminosa procedente de la OLT, se divide pasivamente a través de un *splitter* de cabecera, o *splitter* de 1ª etapa, en un número determinado de

fibras ópticas que acceden directa o indirectamente a los usuarios finales. En ellos se ubica una ONT, que es el punto de conectividad a los servicios.

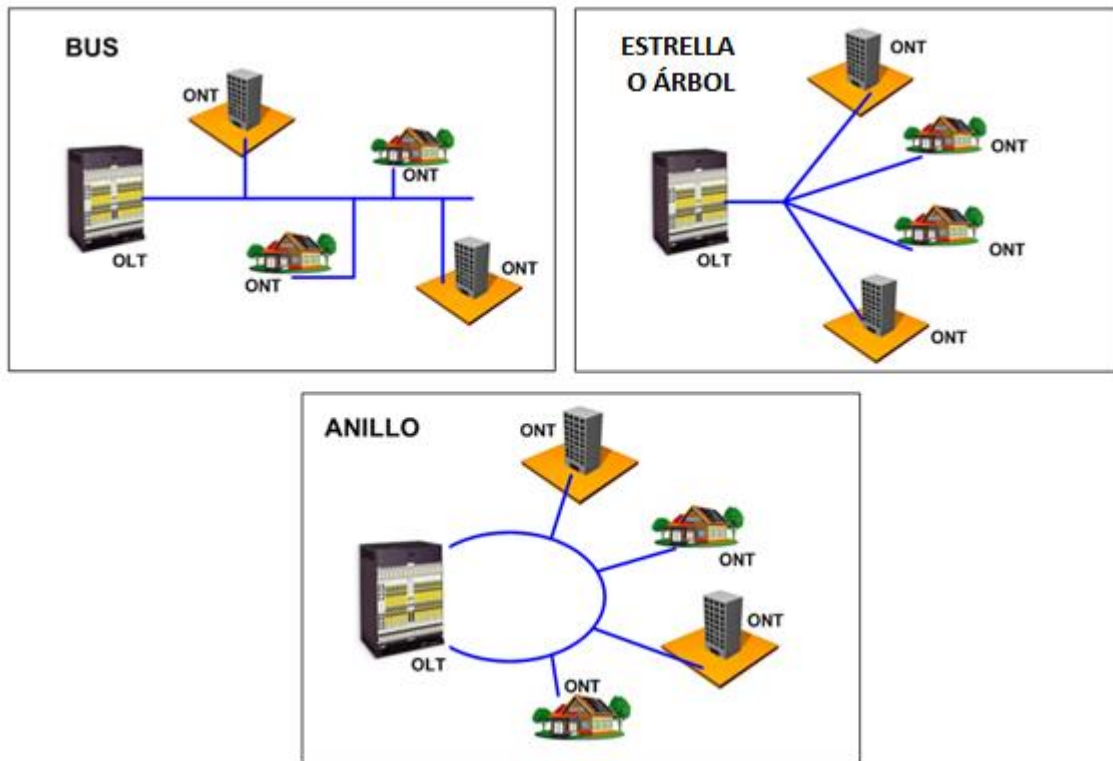
Cada vez que una señal procedente de cabecera pasa a través de un *splitter*, este la divide en tantas señales como fibras de salida tenga conectadas, originando las denominadas etapas de conexión o servicio. Se denomina al primer *splitter* de cabecera, ubicado cerca de la OLT, como *splitter* de 1ª etapa, y origina la 1ª etapa de conexión.

La primera etapa de conexión, puede estar constituida por ONT, y por tanto, conectada directamente a la OLT a través del *splitter* de primera etapa; o bien puede haber más *splitter*, encargados de subdividir nuevamente la señal procedente del *splitter* anterior. A estos *splitter*, se les denomina *splitter* de 2ª etapa, y dan lugar a la 2ª etapa de conexión. Y así sucesivamente.

Esta arquitectura origina una estructura en forma de árbol, lo que da lugar a una red que tiene gran flexibilidad y sencillez, permitiendo que el costo de operación y mantenimiento de la misma sea menor.

Sin embargo, esta topología no es única. Las topologías lógicas de las redes FTTH, pasan también por configurar una estructura de transmisión en bus, y en anillo, donde la OLT es la cabecera de la red, y las ONT los elementos secundarios que cuelgan de la red. Sin embargo, estas configuraciones no son habituales a la hora de diseños de ingeniería eficientes. En la figura 19 se muestran las topologías lógicas que se pueden dar en una red FTTH:

Figura 19. Topologías lógicas de las redes PON



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

2.3. Funcionamiento genérico de una red PON

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior en términos generales, una red óptica pasiva funciona siempre bajo la transmisión entre la OLT y las diferentes ONT a través de los divisores ópticos, que multiplexan o demultiplexan las señales en función de su procedencia y destino.

Aparecen por tanto, tres equipos claramente diferenciados en este tipo de Red: la OLT, la ONT y el divisor o *splitter*, cada uno de los cuales tiene una

función necesaria y prioritaria en la red pasiva PON. A continuación se detallan la función y características generales de cada uno de ellos.

2.3.1. La OLT

La OLT actúa como el elemento central de la red PON encargada de gestionar el tráfico de información en dirección a los usuarios ONT o proveniente de ellos. Y además, actúa como conexión con el resto de redes externas, permitiendo el tráfico de datos con el exterior.

Cada OLT puede adquirir datos de tres fuentes diferentes de información, actuando como concentrador de todas ellas. Así pues, algunas de las redes con las que la OLT tiene conexión son las siguientes:

- Voz, PSTN (*Public Switched Telephone Network*) o RTB (red telefónica básica), para los servicios de llamadas de voz; la OLT se conecta a través de un *router* de voz o un *gateway* de voz mediante una interfaz correspondiente MGCP (*Media Gateway Controller Protocol*) o protocolo controlador *gateway* de medios de comunicación.
- Internet, para los servicios de datos o VoIP (*Voice over Internet Protocol*); la 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 video difusión; la OLT se conecta directamente, o bien indirectamente a través de un *router* o *gateway* IP/ATM hacia la red de video proveedora de servicios de este tipo, para tomar la señal que el proveedor entregará a los clientes e inyectándola en la red PON.

Una OLT realiza el procesamiento de las distintas señales que se entregan a los clientes, subdividiendo el tráfico en tres módulos o bien, tres funciones diferentes, cada uno de ellos encargados de procesar un tráfico determinado. Con base en lo anterior y para ayudar a comprender el funcionamiento de la OLT, se tiene la clasificación de sus funciones en tres módulos distintos:

- P-OLT (*provider OLT*), OLT proveedor. Este módulo tiene dos tareas fundamentales:
 - Es el encargado de recoger las tramas de voz y datos que se dirigen hacia la red PON, procedentes de las redes de voz e internet, y las transforma en señales que puedan ser inyectadas en las diferentes rutas hacia los usuarios finales por *broadcast* por medio del protocolo TDM, multiplexación por división en el tiempo (*Time Division Multiplexing*). Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo esta 1 490 nm. La información que puede combinarse es voz, datos, video, fax, entre otros.
 - Recoge todas las tramas de voz y de datos procedentes de las 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 red de voz, y el tráfico de datos hacia la red internet.

Para ello, utiliza una longitud de onda dedicada, siendo esta 1 310 nm. La 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 a la OLT) a través de la misma fibra.

- V-OLT (*Video OLT*), OLT de video. En la mayoría de los casos, este módulo puede ser un equipo externo a la OLT o bien una función de la misma. Se encarga de transportar las tramas de video y video bajo demanda VoD procedentes de la red de video difusión, hasta las ONT de los usuarios. Para ello, transforma las tramas de video en señales inyectables en las rutas de todos los usuarios finales, que viajan en una longitud de onda dedicada, 1 550 nm. Esta solución también es conocida como *RF-Overlay*, y consiste en la técnica de inyectar una tercera longitud de onda sobre la ODN que transporta la señal de video analógico.

Cabe mencionar que la manera de entregar video hacia el usuario final tiene un efecto significativo en el diseño de una red PON. Entre los tipos de video se tienen dos clases: analógico y digital. En grupo analógico, se encuentran las emisiones RF o TV cable que se transmiten sobre la banda de 42-550 MHz en una transmisión de onda modulada. En el grupo de video digital, se tiene la transmisión de señales de video a través de redes de paquetes, por ejemplo IP-TV.

Para la transmisión de video analógica sobre redes PON, es necesario el uso de equipos adicionales como un AFDE (Amplificador de fibra dopada con Erbium), que es un dispositivo que amplifica una señal óptica directamente. Esto quiere decir que para amplificar una señal de video de bajada, no es necesario

convertir la señal al dominio eléctrico, amplificarla y volver a convertirla al dominio óptico.

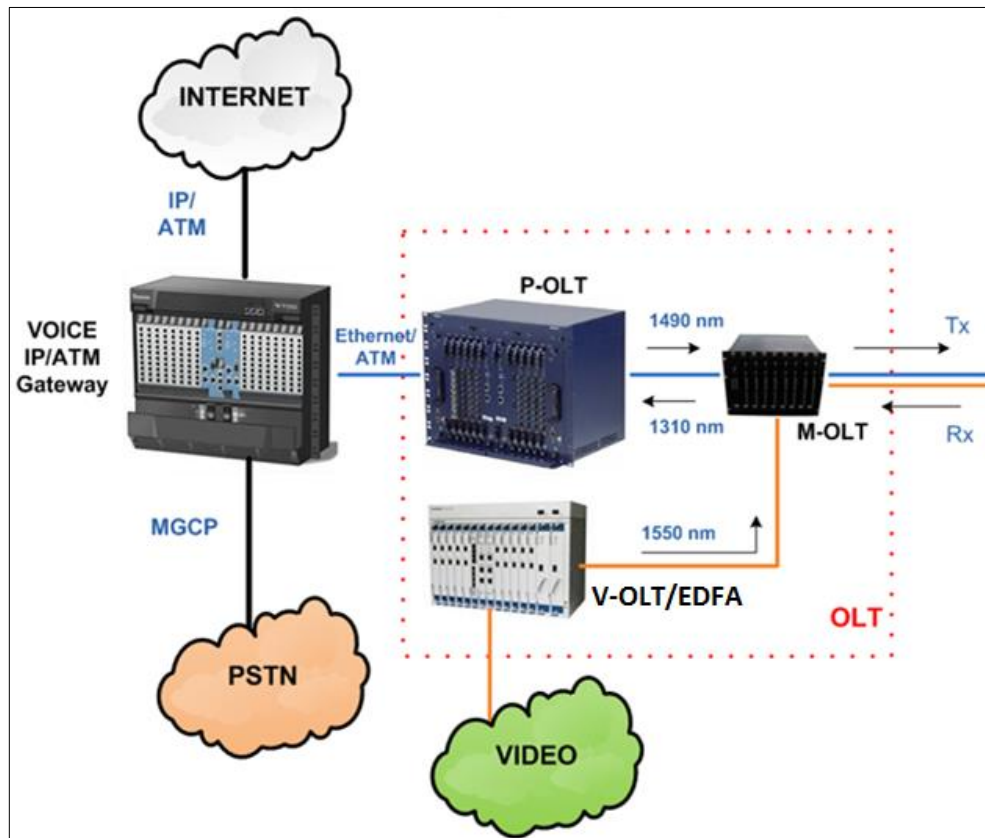
Esta señal amplificada ópticamente, se combina con la señal de datos por medio de un M-OLT o un acoplador WDM, para ser enviada hacia los usuarios finales. Para que la señal de video analógica sea decodificada en el cliente, es necesario que la ONT u ONU posea esa capacidad o se haga la instalación de un dispositivo *Set-Top-Box*, por ejemplo, que reciba la señal digital y decodifique la señal de video para entregarla a un televisor.

Cuando se trata de señal de video digital, se realiza el envío de la información directamente a la OLT a través de una interfaz que puede ser 1G/10GEth y de allí hacia la red PON, sin necesidad de equipos adicionales como el AFDE y teniendo eliminado el factor del ruido presente en las señales analógicas.

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

En la figura 20 se muestra el funcionamiento de una OLT completa, con las funciones mencionadas de conexión a diferentes redes de voz (PSTN), video (video *Broadcast*) y datos (internet).

Figura 20. **Funcionamiento de la OLT a nivel global**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Cada función de la OLT tiene la tarea de evitar interferencias entre los contenidos del canal descendente y ascendente, utilizando dos longitudes de onda diferentes superpuestas. Para ello utiliza técnicas basadas en filtros ópticos, es decir WDM.

Por último, cabe destacar que las OLT también poseen calculadores de distancias, capaces de calcular la diferencia de distancia entre el usuario final y el punto de presencia del proveedor. Esta función tiene relación directa con la potencia de transmisión de la OLT hacia una ONT determinada.

Las OLT no emiten la misma potencia de luz a todas las ONT de forma equitativa, sino que depende de la distancia a la que se encuentren de la central. De esta forma, un usuario cercano a la central necesitará una menor potencia óptica, mientras que un usuario lejano necesitará una potencia más elevada.

2.3.2. La ONT

Las ONT son elementos capaces de filtrar la información asociada a un usuario concreto procedente de la OLT. Además, tienen la función de encapsular la información de un usuario y enviarla en dirección a la OLT de cabecera, para que este la redireccione a la red correspondiente de voz, datos o video. Se encuentran generalmente instalados en los hogares o edificios junto a la caja terminal óptica correspondiente.

Existen dos tipos de ONT según su ubicación en la red:

- H-ONT u ONT del hogar (*Home ONT*), preparado para ser instalado en los hogares y otorgar servicios a un usuario en particular. En este caso, la fibra llega hasta los hogares, y entra dentro del despliegue FTTH.
- B-ONT u ONT de edificio (*Building ONT*), preparado para ser instalado en los 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. En este caso, la fibra no llega hasta el hogar, sino hasta el edificio, denominándose FTTB.

Cada ONT dentro de una misma etapa, recibe todas las señales enviadas por su OLT de cabecera correspondiente. La información de las OLT se

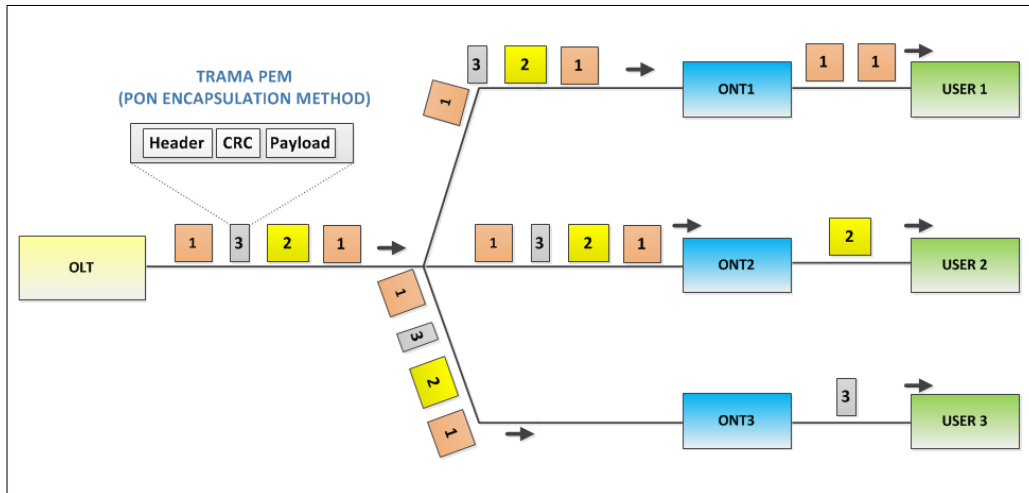
transmite mediante difusión TDM, y por lo tanto, llega a todas las ONT por igual. La ONT tiene la tarea de filtrar aquella información que sólo vaya dirigida el mismo (en un intervalo temporal determinado).

El filtrado de la información, se lleva a cabo a nivel de protocolo PON a través de las denominadas tramas PEM (*PON Encapsulation Method*). La trama, consta de tres campos:

- Cabecera (*Header*): este campo contiene información sobre sincronización de la trama.
- CRC (*Cyclic Redundancy Check*): chequeo de redundancia cíclica, que permite conocer si la información enviada ha llegado correctamente y sin errores a su destino.
- Carga útil (*Payload*): es la información que se desea enviar.

En la figura 21, se muestra gráficamente el funcionamiento de este filtrado de difusión por TDM, para las redes PON:

Figura 21. **Funcionamiento del protocolo de difusión en una red PON**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Una vez filtrada la información que le interesa, la ONT diferencia entre las señales de video, procedentes de la V-OLT, y las tramas de voz y datos, procedentes de la P-OLT. Para realizar el filtrado de voz y datos, el módulo electro-óptico posee dos fotodiodos que diferencian la trama de servicio por la longitud de onda utilizada: uno para servicios analógicos APD *Analogic Photo-Diode* (foto diodo analógico) y otro para servicios digitales DPD *Digital Photo-Diode* (foto diodo digital).

Los filtros ópticos son:

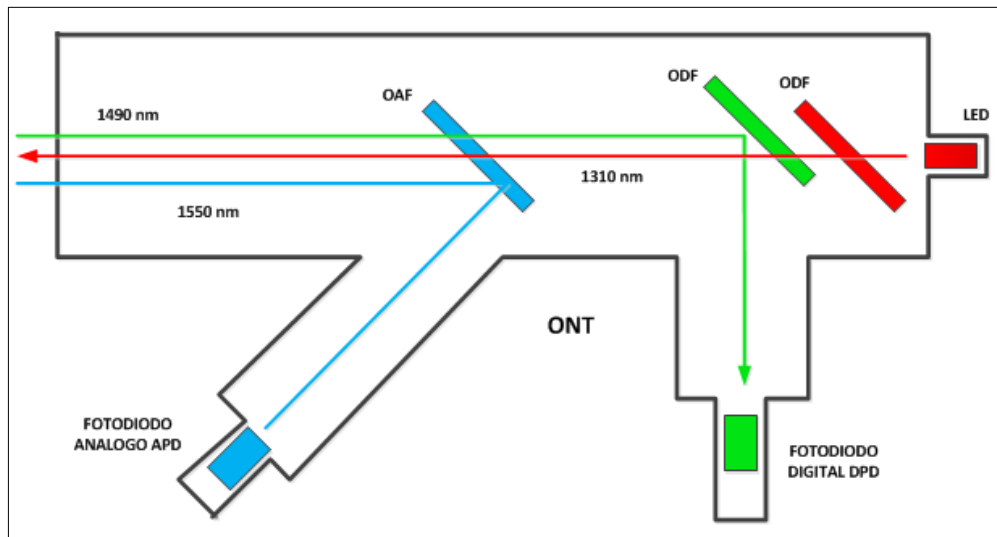
- OAF (*Optical Analogic Filter*), filtro óptico analógico; la señal de video a 1 550 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, utilizando al fotodiodo para servicios analógicos APD para realizar la conversión en frecuencia.

- ODF (*Optical Digital Filter*), filtro digital óptico; la señal de voz y datos a 1 490 nm se demultiplexa en longitud de onda con este filtro, utilizando al fotodiodo para servicios digitales DPD.

Por otra parte, la ONT no sólo recibe y filtra información procedente de la OLT, sino que también envía información a este último en una longitud de onda dedicada de 1 310 nm. La ONT dispone de un LED encargado de enviar las señales luminosas hacia la OLT. Para evitar la colisión de información entre usuarios, utilizan un método de acceso por TDM (multiplexación por división de tiempo), gestionado por la OLT, asignando intervalos temporales a cada ONT.

En la figura 22, se muestra un esquema gráfico del funcionamiento de la ONT basado en filtros ópticos y diodo LED de transmisión.

Figura 22. **Funcionamiento óptico interno de una ONT**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

2.3.3. El divisor óptico (*splitter*)

Los *splitter* son divisores de potencia pasivos que permiten la comunicación entre la OLT y las respectivas ONT a los que presta servicio. Sin embargo, no solo se dedican a multiplexar o demultiplexar señales, sino que también combinan potencia, haciendo la función de dispositivos de distribución óptica bidireccional, con una entrada y múltiples salidas. Se puede detallar el proceso anterior de la siguiente forma:

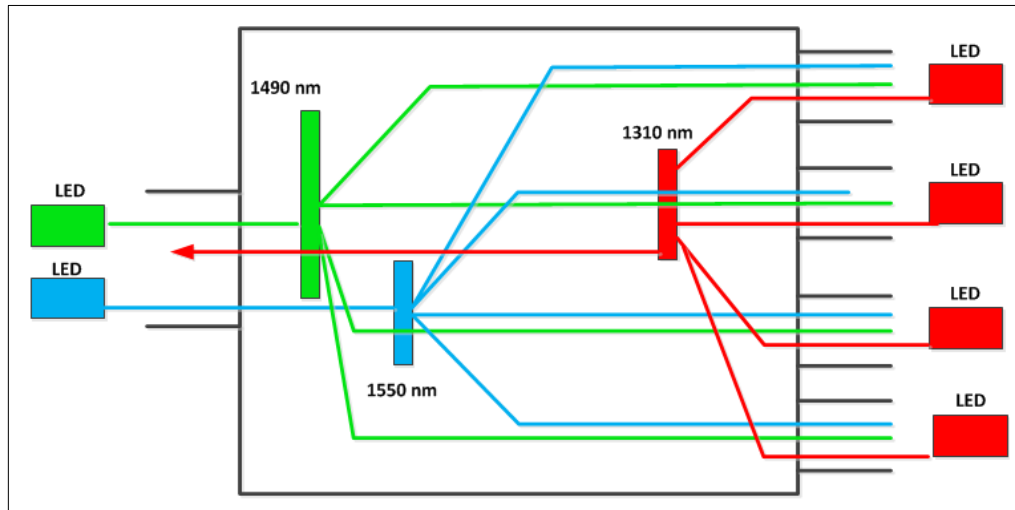
- La señal que accede por el puerto de entrada (enlace descendente), procede de la OLT y se divide entre los múltiples puertos de salida.
- Las señales que acceden por las salidas (enlace ascendente), proceden de las ONT (u otros divisores) y se combinan en la entrada.

El hecho de ser elementos totalmente pasivos, les permite funcionar sin necesidad de energización externa, abaratando sus costos de despliegue, operación y mantenimiento. Tan sólo introducen pérdidas de potencia óptica sobre las señales de comunicación, que son inherentes a su propia naturaleza. Existe una relación matemática inversa entre las pérdidas introducidas por el divisor, y el número de salidas del mismo, siendo esta la siguiente ecuación:

$$ATENUACIÓN_{SPLITTER} = 10 \log \frac{1}{N} \quad (2.1)$$

En donde N es el número de salidas que tenga el equipo. Así pues, un divisor de potencia con dos salidas, en el peor de los casos, pierde 3 dB (la mitad de la potencia) en cada salida. Gráficamente, se puede expresar el funcionamiento de un divisor con la siguiente figura:

Figura 23. **Funcionamiento genérico de un divisor óptico**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Las principales características que hacen atractivo al divisor óptico como elemento de distribución de señales procedentes de una fibra hasta múltiples fibras ópticas son las siguientes:

- Pérdidas de inserción muy baja, obtenida a partir de la diferencia entre la entrada y cada una de las salidas del divisor.
- Poseen un espectro lineal de longitud de onda.
- Alta uniformidad entre las diversas salidas del divisor.
- Elevado aislamiento entre puertas, mayores que 55 dB.
- Alta compactación.
- Estabilidad térmica para uso externo.

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

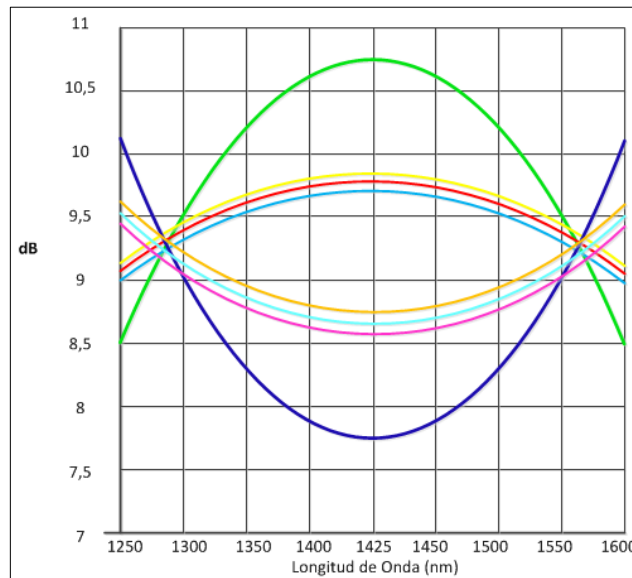
- Para dispositivos con gran número de salidas (> 32 salidas), se utilizan divisores realizados basándose en tecnología Planar. Específicamente es una tecnología impresa denominada PLC (*Planar Lightwave Circuit*), donde las guías de onda del componente son impresas sobre un sustrato de cuarzo, similar al de los chips de silicio. Así se obtiene además de una gran compactación dimensional, una optimización de las pérdidas de retorno, línea del espectro y alta uniformidad.
- Para dispositivos con menor número de salidas (< 32 salidas), se utilizan divisores realizados a base de acopladores bicónicos fusionados. La tecnología tradicional FBT (*Fused Biconical Taper*) o por fusión bicónica, son utilizados usualmente en redes híbridas de fibra y coaxial.

En las 2 figuras siguientes, se hace una comparación de las dos tecnologías en dos divisores de 1 x 8. En la primera se muestra un gráfico, de un divisor producido a partir de la tecnología FBT, en el que se puede observar las pérdidas de inserción máximas y mínimas del sistema, así como la uniformidad (diferencia entre las pérdidas de inserción máximas y mínimas).

Las pérdidas por inserción se deben a introducir un dispositivo nuevo en una línea de transmisión o fibra óptica. Las pérdidas de inserción máximas corresponden a la línea verde y poseen el valor $IL_{max} = 10,8$ dB; por otro lado las pérdidas de inserción mínimas corresponden a la línea azul oscuro y poseen el valor $IL_{min} = 7,8$ dB. Por lo tanto, el valor de la uniformidad, que es la

diferencia entre ambos valores es de $U = 3,0$ dB. Tomar en cuenta que las 8 líneas de diferentes colores, representan la descomposición de la luz.

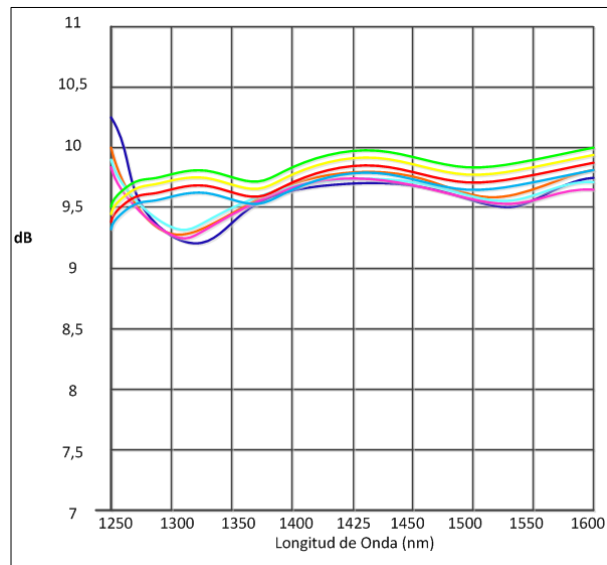
Figura 24. **Comportamiento de un divisor FBT**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

El segundo ejemplo, muestra un divisor producido en tecnología impresa PLC, utilizado usualmente en redes FTTH, de acuerdo a la figura 25.

Figura 25. **Comportamiento de un divisor PLC**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

En la figura 25, se pueden observar las pérdidas de inserción máximas y mínimas del sistema, así como la uniformidad, para un divisor PLC 1 x 8. Las pérdidas de inserción máximas corresponden a la salida de fibra verde y poseen el valor $IL_{max} = 10,3$ dB; las pérdidas de inserción mínimas corresponden a la salida de fibra azul oscuro y poseen el valor $IL_{min} = 9,3$ dB. Por lo tanto, el valor de la uniformidad, que es la diferencia entre ambos valores, es de $U = 1,0$ dB.

Observando ambas figuras en modo comparativo, se puede verificar una mejor respuesta en todo el espectro de onda de operación y mejor uniformidad en el segundo caso, es decir, divisores fabricados a partir de tecnología impresa PLC. Si se añade a esto una reducción del valor de pérdidas de inserción posible, estas características convierten a este elemento como componente

esencial de una red óptica pasiva, teniendo en cuenta que supone un alto porcentaje del presupuesto de instalación de la red.

En cuanto a las características físicas de los divisores construidos con tecnología PLC, son fundamentales las siguientes: lo compacto permite que dicho componente sea instalado sin mayores problemas, en las bandejas de cajas de empalme de uso muy común en el mercado, dando una alta flexibilidad a cualquier proyecto en donde son aplicados, a las dimensiones e instalación de las nuevas redes ópticas.

Otra diferencia de los tradicionales divisores FBT, es que estos últimos pueden ser instalados en centrales de equipos y para uso interno, mientras que los divisores PLC son también mecánicamente y térmicamente adecuados para aplicaciones en ambientes externos, con una muy baja variación en sus funciones y características cuando se exponen a variaciones térmicas de temperatura y humedad, incluso han sido probados, en inmersión en el agua, prueba que nunca se había implementado en divisores FBT.

En la tabla II se detallan las especificaciones más importantes de los divisores ópticos de 1 x 2 hasta 1 x 64.

Tabla II. Especificaciones de divisores 1x2 hasta 1x64

PARAMETRO	UNIDAD	Especificación					
		1 x 2	1 x 4	1 x 8	1 x 16	1 x 32	1 x 64
Pérdidas de inserción máximas	dB	3,4	7,3	10,8	13,5	16,7	20,4
Uniformidad IL máxima	dB	0,6	1	1	1,2	1,5	1,8
PDL máximo	dB	0,2	0,25	0,25	0,3	0,4	0,4
Pérdidas de retorno mínima	dB	55					
Directividad mínima	dB	50					
Temperatura de operación	°C	-40 a +85					
Temperatura de almacenamiento	°C	-40 a +85					
Ciclo térmico máximo	°C	-40 a +75					
Tracción de fibra máxima	Kg	0,23 en 250 µm					
Inmersión máxima en agua 340 horas	°C	+43, PH 5,5					
Vibración máxima aleatoria	Hz	10 - 2 000					
Impacto máximo a 1,8 m altura	Caídas	8					
Choque térmico máximo	°C	100					
Rango de longitudes de onda	nm	1 260 a 1 600					
Longitud de la fibra	m	Entrada = 2; Salida = 2					

Fuente: elaboración propia.

Dentro de algunos de los principales parámetros que permiten el correcto diseño de la red, en lo que se refiere a divisores ópticos, se encuentran los siguientes. Una definición breve de algunos de los mismos sería la siguiente:

- Inserción: parámetro que se debe a introducir un dispositivo nuevo en una línea de transmisión o fibra óptica.
- Uniformidad: la diferencia entre las pérdidas de inserción máxima y mínima sufrida por el sistema. La ecuación siguiente muestra la relación de Uniformidad:

$$U = IL_{max} - IL_{min}$$

(2.2)

- PDL (*Polarization Dependent Loss*): pérdida que varía conforme el estado de la polarización de onda cambia.
- Pérdidas de retorno (*Return Loss*): medida de las reflexiones de señal que ocurren a lo largo del trayecto de fibra óptica.

Todos estos parámetros permiten al *splitter* realizar una correcta transferencia de luz hacia las salidas, o bien recoger la misma de cada una de ellas y trasladarla a la entrada con el menor nivel de pérdida.

2.4. Multiplexación por división de onda (*Wavelength Division Multiplexing*)

Lo más importante a destacar en el funcionamiento genérico de la red, una vez que se han detallado los elementos que la constituyen y en este caso particular, para una red PON, es la existencia de dos canales de transmisión, uno ascendente y otro descendente. Ambos canales viajan a través del mismo medio físico, para lo que se utilizan técnicas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que permiten que los datos del canal descendente no colisionen con los del ascendente.

Se puede presentar la tecnología WDM como la transmisión simultánea de múltiples señales portadoras, cada una con diferente longitud de onda sobre una única fibra óptica. Para esto, se asignan diferentes longitudes de onda a cada canal y todas esas longitudes de onda viajan a través de la misma fibra. Cada portadora óptica forma un canal óptico que puede ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio y transportar diferente tipo de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda

efectivo de la fibra óptica o viéndolo de otra forma, se aprovecha al máximo el ancho de banda del medio, así como facilitar comunicaciones bidireccionales.

Los conceptos mencionados anteriormente, son aprovechados en las redes PON para lograr que muchos usuarios puedan comunicarse utilizando un hilo de fibra óptica, cambiando drásticamente el método actual de comunicación que era un par de hilos de fibra óptica para cada cliente. Entre los sistemas WDM se pueden resaltar:

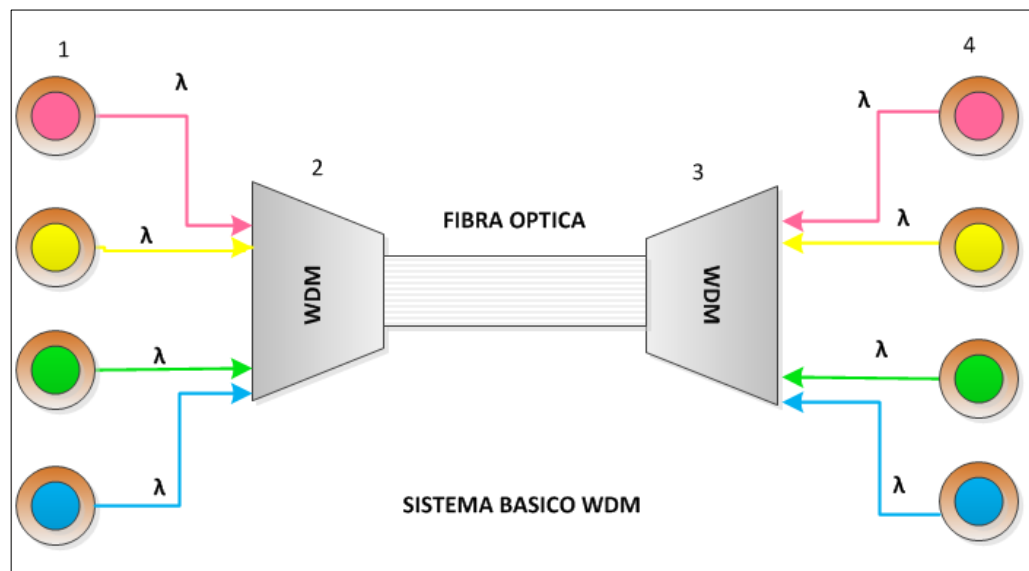
- CWDM (*Coarse WDM* – Multiplexación por división en longitud de onda ancha), en el cual el número de canales no es grande y la separación entre sus longitudes de onda es de 20 nm, permitiendo en sistemas típicos CWDM, tener 18 canales de transmisión. Las longitudes de onda para estos 18 canales van desde 1 270 hasta 1 610 nm. Actualmente los sistemas CWDM son utilizados en transmisiones de corto alcance en donde no se necesita regeneración de las señales.

Para estos sistemas, los laser utilizados no deben ser de alta precisión por el tema de tener espaciamiento grande entre cada canal, siendo por esto una tecnología de costo bajo en comparación de otras WDM.

- DWDM (*Dense WDM* – Multiplexación por división en longitud de onda densa) en el cual el número de canales es bastante grande comparado con CWDM y la separación entre sus longitudes de onda es de 0,8 nanómetros, permitiendo en sistemas típicos DWDM, tener 80 canales de transmisión y más teóricamente. Se utiliza DWDM en sistemas de transmisión de largo alcance. En esta tecnología los costos se incrementan por la necesidad de laser de alta precisión por el bajo espaciamiento entre canales.

Para explicar brevemente el funcionamiento de un sistema WDM, se puede basar en la siguiente figura:

Figura 26. **Representación básica de un sistema WDM**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

1. WDM asigna las señales ópticas entrantes a diferentes frecuencias de luz (longitudes de onda o lambdas) dentro de una cierta banda de frecuencias.
2. Las señales se combinan y se envían a través de distintas frecuencias o longitudes de onda a través del medio físico de transmisión, en este caso la fibra óptica. Este proceso sería la multiplexación de las señales. Hoy en día se ve a cada una de las longitudes de onda como un "color" sobre el canal DWDM.

3. Se hace el proceso de demultiplexación de las señales en el extremo receptor. Finalmente la capacidad resultante es un acumulado de las señales de entrada.
4. Se da un proceso de filtrado en los receptores que permiten recuperar cada una de las señales de entrada de forma independiente de las demás.

Estas características permiten que WDM pueda transportar múltiples protocolos sin un formato común de señal, por ejemplo SDH, IP, ATM, líneas arrendadas, entre otros.

2.5. Variantes de las redes PON

Las redes o estándares PON, se constituyen por varios tipos, los cuales han tenido como principal objetivo desde su inicio, el acceso de banda ancha a las viviendas o usuarios finales. Se muestran a continuación algunas de las principales variantes de las redes PON:

2.5.1. Estándar APON (*ATM Passive Optical Network*)

Este tipo de red PON tiene como principales características, una transmisión en canal descendente basado en ráfagas ATM (*Asynchronous Transfer Mode* o modo de transferencia asíncrono), con una tasa máxima de velocidad de 155 Mbps, que se reparte entre el número de ONT que estén conectadas en la red, y de forma no equitativa. Las redes APON, se encuentran estandarizadas bajo la Norma ITU-T G.983.

2.5.2. Estándar BPON (*Broadband Passive Optical Network*)

BPON surgió como evolución de las redes APON por las limitaciones en velocidad de las mismas. Las redes BPON, también se basan en transmisión ATM, pero tienen la diferencia respecto de las redes APON que pueden dar soporte a otros estándares de banda ancha. Originalmente, las redes BPON estaban definidas bajo una tasa fija de transmisión de 155 Mbps, tanto para el canal ascendente como para el descendente. Sin embargo, se modificó este parámetro, admitiendo canales de transmisión asimétricos:

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

A pesar de presentar mejoras respecto a las redes APON, las redes BPON tienen un elevado costo de implementación. Al día de hoy el estándar BPON, permite de forma asimétrica alcanzar velocidades de hasta 1,2 Gbps de la siguiente forma:

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

Adicional de las diversas velocidades de transmisión, permite transmitir el canal descendente y el ascendente bajo 1 o 2 hilos de fibra óptica, con un alcance máximo de 20 km entre divisor óptico y ONT, y entre ONT de misma etapa.

Las longitudes de onda de trabajo que establece el estándar BPON, varían en función de si se utilizan 1 o 2 fibras por cada ONT, aunque para ambos casos establece una longitud de onda dedicada para la transmisión de señal de

vídeo desde la OLT hasta las ONT, siendo esta diferente de las utilizadas en la transmisión de voz y datos. Las longitudes de onda son:

- Para 1 fibra por cada ONT, compartida para la transmisión y la recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1\ 480-1\ 500\ \text{nm}$
 - Canal ascendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Video: $\lambda=1\ 550-1\ 560\ \text{nm}$

- Para 2 fibras por cada ONT, una para transmisión y otra para recepción:
 - Canal descendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Canal ascendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Video: $\lambda=1\ 550-1\ 560\ \text{nm}$

Las redes BPON, admiten una relación máxima de 32 divisores por OLT, y cada divisor, admite un máximo de 64 salidas a usuarios ONT. Con esos datos se puede calcular el número de usuarios por OLT a partir de la siguiente ecuación:

$$Usuarios_{m\acute{a}ximos\ BPON} = 32 \frac{Divisores}{OLT} * 64 \frac{Usuarios}{Divisor} = 2\ 048 \frac{Usuarios}{OLT} \quad (2.3)$$

2.5.3. Estándar EPON (*Ethernet PON*)

El estándar EPON, surgió paralelamente a los mencionados APON y BPON, por parte de la IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), bajo el estándar IEEE 802.ah y que busca aprovechar las características de las redes de fibra óptica PON y aplicarlas a ethernet.

En el estándar EPON, no se encapsula información ATM como se hacía con APON o BPON, sino que se encapsulan tramas ethernet. El encapsulado de tramas ethernet, brinda las siguientes ventajas:

- Permitir el trabajo con caudales de velocidad de Gigabit, aunque dichos caudales se repartan sobre el número de ONT de la red.
- Interconexión simple entre etapas EPON.
- Reducción de costos de los equipos de tecnologías SDH y ATM.

La velocidad de transmisión de las redes EPON, tiene un valor de 1 244 Mbps simétricos. El estándar también tiene como característica de transmisión de los canales ascendente y descendente en un hilo de fibra óptica, con un alcance teórico máximo de 10 km entre Divisor y ONT, y entre ONT de la misma etapa.

Las longitudes de onda utilizadas en EPON son las siguientes:

- Canal descendente: $\lambda=1\ 480-1\ 500\ \text{nm}$
- Canal ascendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
- Video: $\lambda=1\ 550-1\ 560\ \text{nm}$

Las redes EPON admiten una relación máxima de 16 divisores por OLT, y cada divisor admite un máximo de 64 salidas a usuarios ONT. Con esos datos se puede calcular el número de usuarios por OLT con la siguiente ecuación:

$$Usuarios_{m\acute{a}ximos\ EPON} = 16 \frac{Divisores}{OLT} * 64 \frac{Usuarios}{Divisor} = 1\ 024 \frac{Usuarios}{OLT} \quad (2.4)$$

2.5.4. Estándar GPON (Gigabit Passive Optical Network)

Es el estándar más utilizado de las redes PON y sobre el cual se estará ampliando la información en el capítulo 3 del presente documento.

3. GPON – REDES ÓPTICAS PASIVAS CON CAPACIDAD GIGABIT (*GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORKS*)

Hoy en día, el estándar más avanzado y de mayor uso de las redes PON, es el denominado GPON (Gigabit PON), el cual se encuentra estandarizado bajo la Norma ITU-T G.984.x (G984.1, G984.2, G984.3 y G984.4).

El estándar GPON permite la transmisión de información encapsulada entre una central y puntos remotos, bajo dos tecnologías:

- *ATM Asynchronous Transfer Mode* (modo de transferencia asíncrona)
- Ethernet o TDM, usando para ello el GEM (*GPON Encapsulation Mode* o modo encapsulado GPON) basado en GFP (*Generic Framing Procedure*) o dual.

Las ventajas que ofrece GPON respecto de todos los estándares PON anteriores a el (los cuales se mencionaran más adelante), son de forma general, aumentar el ancho de banda en la transmisión, y aportar seguridad a la red a nivel de protocolo.

Algunas de las características principales de las redes GPON son:

3.1. Tasas de transmisión GPON

GPON permite tasas de transmisión muy altas y variadas, que se encuentran en el rango de entre los 622 Mbps, hasta los 2,488 Gbps en el canal descendente (en el que el sentido de la transmisión es de la central a los

usuarios finales). GPON permite tanto la transmisión de datos simétrica como asimétrica, cuyas tasas de transmisión, para cada una de ellas son:

- Transmisión simétrica: anchos de banda de entre 622 Mbps y 2,488 Gbps para ambos canales, descendente y ascendente (en la que el sentido de la transmisión es de los usuarios finales la central).
- Transmisión asimétrica: anchos de banda diferentes para el canal descendente y ascendente:
 - Canal descendente: hasta 2,488 Gbps
 - Canal ascendente: hasta 1,244 Gbps

El hecho de que las redes GPON puedan entregar un ancho de banda tan elevado, permite la transmisión de prácticamente cualquier información multimedia y soportar cualquier servicio de un operador. Además, por su origen de transferencia vía ATM o vía ethernet y TDM, las redes GPON funcionan como redes multi servicio, pudiendo entregar servicios como:

- Transmisión de voz
- Ethernet 10/100 Base-T
- Servicios ATM, entre otros

El estándar GPON permite transportar el canal descendente y el ascendente bajo 1 o 2 fibras monomodo (según Norma ITU-T G.652, Características de las fibras y cables ópticos monomodo), con un alcance máximo de 60 km entre divisor y ONT, y de 20 km entre ONT de misma etapa, tema que se amplía más adelante.

3.2. Longitudes de onda GPON

Las longitudes de onda que establece el estándar GPON varían dependiendo de si se utilizan 1 o 2 hilos de fibra óptica por cada ONT. Para ambos casos el estándar GPON establece una longitud de onda dedicada para la difusión de vídeo desde la OLT hasta las ONT, siendo esta diferente de las utilizadas en la transmisión de voz y datos. Las longitudes de onda utilizadas son:

- Para 1 fibra por cada ONT compartida para la transmisión y la recepción (funcionamiento dúplex), se utiliza la técnica de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*):
 - Canal descendente: $\lambda=1\ 480-1\ 500\ \text{nm}$
 - Canal ascendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Video: $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$

- Para 2 fibras por cada ONT, una para transmisión y otra para recepción unidireccionales (funcionamiento simplex):
 - Canal descendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Canal ascendente: $\lambda=1\ 260-1\ 360\ \text{nm}$
 - Video: $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$

3.3. Cantidad de divisores y usuarios

El beneficio de una red GPON consiste en la reducción de instalación de equipos OLT (equipos activos), aumentando el número de divisores ópticos (elementos pasivos), que son bastante más económicos que los equipos de otro

tipo de redes, y por tanto, se reduce el costo total de despliegue de la red GPON.

Las redes GPON admiten una cantidad máxima teórica de 128 divisores ópticos por OLT, y cada divisor óptico, admite un máximo de 64 salidas a usuarios finales con ONT. Esto da un número total de usuarios por OLT de acuerdo a la ecuación:

$$Usuarios_{máximos} = 128 \frac{Divisores}{OLT} * 64 \frac{Usuarios}{Divisor} = 8192 \frac{Usuarios}{OLT} \quad (3.1)$$

Por lo mencionado anteriormente, la relación de divisores ópticos puede ser muy grande, lo cual es muy llamativo para los operadores de red. Sin embargo, una relación de divisores ópticos muy grande, implica un presupuesto óptico o potencia óptica muy elevada para soportar el alcance físico de la red.

Relaciones de divisores de 1:64 son realistas, relacionados con el alcance físico, de acuerdo a las tecnologías actuales. Sin embargo, se pueden considerar relaciones de divisores de hasta 1:128 como se ha mencionado anteriormente.

El número de divisores ópticos instalados, influye en las pérdidas por atenuación de la red. Estos elementos, introducen un nivel de pérdidas en la red que, sumado a las de otros elementos pasivos y a las pérdidas de la propia fibra óptica, dan como resultado un nivel global de pérdidas que permiten clasificar las redes GPON en 3 divisiones, en función de su calidad. A partir de lo mencionado anteriormente, existen varios tipos de redes GPON en función de su calidad, asociadas al rango de pérdidas determinado entre la OLT de la

central y la ONT de usuario final, es decir a través de la ODN (*Optical Distribution Network*). Esta clasificación se muestra en la tabla III:

Tabla III. **Clasificación de las redes GPON en función de la calidad**

TIPO DE ODN	CALIDAD	MARGEN DE PÉRDIDAS
A	Excelente	5 – 20 dB
B	Muy Buena	10 – 25 dB
C	Buena	15 – 30 dB

Fuente: elaboración propia.

3.4. Arquitectura y configuración de una red GPON

Para la arquitectura general de una red óptica pasiva, el estándar GPON establece algunas particularidades respecto a los extremos de línea, tanto en el usuario final como en las centrales.

Se determinan las interfaces, a nivel de protocolo, de inicio y final de la línea de transmisión, más allá de la ONT hacia el usuario final y la OLT en la Central, de la siguiente manera: UNI (*User Network Interface*), interfaz de red de usuario, y el SNI (*Services Network Interface*), interfaz de red de servicios.

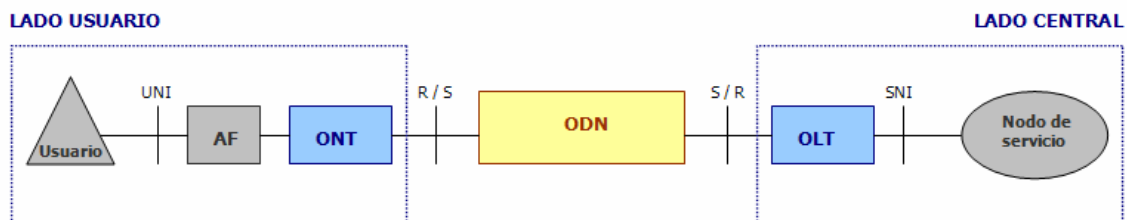
- UNI (*User Network Interface*): es la interfaz de usuario final, y se encuentra luego del ONT. Entre las interfaces de transmisión más comunes UNI, se encuentran: ethernet 10Base-T, 100Base-T, 1000Base-T, ATM, E1 y E3. No todas las ONT se encuentran preparados para transmitir al usuario final a través de las interfaces mencionadas anteriormente, para eso, existe un bloque anexo a la ONT denominado AF (*Adaptation Function*) o función de adaptación, y que permite la

transmisión de datos en la interfaz adecuada entre el usuario final y el ONT.

- SNI (*Services Network Interface*): es la interfaz de servicio final, y se encuentra tras la OLT. Establece las interfaces de transmisión a la OLT más comunes, tales como: ethernet 1000Base-X, ATM, E1 y E3. Todas las OLT se fabrican preparados para establecer una interfaz de servicio de central de red preparada para la transmisión de voz, datos y video de acuerdo con la interfaz establecida con el usuario final ONT.

La representación de las interfaces UNI y SNI, se muestran en la siguiente figura:

Figura 27. **GPON, interfaces UNI y SIN**



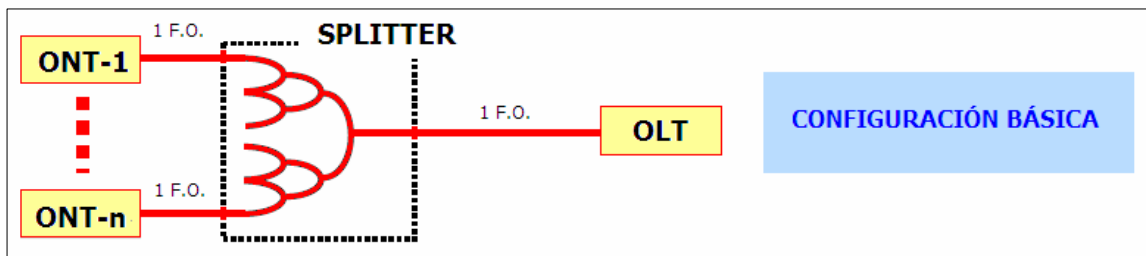
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

El estándar GPON establece diferentes configuraciones de red, relacionadas con la protección de la misma. Así pues, se puede introducir redundancia en la arquitectura de transmisión de diversas formas, duplicando la fibra de transporte entre la OLT y el divisor de cabecera. Incluso, esta redundancia se puede aplicar a la planta externa, entre los divisores y los ONT, creando cada vez más, una malla más robusta.

Con base en lo anterior, la red puede tener tres tipos de configuraciones determinadas:

- Configuración básica: está constituida por una fibra de conexión entre el divisor de cabecera y la OLT. Además, la conexión entre los diferentes divisores de etapa y sus ONT correspondientes, se realizan a través de un enlace de una sola fibra. Esta configuración requiere técnicas WDM. Cuando hay afectación en las líneas de fibra con este esquema, la falla tendrá la duración de la recuperación de la fibra óptica. Igual será el caso de falla del puerto GPON OLT. En la figura 28 se muestra el esquema básico GPON.

Figura 28. **Esquema básico GPON**

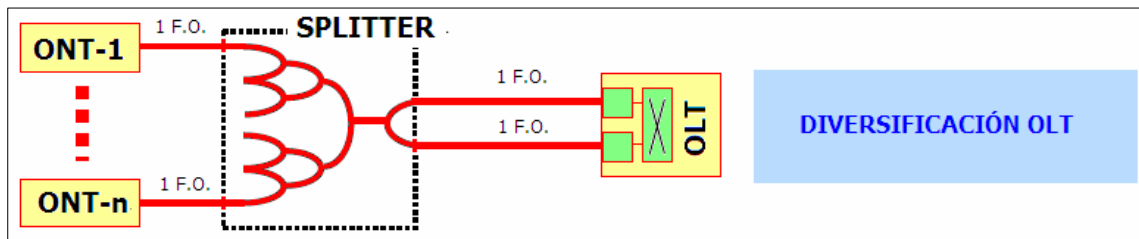


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- Diversificación OLT: esta configuración, establece un enlace de dos fibras entre el divisor de cabecera y la OLT. La conexión entre los divisores de etapa y las ONT se realizan a través de enlace de una sola fibra. Con esta configuración, no es necesaria la utilización de WDM, ya que la información de cada canal (ascendente y descendente) viajan a través de una fibra óptica dedicada. La OLT provee dos interfaces

GPON, y dos fibras entre *splitter* y OLT, lo cual brinda conmutación a la protección en caso de falla. En la figura 29 se muestra este esquema:

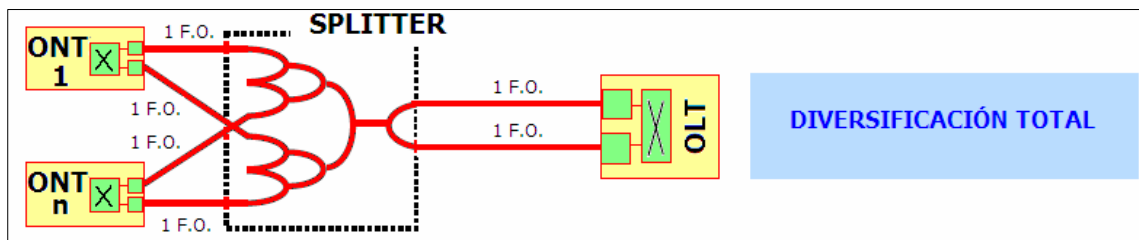
Figura 29. **Esquema de diversificación OLT**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- Diversificación total: con esta configuración, se establece, además de un enlace de dos fibras entre el divisor de cabecera y la OLT, una conexión de dos fibras entre los diferentes divisores de etapa y los ONT, haciendo una malla de la red de unos divisores a otros, y diversificando la señal de unos divisores a otros. Este esquema se muestra en la figura 30:

Figura 30. **Esquema diversificación total**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.5. Atenuación de potencia óptica

En las redes GPON, el uso de *splitter* o divisores ópticos, agrega pérdidas de potencia óptica a la ODN y se hace necesario tenerlas en cuenta para realizar un análisis de la potencia óptica, basados en la potencia óptica del puerto OLT, la cantidad de *splitter* y sus relaciones de Entradas:Salidas y la cantidad de ONT que requieren de los servicios de red.

Es importante tener en cuenta la siguiente ecuación, mencionada anteriormente, con la que se pueden calcular las pérdidas que añade cada *splitter* en función de su relación Entradas:Salidas

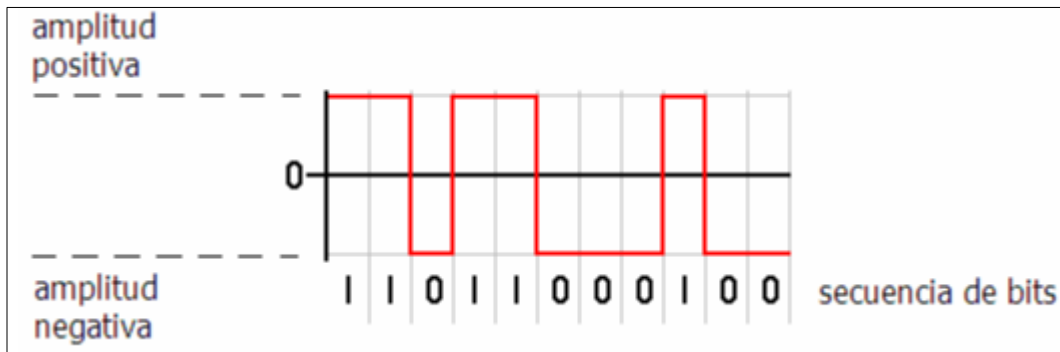
$$ATENUACIÓN_{SPLITTER} = 10 \log \frac{1}{N} \quad (3.2)$$

Como ejemplo de la aplicación de la ecuación (1.2), se podría averiguar que un *splitter* de 1:2 introduce pérdidas de 3 dB, un *splitter* 1:16 de 12 dB y un *splitter* 1:64 de 18 dB, aproximadamente. Lo anterior servirá para diseñar con base en el presupuesto óptico con el que se cuenta.

3.6. Codificación de la información

Para la transmisión óptica, el estándar GPON fija una codificación determinada, siendo esta la NRZ o sin retorno a cero (*Non Return to Zero*) pseudo aleatorio. En ella, la señal binaria que se desea transmitir, es codificada usando pulsos rectangulares, que no son más que amplitudes modulares con código determinado. La señal fluctúa entre +1 y -1 en función de si hay luz o no (bit=1, bit=0), tal y como se representa en figura siguiente:

Figura 31. **Codificación NRZ**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.7. Distancias permitidas en las redes GPON

En cuanto a las distancias geográficas que permitan alcanzar las capacidades de ancho de banda del estándar GPON, se tienen dos tipos de alcance:

- Alcance lógico. es la distancia máxima entre OLT y ONT que solo puede ser restringida por la capa física, siendo esta distancia 60 km para las redes GPON.
- Alcance físico: es la distancia física máxima entre la OLT de la central y la ONT de usuario final, siendo esta de hasta 20 km.

3.8. Corrección de errores

En las redes GPON, para la corrección de errores en la recepción, a consecuencia de errores en la transmisión, se utiliza el sistema FEC - *Forward*

Error Correction (corrección de errores hacia adelante) o codificación de canal, el cual es una de las técnicas usadas para controlar los errores en la transmisión de datos sobre canales poco confiables, o canales con riesgos de ser afectados por los efectos del ruido.

Básicamente, la forma de operar del FEC, es que al mensaje original, le son añadidos algunos bits de redundancia usando un código de corrección de errores ECC – *Error Correcting Code* (código de corrección de errores). En el transmisor, se envía la secuencia de datos al codificador, encargado de añadir los bits de redundancia. A la salida del codificador se obtiene una palabra código. Esta palabra código es enviada al receptor y este, mediante el decodificador adecuado y aplicando los algoritmos de corrección de errores, obtendrá la secuencia de datos original.

La redundancia permite al receptor detectar los errores que pueden ocurrir en cualquier lugar en el mensaje y corrige estos errores sin necesidad de tener que retransmitir información hacia el transmisor. Esta característica permite la corrección de errores sin que tenga que existir un canal de comunicación dedicado en reversa o hacia el transmisor, para solicitar retransmisión de datos. Esto implica el costo de un canal desde el transmisor a receptor, de ancho de banda fijo y alto.

FEC se aplica en situaciones en las que el costo de retransmitir información es altísimo o imposible, como en los enlaces de comunicación de una vía donde se hacen transmisiones *multicast* hacia múltiples receptores, como en el caso de GPON.

3.9. Canales de transmisión

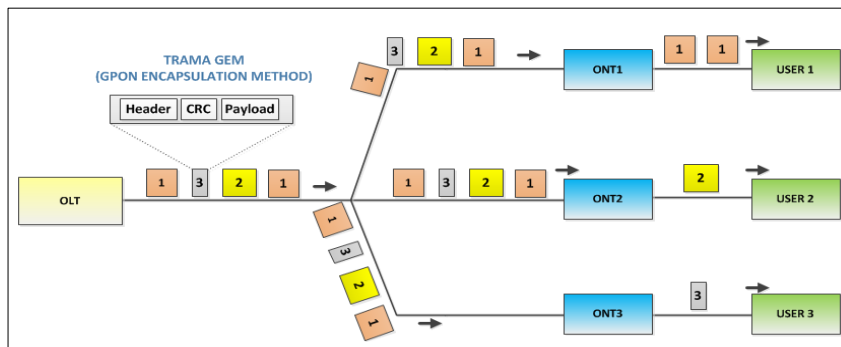
Se establecen para el estándar GPON, ciertos protocolos de transmisión y particularidades para los canales ascendente y descendente, los cuales se mencionan a continuación:

3.9.1. Canal descendente

Como se mencionó para las redes PON, en las redes GPON, la transmisión del canal descendente se basa en tecnología TDM (*Time Division Multiplexing*) por difusión. Todos los datos se transmiten a todas las ONT a través de los divisores ópticos, que tan solo se dedican a dividir la luz y por tanto a replicar los datos hacia cada uno de sus puertos. Cada ONT filtra los datos recibidos (solo se queda con aquellos que van dirigidos hacia el) que se envían en intervalos temporales determinados.

Esta forma de transmisión, por difusión TDM, se puede representar de acuerdo a la siguiente figura:

Figura 32. Transmisión en el canal descendente GPON



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

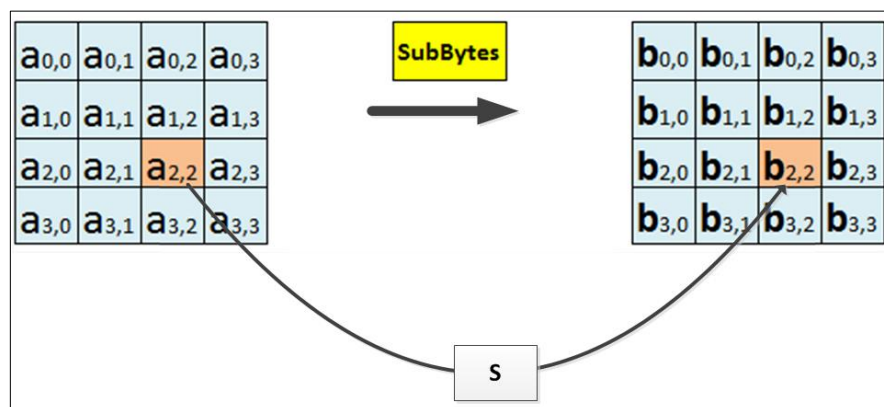
El protocolo de transmisión del canal descendente introduce un problema de confidencialidad de los datos enviados, debido a que la información se transmite a todos los usuarios. Para eso, el estándar GPON introduce un método de encriptación denominado AES - *Advanced Encryption Standard* (estándar de encriptación avanzado).

AES actúa con un tamaño de bloque de datos fijo de 128 bits y tamaños de clave de 128 bits también. Por otra parte, opera ambos datos en una matriz de 4x4 bytes, denominada “*state*”.

La mayoría de los cálculos del algoritmo se llevan a cabo en un campo finito determinado. Para el encriptado, cada ronda de la aplicación del algoritmo (excepto la última) consiste en cuatro pasos:

- *Sub Bytes* — en este paso se realiza una sustitución no lineal donde cada byte es reemplazado con otro de acuerdo a una tabla de búsqueda. Lo anterior se muestra en la figura 33:

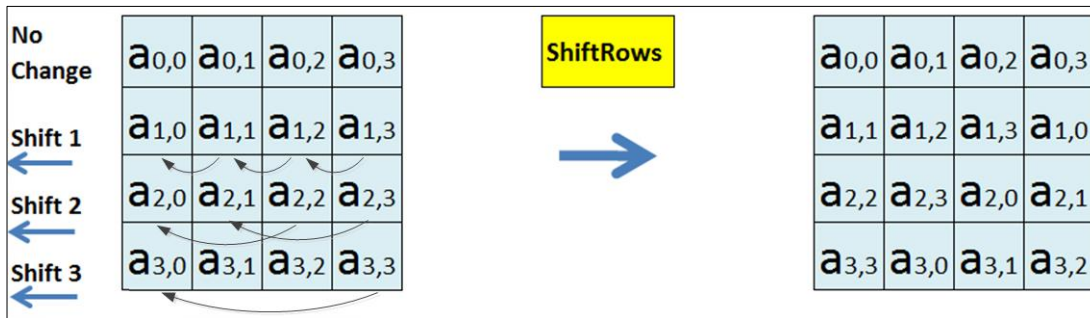
Figura 33. **Procedimiento *Sub Bytes* del proceso AES**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- *Shift Rows* — en este paso se realiza una transposición donde cada fila del *state* es rotado de manera cíclica un número determinado de veces. Este procedimiento se muestra en la figura 34:

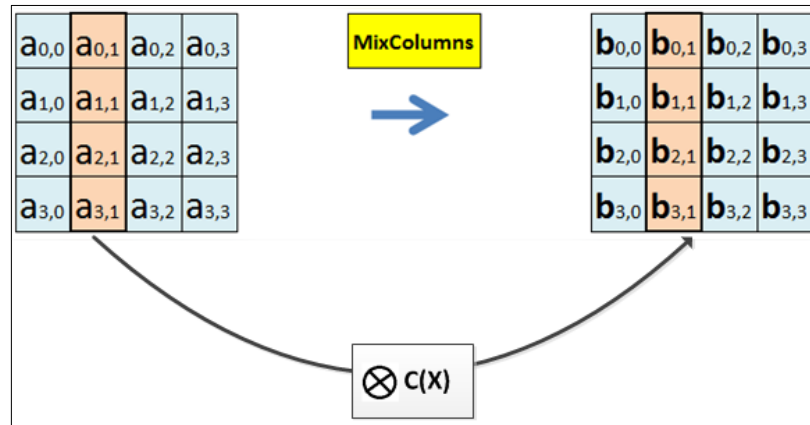
Figura 34. Procedimiento *Shift Rows* del proceso AES



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- *Mix Columns* — operación de mezclado que opera en las columnas del *state*, combinando los cuatro bytes en cada columna usando una transformación lineal. Este proceso se muestra en la figura 35.

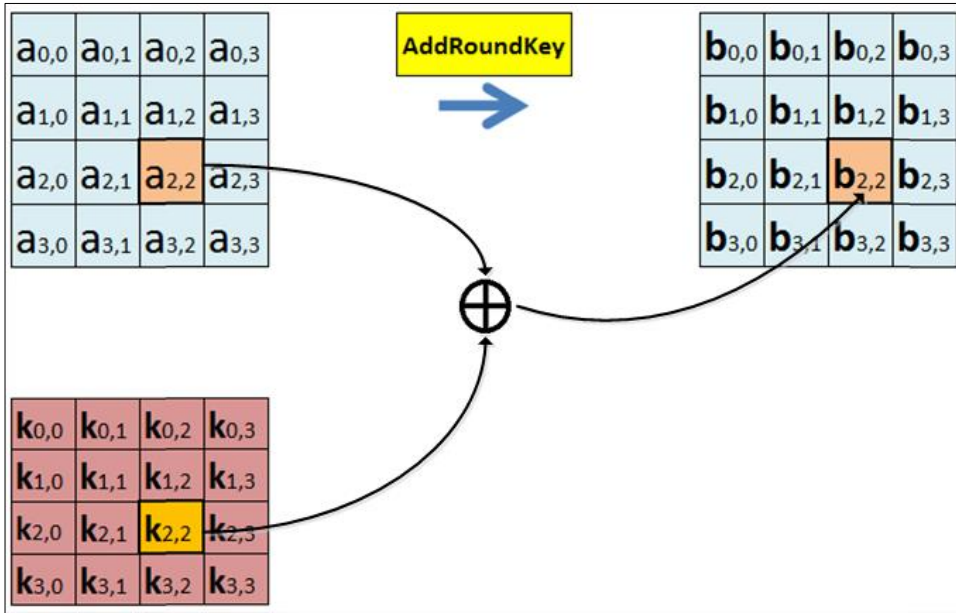
Figura 35. Procedimiento *Mix Columns* del proceso AES



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- *Add Round Key* — cada byte del «state» es combinado con la clave «round»; cada clave «round» se deriva de la clave de cifrado usando una iteración de la clave. La subclave se agrega combinando cada byte del *state* con el correspondiente byte de la subclave usando XOR. La ronda final reemplaza la fase *Mix Columns* por otra instancia de *Add Round Key*. El procedimiento anterior se muestra en la figura 36.

Figura 36. Procedimiento *Add RoundKey* del proceso AES



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Una vez encriptada la información o carga útil a enviar, se produce el encapsulamiento de la trama. Las tramas definidas por el estándar GPON se denominan GEM - GPON *Encapsulation Method* (método de encapsulamiento GPON). El protocolo GEM determina un tamaño de trama de datos aleatorio, aunque determina la longitud de algunos de sus campos de la siguiente manera:

- Cabecera (*Header*): este campo contiene información sobre sincronización de la trama y posee una longitud fija de 32 bits.
- CRC: que permite conocer si la información enviada ha llegado correctamente y sin errores a su destino. Posee una longitud fija de 8 bits.
- Carga útil (*Payload*): sobre este campo, se carga la información procedente del protocolo superior, con una longitud de hasta 1 518 bytes.

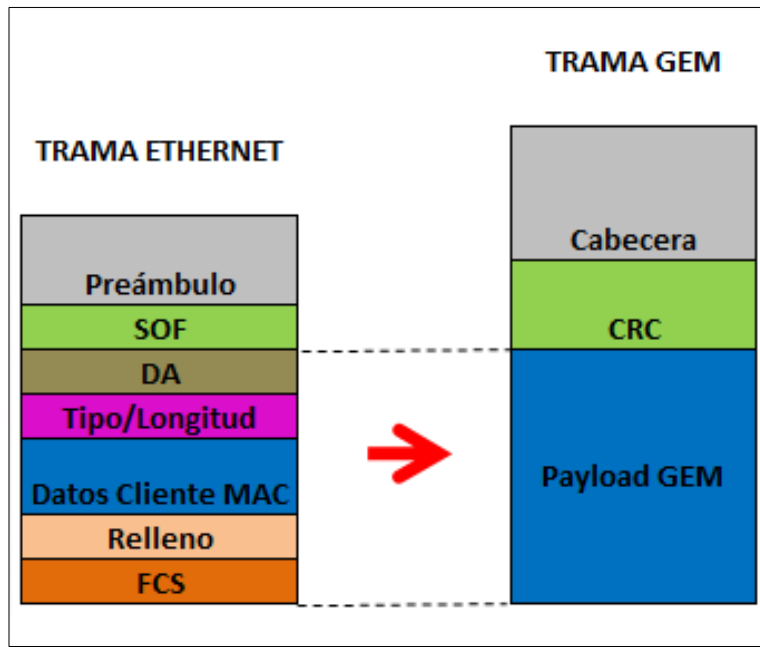
En este caso, encapsula y cifra la información procedente del paquete Ethernet o bien ATM.

En caso de transmisión Ethernet, la trama está constituida por los siguientes campos:

- Preámbulo (7 bytes): secuencia de bits usada para sincronizar y estabilizar el medio físico antes de iniciar la transmisión.
- SOF (1 byte): inicio de trama. Indica que el siguiente bit será el más significativo del campo de dirección MAC de destino.
- DA (6 bytes): dirección de destino. Especifica la dirección MAC hacia la que se envía la trama.
- SA (6 bytes): dirección de origen. Especifica la dirección MAC desde la que se envía la trama.
- Tipo (2 bytes): identifica el protocolo de red de alto nivel asociado con el paquete o, en su defecto, la longitud del campo de datos.
- Datos (0 – 1 500 bytes): este campo contiene la información recibida del nivel de red (la carga útil).
- Relleno (0 – 46 bytes): campo que se utiliza cuando la trama ethernet no alcanza los 64 bytes mínimos.
- FCS (4 bytes): secuencia de verificación de trama. Contiene un valor de verificación CRC.

En la figura 37, se muestra en forma general el encapsulado de la trama ethernet sobre GEM.

Figura 37. Encapsulado de la trama ethernet sobre GEM



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

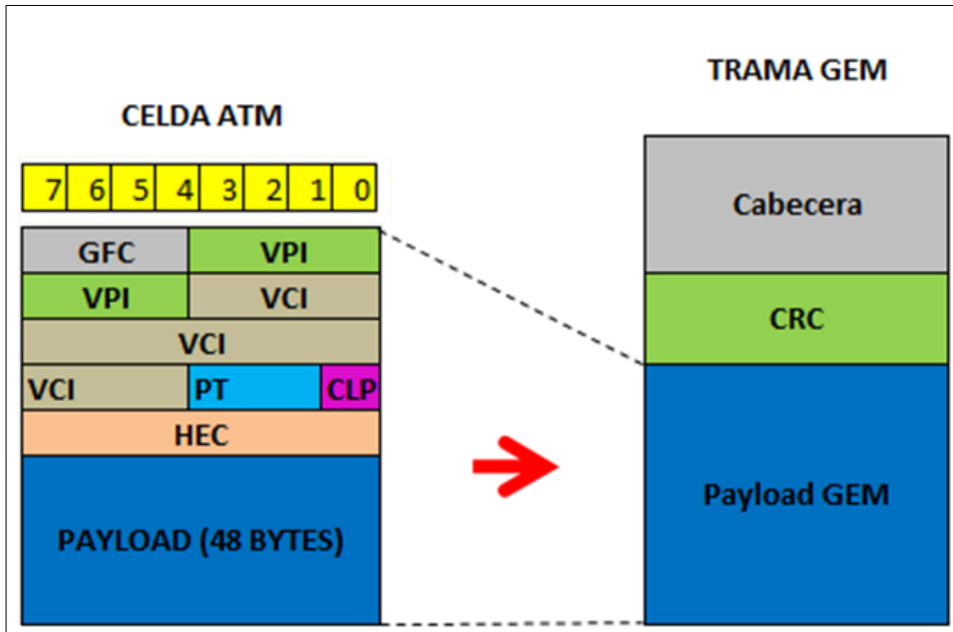
Si se produce transmisión sobre ATM, las celdas NNI- *Network to Network Interface* están constituidas por los siguientes campos:

- GFC (Control de flujo genérico, o *generic flow control*, 4 bits): el estándar GEM originariamente reserva el campo GFC para temas de gestión de tráfico, pero en la práctica no es utilizado. Las celdas NNI lo emplean para extender el campo VPI a 12 bits.
- VPI (Identificador de ruta virtual, o *virtual path identifier*, 8 bits): se utiliza para indicar la ruta de destino o final de la celda.

- VCI (Identificador de circuito virtual, o *virtual circuit identifier*, 16 bits): se utiliza para indicar la ruta de destino o final de la celda.
- PT (Tipo de información de usuario, o *payload type*, 3 bits): identifica el tipo de datos de la celda (de datos del usuario o de control).
- CLP (Prioridad, o *cell loss priority*, 1 bit): indica el nivel de prioridad de la celda. Si este bit está activo cuando la red ATM está congestionada la celda puede ser descartada.
- HEC (Corrección de error de cabecera, o *Header Error Correction*, 8 bits): contiene un código de detección de error que solo cubre la cabecera (no la información de usuario), y que permite detectar un buen número de errores múltiples y corregir errores simples.

En la figura 38, se muestra en forma general el encapsulado de la trama ATM sobre GEM

Figura 38. Encapsulado de la trama ATM sobre GEM



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Una vez realizada la encapsulación de ethernet o ATM sobre GEM, es necesario que ellas se encapsulen a su vez sobre tramas TDM para poder transmitirse desde la OLT hasta las ONT en un *broadcast* hacia todos ellos. Las tramas TDM, poseen longitud fija de 125 μ seg, con una capacidad máxima de:

- 19,440 bytes, para transmisión a velocidad de 1 244 Gbps
- 28,880 bytes, para transmisión a velocidad de 2 488 Gbps

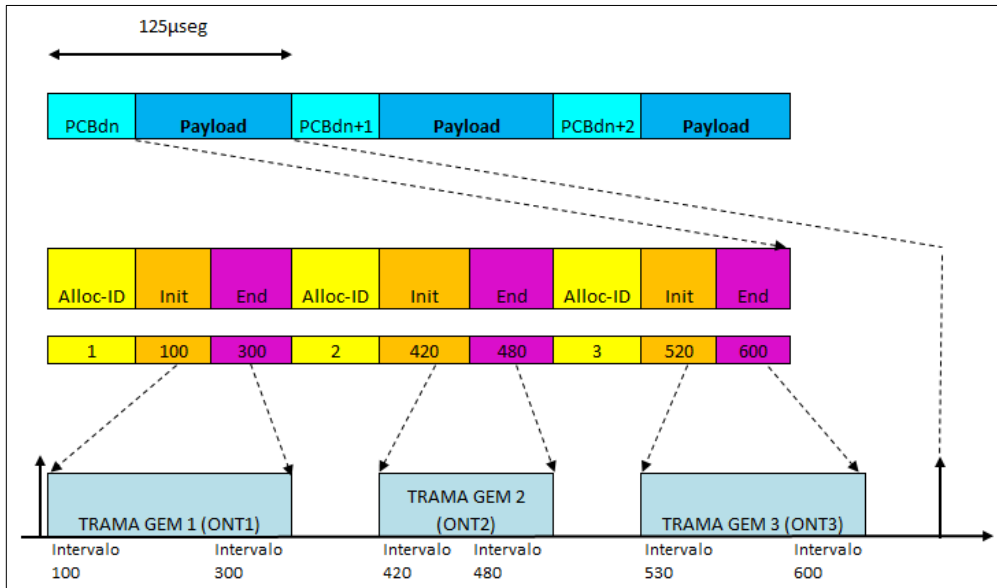
Además, las tramas TDM suelen ser aleatorias en cuanto a contenido, excepto sus 32 bits iniciales, que están destinados a la sincronización de las mismas.

La estructura general de trama TDM está constituida por dos campos principales, que son los siguientes:

- PCBd (32 bits), o bloque de control físico del canal descendente (*Physical Control Block Downstream*). Este campo lleva a cabo la sincronización de la trama, y posee la siguiente información:
 - Alloc-ID, identificador de localización (*Allocation Identifier*). Campo de 12 bits encargado de la identificación de las ONT.
 - Init o inicio, que indica el intervalo temporal de inicio de trama GEM asociada a un Alloc-ID determinado.
 - End o final, que indica el intervalo temporal de final de trama GEM asociada a un Alloc-ID determinado.
 - Carga útil o *Payload* (19,436 bytes o 28,836 bytes). La información que contiene este campo es la procedente del protocolo superior (GEM). La carga útil, puede estar constituida por varias tramas GEM con destino para uno o varios usuarios finales. De ahí la necesidad del Alloc-ID, ya que gracias a el, le permite conocer a qué usuario va destinada cada trama GEM, así como la longitud de la misma.

El proceso de encapsulación de la trama TDM se puede observar en la siguiente figura.

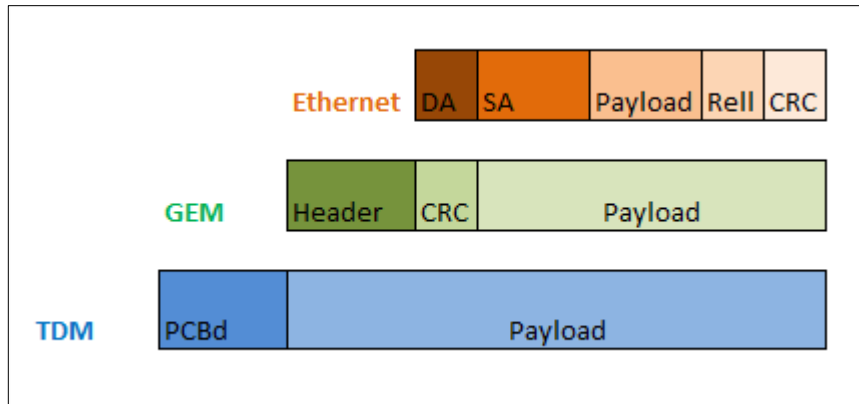
Figura 39. Encapsulación de la trama TDM



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

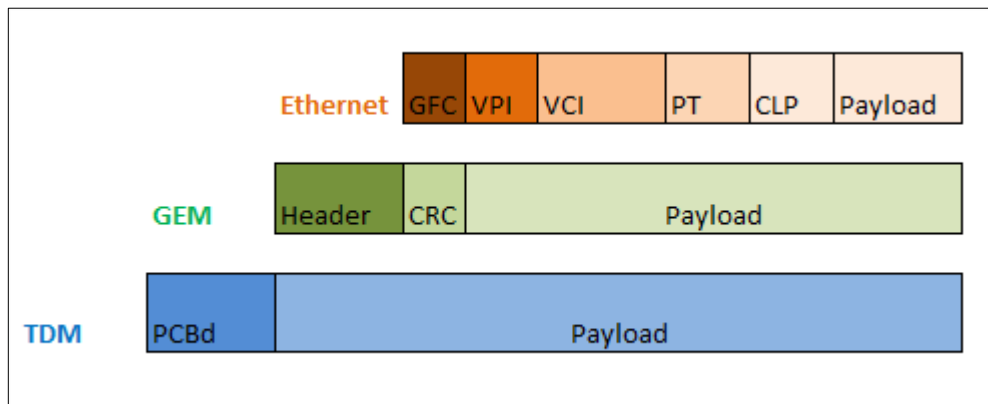
Se puede concluir con la información anterior, que la transmisión en el canal descendente en redes GPON, se lleva a cabo mediante la pila de protocolos: ethernet/ATM sobre GEM, y GEM sobre TDM, lo cual se muestra en las figuras 40 y 41.

Figura 40. **Pila de protocolos en canal descendente: transmisión Ethernet**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 41. **Pila de protocolos en canal descendente: transmisión ATM**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.9.2. Canal ascendente

Para este canal, se utiliza la tecnología TDMA (*Time Division Multiple Access*) o acceso múltiple por división en el tiempo. La OLT controla el canal

ascendente, asignando ventanas en diferentes instantes de tiempo para cada una de las ONT de la red. Se requiere un control de acceso al medio para evitar colisiones entre paquetes de distintas ONT y para distribuir el ancho de banda entre los usuarios.

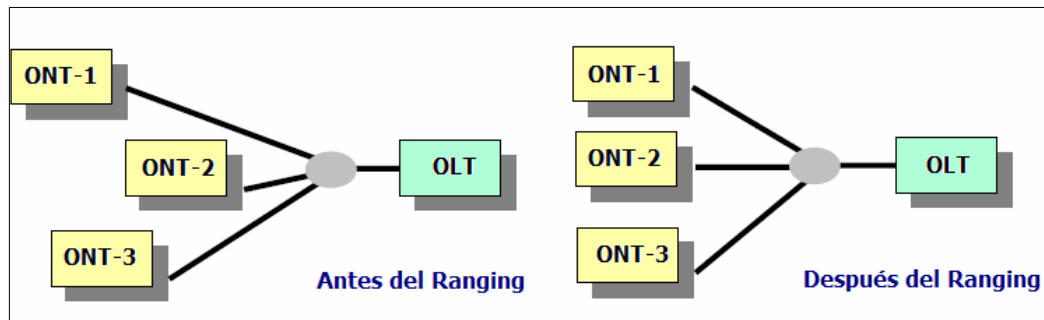
Las tramas TDMA del canal ascendente poseen una longitud variable en función de la información que envían las ONT y son aleatorias. Esto quiere decir que cada trama puede poseer información de una o varias ONT, por lo que es necesario que la información que viaja en la trama se diferencie completamente por cada ONT de dónde procede la información.

Para llevar a cabo este proceso de manera segura, es necesaria una sincronización casi perfecta de los paquetes ascendentes que llegan a la OLT, para que este sea capaz de formar la trama GEM. Por esto se hace necesario que la OLT conozca la distancia a la que están las ONT para tener en cuenta el retardo que incorpora cada una de ellas a la trama.

El proceso a través del cual la OLT calcula la distancia a la que se encuentra cada ONT de sí mismo, se denomina *Ranging*. Con este mecanismo, la OLT ubica a cada ONT a la misma distancia virtual del mismo, y entre ellas.

El proceso de *Ranging* se puede representar por medio de la figura 42.

Figura 42. **Sincronización mediante el proceso *Ranging***

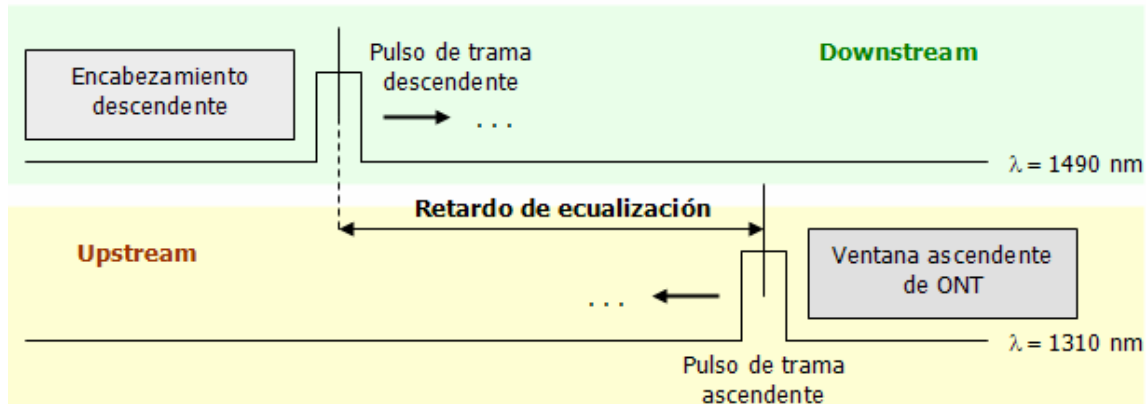


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Para el proceso de *Ranging*, la OLT envía a cada ONT un pulso de trama genérico como *broadcast*. Una vez establecida la distancia para todas respecto de la OLT, todas las ONT comienzan a transmitir un pulso genérico, evitando que la información de unos colisione con la de otros (físicamente debido a que se encuentran todos a distancias diferentes).

La OLT, recoge los pulsos procedentes de cada ONT. Cada pulso llega en un instante de tiempo diferente, lo que permite a la OLT asignar a cada ONT un retardo de ecualización o *Ranging time*. Este retardo de ecualización se define como el tiempo que tarda en llegar un pulso desde la ONT hasta la OLT, tal y como se puede observar en la figura siguiente:

Figura 43. Retardo de ecualización o *Ranging Time*



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

La sincronización obtenida a partir del procedimiento de *Ranging*, se mantiene gracias a las tramas de usuarios nuevos con ONT que van llegando a la OLT. En caso de no existir datos de usuarios nuevos para enviar a la OLT, las ONT envían tramas sin servicio, con la finalidad de mantener la sincronización entre ambos extremos.

Por último, cabe destacar, que las tramas TDMA incluyen un campo denominado BIP (*Bit Interleaved Parity*) o bit de paridad, de 8 bits encargado de la detección de errores propiamente y no de su corrección. El BIP, consiste en un campo de un byte que está antes de la carga útil de la trama y que, en caso de errores en el mismo, permite reconocerlos y tratarlos.

4. CASO DE APLICACIÓN DE UNA RED GPON

Actualmente en las redes de comunicaciones, pueden haber varias situaciones, características de las mismas o requerimientos que van de acuerdo a las nuevas tecnologías, que pueden hacer de las redes GPON, una opción adecuada para la entrega de los servicios.

Algunos de los casos en los cuales las redes GPON proporcionan un método de entrega de servicios adecuada son:

- Soporte de transmisión de alta capacidad, la cual es necesaria para tecnologías que están en pleno crecimiento hoy en día o con posibilidades altas de crecimiento, tales como televisión IP (IPTV) o *broadcast* de TV en vivo, enlaces de datos de grandes anchos de banda, servicios de redes de telefonía y datos, en los cuales hoy en día la demanda de ancho de banda es cada vez mayor, entre otros. Estas tecnologías requieren anchos de banda altos, que se pueden lograr por medio del despliegue masivo de fibra óptica entre nodos, celdas de telefonía y hacia las instalaciones de usuarios finales.

Limitantes de despliegue de las redes de fibra óptica y cobre. Actualmente existen redes de transmisión que entregan los servicios a los usuarios utilizando tecnologías como SDH, PDH, IP y convertidores de medio, en cuyos casos se utilizan dos o un hilo de fibra óptica, o bien un par de cobre desde los nodos del proveedor hasta las instalaciones de cada uno de los clientes. Esta limitante hace los sistemas de entrega

de servicios actuales, poco escalables o con dificultad de crecimiento a medida que la demanda lo hace.

Esto provoca que en estos casos, sea necesario un despliegue masivo de hilos de fibra óptica hacia los clientes, lo cual da como resultado que los cables y los equipos distribuidores de fibra óptica sean consumidos rápidamente, una cantidad alta de tendidos de fibra a nivel de nodos y necesidad de equipos con altas densidades de puertos, para soportar el esquema de entrega de puerto por cliente, por lo tanto también grandes cantidades de equipos instalados en nodos, altos consumos de energía altos, espacio limitado y necesidad de crecimiento en nodos no controlado.

En este caso, también se tiene la necesidad de buscar nuevas tecnologías de transporte, por la baja capacidad que las tecnologías mencionadas PDH, SDH e IP convencionales pueden proporcionar.

- Necesidad de transporte de servicios múltiples hacia usuarios finales, tal es el caso del transporte de servicios *Triple-Play*, que consisten en datos, voz y video u otras combinaciones de servicios, sobre un mismo canal de comunicaciones.
- Alta concentración de clientes en zonas residenciales o metropolitanas, en las que por los servicios requeridos y las tecnologías de transporte actuales, se hace necesaria la búsqueda de tecnologías que permitan optimizar los recursos de la red.

4.1. Escenarios que GPON puede sustituir

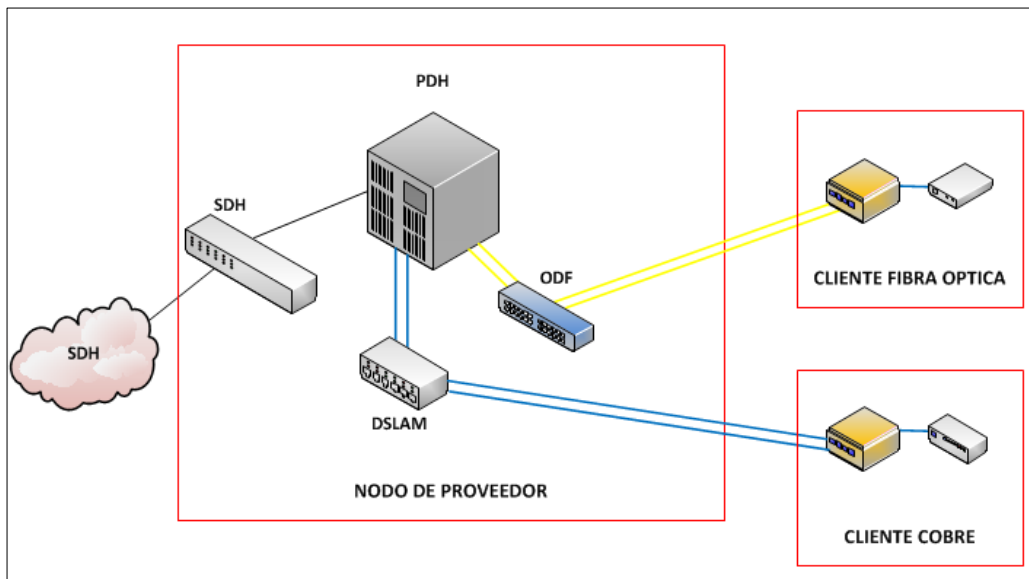
Con las características o necesidades mencionadas anteriormente, que las redes de comunicaciones deben apuntar a cubrir actualmente o en un futuro cercano, se pueden listar algunos casos de entrega de servicios, que las redes GPON pueden sustituir o transportar por medio de ellas:

- Soluciones SDH-PDH/ATM. En estos casos se puede tener un despliegue de equipos PDH en nodos del proveedor, desde los cuales se entregan los servicios a los clientes, ya sea por fibra óptica o cobre.
 - Cobre. En este caso, se pueden utilizar tecnologías como ADSL- *Asymmetric Digital Subscriber Line* (línea asimétrica de abonado digital), que utiliza el par de cobre de telefonía tradicional y la convierte en una línea de alta velocidad. Se utiliza un par de cobre desde el equipo conectado hacia el DSLAM – *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*, equipo que proporciona a los usuarios acceso a los servicios sobre cable par trenzado de cobre, hasta el usuario final en este esquema.
 - Fibra óptica. En este caso se entrega desde el equipo PDH, una interfaz de fibra óptica, que llega hasta el cliente a un equipo PDH de usuario final, para conectar allí sus equipos. Se utilizan 2 hilos de fibra por cada cliente entregado de esta forma.

Las opciones de entrega PDH-SDH/ATM, se muestran en la siguiente figura, en donde se observa que en el equipo PDH se pueden ubicar las interfaces de cobre y fibra óptica, que son interconectadas a nivel de nodo de

proveedor a los equipos DSLAM y a los distribuidores de fibra ODF-*Optical Distribution Frame*, para ser enrutados hacia los clientes.

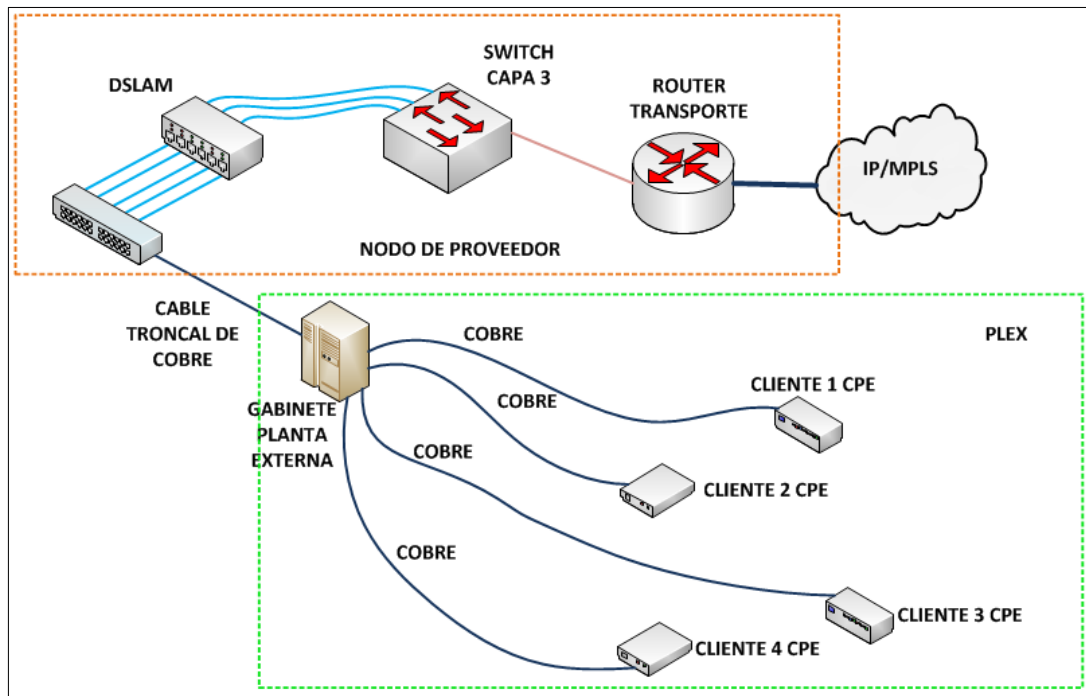
Figura 44. **Esquema general de entrega de clientes PDH: cobre y fibra**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- Soluciones IP. Los clientes también pueden recibir sus servicios provenientes de una red IP, sin la necesidad de interfaces PDH o módems instalados en sus instalaciones. Al igual que con la tecnología PDH, los clientes pueden ser entregados en cobre o fibra óptica, por medio de IP.
 - Cobre. Esta solución puede implementarse tomando un puerto de un *switch* de la red IP y conectándolo hacia un DSLAM. Este esquema, se muestra en la figura 45.

Figura 45. Esquema general de entrega de clientes IP en cobre



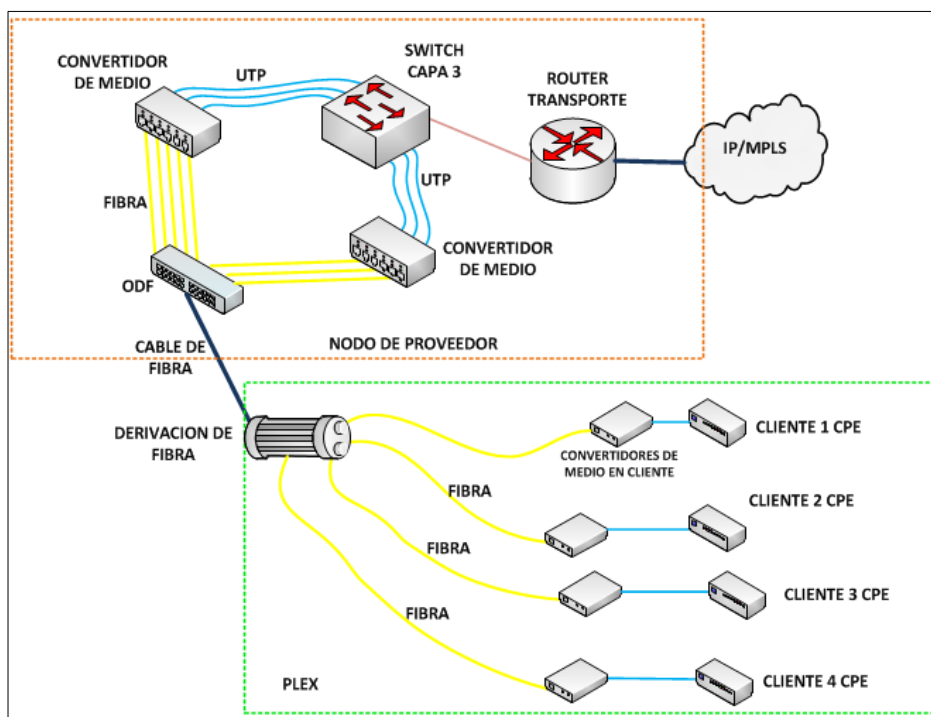
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

- Fibra óptica. Para las soluciones IP por fibra óptica, se utiliza un *switch* Capa 3, al igual que en el esquema de cobre anterior, conectando a cada uno de sus puertos, un convertidor de medio. El convertidor de medio, se encarga de convertir la información de impulsos eléctricos a impulsos ópticos, para poder enviar y recibir la información a los usuarios finales, por medio de los tendidos de fibra de planta externa.

Se instala en el las instalaciones del usuario final, un convertidor de medio que hace la operación inversa realizada en el nodo del proveedor, para entregar una interfaz que puede ser por ejemplo

RJ-45. En este escenario, se puede utilizar un hilo de fibra para transmisión y recepción, en lugar de dos. En la siguiente figura se muestra el esquema mencionado anteriormente, que puede ser una opción para la entrega de servicios IP por fibra óptica.

Figura 46. **Esquema general de entrega de clientes IP en fibra óptica**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

4.2. Solución GPON

Una vez se mostraron brevemente algunos de los esquemas de entrega de servicios y que pueden ser optimizados, se presenta una propuesta de red GPON, sus principales ventajas, características y posibles variantes.

4.2.1. Esquemas de red GPON

El esquema básico de una red GPON, que se puede tomar como referencia para implementaciones grandes, consta de:

- Una OLT instalada en un nodo de proveedor, la cual posee las conexiones a las redes de diversas tecnologías y servicios que se entregan a los clientes, tales como: voz, datos y video. Estas conexiones deben ser de alta capacidad para soportar la cantidad de tráfico que circulará por ellas.

En cada OLT se puede conectar una cantidad *splitter* de primera etapa, de hasta 128 teóricamente y de cada uno de ellos se podrá tener hasta 64 usuarios, teniendo hasta 8 192 clientes por OLT. Esto se mencionó con la ecuación (3.1).

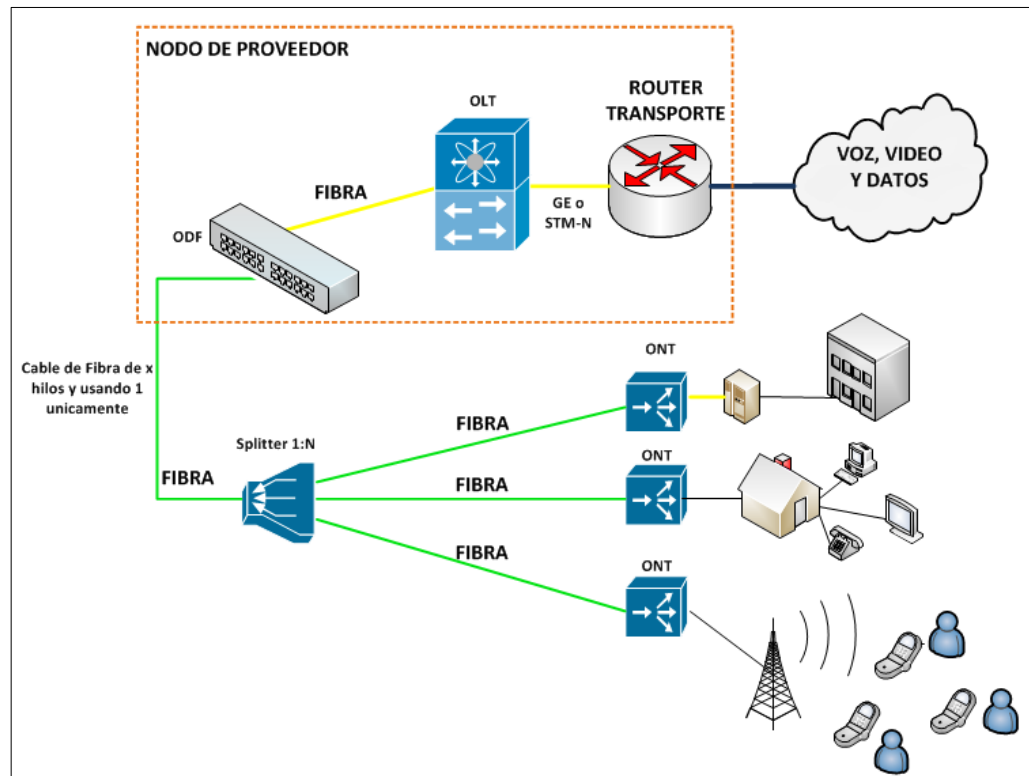
Se toma cada uno de los puertos de la OLT y se conecta por medio de un ODF, por ejemplo, para salir hacia el siguiente elemento, el *splitter* de primera etapa. Entre el ODF mencionado y el *splitter*, se encontrará el cable de fibra óptica, enrutado en la calle.

- *Splitter*. A partir de cada uno de los puertos de la OLT, se lleva una conexión de un hilo de fibra óptica directamente a los *splitter* de primera etapa. Los *splitter* se pueden instalar en el mismo nodo que la OLT, o bien, si los *splitter* de primera etapa se instalan en postes o gabinetes externos al nodo del proveedor, la conectividad se hace por medio de un ODF con conexión a la fibra de panta externa.

Dependiendo del diseño de la red, los *splitter* de primera etapa pueden ser 1:N, teniendo una entrada proveniente del OLT y N salidas hacia los usuarios finales o bien hacia otros *splitter*, que serían de segunda etapa. También pueden ser de 2:N, en los casos en los que se tenga redundancia de fibra proveniente de los OLT logrando así un esquema de red más robusto.

- Las ONT/ONU. Estos equipos están instalados en el usuario final o bien en el punto más cercano al usuario final y reciben la conexión de fibra óptica proveniente del *splitter* más cercano. A partir de la conexión de fibra óptica recibida, entregan una o varias interfaces para que el usuario final pueda acceder a las redes de voz, datos y video por ejemplo. En la siguiente figura se muestra el esquema básico GPON.

Figura 47. Esquema básico GPON



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Como se puede observar en la figura 47 y con el último detalle del esquema básico GPON, una de las mayores utilidades de la implementación de esta tecnología es la optimización del despliegue de la fibra óptica y por consiguiente su utilización ordenada. En ella se utiliza un puerto GPON de la OLT conectado por medio directo o por un ODF de nodo, a los *splitter* de primera etapa y de ellos se conectan los *splitter* de segunda etapa o bien los usuarios finales.

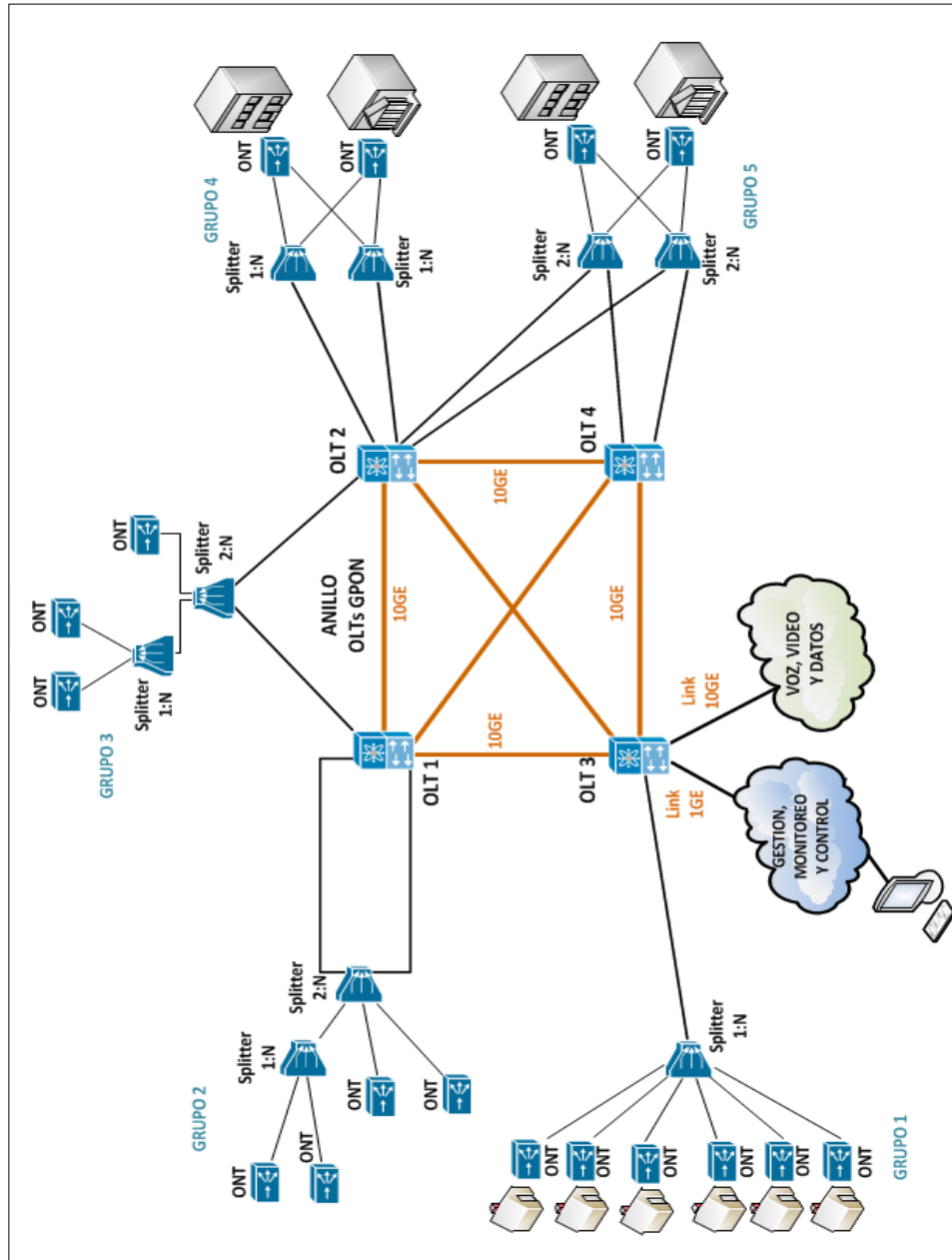
Con esto se evita la utilización de uno o dos hilos de fibra por cada cliente y en su lugar se utiliza un único hilo o par de hilos para la entrega de hasta 64

usuarios, según la Norma ITU-T G984.1. Todo esto se debe al mecanismo de funcionamiento de GPON explicado en el capítulo 3 del presente documento.

Luego de revisar el esquema básico GPON se puede revisar otros esquemas un poco más avanzados, partiendo de los esquemas de protección presentados en el capítulo 3.4 y de las características de los *splitter* con base en su número de entradas y salidas, permitiendo diversas combinaciones.

La siguiente figura 48 se muestra un esquema aplicando los conceptos de configuraciones GPON y *splitter* de diverso número de entradas y salidas:

Figura 48. **Esquema GPON con aplicación de configuraciones redundantes**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

El esquema de la figura 48, es más ilustrativo de las diversas configuraciones que se pueden realizar con una Red GPON y se pueden resaltar los siguientes apartados:

- Se observa un anillo de OLT, debido a que en una topología real, serán varios los nodos que por distribución geográfica, darán cobertura a los usuarios finales, en lugar de una única OLT realizando la misma función para todos. Con ello se tendrá una cobertura ordenada por zonas geográficas y una red escalable a futuro.

Los enlaces entre las OLT, permiten tener redundancia ante cortes de fibra óptica, para la conmutación del tráfico hacia los enlaces que no son afectados. Dichos enlaces deben ser de alta capacidad, ya que a través de ellos será transportado todo el tráfico de la red GPON, hacia las redes de servicios voz, datos y video. En este esquema se colocan como ejemplo enlaces de 10 Gbps para esta función.

- Se observa una conexión en la OLT 3, hacia las redes de servicios de voz, datos y video, la cual será el punto de subida y bajada de información para cada una de las restantes OLT y por consiguiente de los usuarios finales y sus respectivas ONT.
- Se tiene también en la OLT 3, un punto de conexión hacia la red de gestión del operador, por medio de la cual se podrán monitorear y configurar, cada uno de los equipos y sus enlaces, entre otras funciones.
- Se tienen como ejemplo 5 grupos de clientes que por solicitud propia, nivel de importancia de los mismos o por características de la red, pueden tener servicios con ciertos niveles de redundancia, con base en

los esquemas de protección GPON presentados en el capítulo 3.4, a las características de entradas y salidas de los *splitter* ópticos, cantidad de puertos disponibles por OLT, entre otros. La descripción breve de estos grupos es la siguiente:

- Grupo 1. Se trata de una topología de clientes que pueden ser residencias, negocios u otro, que no demandan o solicitan un nivel de protección alto. Adicional pueden estar en una zona en donde en la OLT 3 se requiera un número alto de puertos GPON y no se tengan los suficientes para dar protección de puerto a nivel de OLT.

Se tiene entonces un puerto de OLT, conectado a un *splitter* de primera etapa 1:N y desde el cual estarán directamente conectados cada uno de los usuarios finales.

En este grupo lo importante es el número de salidas del *splitter* mencionado, para saber en qué momento se debe utilizar otro u otros dependiendo de la demanda de usuarios. Esto tendrá como punto importante el control del presupuesto óptico o potencia óptica que sale del puerto GPON, para poder atender a cada cliente.

- Grupo 2. En esta configuración se tiene una protección a nivel de puerto GPON de la OLT 1, hacia el *splitter* óptico 2:N, la cual brinda protección en caso de falla del puerto principal GPON de la OLT, conmutando al secundario ante la falla.

Luego se tiene un segundo *splitter* 1:N en cascada, proporcionando conectividad a los usuarios mostrados.

- Grupo 3. Esta configuración puede ser utilizada para clientes importantes o que a su solicitud requieran protección de diferente puerto GPON, desde diferente OLT. Con ello se estará protegiendo a los clientes contra fallos en caso de cortes de fibra óptica desde la OLT 1 y OLT 2, adicional también se protegerán los servicios contra fallos de cada una de las OLT mencionadas.

En este caso, uno de los puntos posibles de falla es el *splitter* óptico 2:N, ya que en caso de fallar, todos los clientes se verán afectados.

- Grupo 4. Para este grupo se aplica una protección a nivel de puerto GPON de la OLT y a nivel del *splitter* de Primera etapa, ya que cada puerto de la OLT se conecta a distinto *splitter* y de cada uno de esos *splitter*, se conecta cada una de las ONT de cliente. Esto provee seguridad en caso de fallo a nivel de puerto de la OLT y de fallo de alguno de los *splitter* de primera etapa.
- Grupo 5. En este grupo, el esquema de protección que se está aplicando es el más completo que se puede tener, ya que se protegerán los servicios del cliente de la siguiente forma:
 - Puerto GPON OLT, se tendrán dos puertos GPON en cada una de las OLT 2 y 4, conectados a los *splitter* 2:N, para prevenir fallos a nivel de puerto en cada OLT.

- OLT, se tendrán conexiones provenientes de la OLT 2 y 4, con lo cual se protegerán los servicios en caso de fallo de alguna de las OLT mencionadas.
- *Splitter* de primera etapa, ya que se tienen dos *splitter* 2:N recibiendo las conexiones de cada OLT, con lo cual se protegerán los servicios si hay fallo de algún puerto de *splitter* o de algún *splitter* completo.

5. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN GPON

De acuerdo al capítulo 4 del presente documento, se pueden elegir entre diversos esquemas de red GPON para la entrega de servicios de clientes, con base en los requerimientos de los mismos, la topología de la red del proveedor de servicios, la topología actual o si la red será nueva, entre otros.

Para la elección de un esquema de red GPON, se puede utilizar el siguiente esquema propuesto de actividades, como apoyo para el diseño adecuado de una red de este tipo. En el mismo se toman en cuenta factores como tener previo conocimiento de la tecnología GPON, trabajar en conjunto con proveedores de servicios de marcas reconocidas y poner como ejemplo un escenario imaginario únicamente con fines de ejemplo.

Para mejor entendimiento, se llamará proveedor de servicios a la empresa que desea implementar GPON y *vendor*, al proveedor de equipos y servicios, que podrá participar en el diseño, venta y ejecución de la solución.

5.1. Criterios de selección

Para la etapa de diseño, se pueden considerar dos etapas del proceso de selección, de la solución GPON óptima:

- Se debe tener presente que la solución propuesta por medio de GPON, debe satisfacer todos los requerimientos del proveedor de servicios, en términos de especificaciones técnicas y características de gestión y operación/mantenimiento.

- Los costos asociados y el servicio global ofrecido por *vendor*, constituirán los criterios principales cuando se seleccione entre las diversas soluciones validas ofrecidas.

Después de examinar las propuestas que distintos *vendor* de tecnologías puedan hacer a la empresa proveedora de servicios, es una buena práctica solicitar a los ofertantes, una presentación de las ofertas recibidas. Esto con el fin de que los involucrados en la toma de decisión de implementación de una red GPON, estén totalmente de acuerdo con lo ofrecido.

Como complemento, de ninguna manera el proveedor de servicios deberá explicar las razones de su selección y tampoco deberá estar obligado a dar un seguimiento a la firma de un contrato mientras el proceso de selección no haya concluido. Al ser definitiva la elección de una u otra propuesta ofrecida, se puede proceder a explicar los motivos y asumir compromisos contractuales con el *vendor* seleccionado. Esto es conveniente para tener la tranquilidad de escoger con el mejor criterio posible.

Algunos de los eventos que un proveedor de servicios puede llevar a cabo para asegurar que su diseño GPON sea el más adecuado pueden ser:

- Enviar una solicitud de propuesta RFP (*Request For Proposal*), que consiste en la solicitud a potenciales *vendor* de la tecnología en cuestión (en este caso GPON) de una propuesta de diseño, implementación y económico.

En la RFP se describirá la implementación GPON y las condiciones del trabajo, que pueden involucrar:

- Condiciones de la red actual
- Distribución de zonas o clientes a cubrir
- Cumplimiento de requerimientos técnicos, entre los que se pueden mencionar de forma resumida:
 - Requerimientos generales
 - ✓ Propósito de la aplicación
 - ✓ Requisitos de escalabilidad
 - ✓ Requisitos de experiencia en implementación GPON de parte del *vendor*, tanto en presencia con otros proveedores de servicios, así como en tiempo de haber implementado y con cantidades de clientes requeridos.
 - ✓ Tiempo mínimo de aplicación comercial de los equipos del *vendor*.
 - ✓ Cumplimiento de estándares internacionales, que permitan asegurar la calidad de la red. Entre ellos se pueden incluir estándares de la ITU-T, IEEE, IETF, entre otros. Asegurando también que el cumplimiento con ellos se mantenga al día con las actualizaciones o últimas versiones.
 - Arquitectura del sistema
 - ✓ Especificaciones de los equipos a implementar tales como:

- ❖ Dimensiones de los equipos, ya sea en mm, cm, pulgadas, entre otros. Dependiendo de la forma de trabajo del proveedor de servicios.
 - ❖ Peso de los equipos, en caso de estar completamente llenos y vacíos.
 - ❖ Acceso frontal y trasero.
 - ❖ Rango de temperatura y humedad, de funcionamiento normal.
 - ❖ Tipos de fuentes de alimentación soportadas y redundancia de fuentes.
 - ❖ Cantidad y redundancia de ventiladores.
 - ❖ Consumo (potencia) por equipo y por puerto PON.
- ✓ Características de tráfico
- ❖ Capacidad de conmutación de tráfico de los equipos.
 - ❖ Ancho de banda manejado por los equipos.
 - ❖ Cantidad de Interfaces y capacidad de las mismas: 1 Gbps, 10 Gbps, entre otros.
 - ❖ Interfaces *hot-swappable* (intercambiables en caliente).
 - ❖ *Upgrade/Downgrade* de software en caliente.
 - ❖ Soporte de interfaces TDM E1, STM-1.
 - ❖ Soporte de interfaces DSL.
- ✓ Características GPON
- ❖ Determinar en la OLT la cantidad de interfaces GPON por tarjeta.

- ❖ Relación de *splitter* por puerto GPON, por ejemplo 1:128.
 - ❖ Cumplir con los estándares de presupuesto óptico, por ejemplo 28 dB B+, 32 dB C+.
 - ❖ Soportar FEC bidireccional.
 - ❖ Determinar el tipo de y cantidad de interfaces en las ONU/ONT.
- Sincronía de la red.
 - Definición de operación capa 2 y capa 3 del modelo OSI.
 - Calidad de servicio QoS (*Quality of Service*).
 - ✓ Definir cómo se maneja la calidad del servicio para tráfico de datos y video por ejemplo, cómo se separa, marca y maneja en colas dependiendo de prioridades definidas.
 - Administración de la red, tanto remota como local, en banda o fuera de banda, entre otros.
- Condiciones de espacio y energía de equipos.
- Recepción de las propuestas de parte de cada proveedor.
 - Presentación de las propuestas.
 - Proceso de selección.
 - Firma de contrato.
 - Implementación y pruebas.

Es muy importante tomar en consideración a los *vendor* que cuenten con mayor participación a nivel global/regional para asegurar un buen soporte pre y posventa de la solución. Algunos de los *vendor* mencionados, que pueden presentar un diseño GPON en la actualidad, basados en su experiencia alrededor del mundo son:

- Alcatel-Lucent
- Huawei *Technologies*
- ZTE *Corporation*
- Tellabs

5.2. Escenario de aplicación

Con base en lo revisado en este capítulo y los capítulos iniciales, se analizará un hipotético caso de aplicación GPON, para Guatemala.

En Guatemala, las regiones comerciales que tienen una alta densidad de empresas¹ y con tipos de servicios en los que la habilitación de GPON para cada una de ellas, provea de grandes beneficios al ser implementado por los proveedores, son las siguientes:

- Ciudad de Guatemala, departamento de Guatemala
 - Zonas 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15.
- Zona Central Quetzaltenango, departamento Quetzaltenango
 - Zona 8, 9, 7, 2, 10 y 3.
- Cobán, departamento Alta Verapaz
 - Zona 4, 3, 7 y 2.

De las regiones anteriormente mencionadas, se tomará como ejemplo la aplicación de GPON en la zona Central de Quetzaltenango, con una distribución hipotética de clientes y zonas importantes de crecimiento de servicios de internet, datos, voz, video, entre otros. Esto debido a que en el estudio

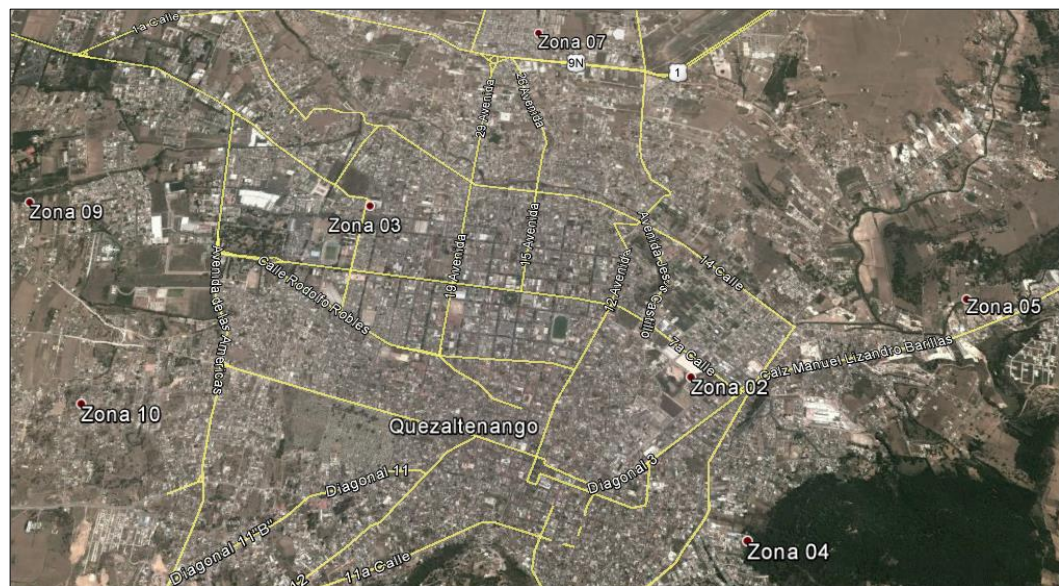
¹ Diario el Periódico, 31 de Mayo de 2012, distribución del comercio en Guatemala. <http://elperiodico.com.gt/es/20120531/economia/212949/>

mencionado de la distribución de comercio en Guatemala, Quetzaltenango es el segundo lugar en número de empresas diversas, luego de la ciudad Capital.

A continuación se enumeran algunos pasos importantes que ayudarán a comprender la hipotética situación actual de clientes en la región, así como el diseño GPON propuesto:

- Se presenta inicialmente una imagen de la Zona Central de Quetzaltenango, para tener una idea de las zonas mencionadas anteriormente y que tienen la mayor probabilidad de poseer clientes con servicios que se puedan cubrir con GPON, así como ser zonas de crecimiento en un futuro cercano. Lo anterior se muestra en la figura 49:

Figura 49. **Distribución de zonas en Quetzaltenango, Región Central**

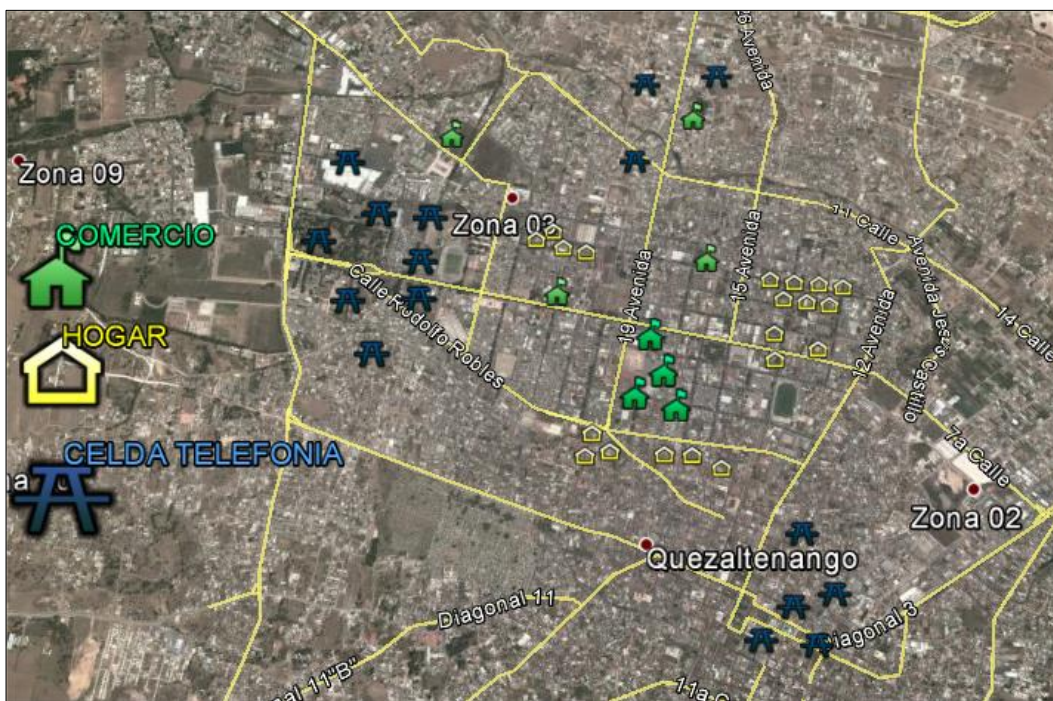


Fuente: Google Earth 2013, Zona Central Quetzaltenango, Guatemala.

- A continuación se muestra una hipotética distribución de usuarios finales, de servicios de internet, datos, voz, video, entre otros. Tanto en comercios, residenciales, celdas de telefonía, entre otros. La cual permitirá plantear el escenario de aplicación GPON.

En la figura 50, se colocó la nomenclatura de cada tipo de cliente, para poder distinguir uno de otro, teniendo hogar, comercio y celda de telefonía como la principal clasificación.

Figura 50. **Distribución hipotética de usuarios para aplicación GPON**



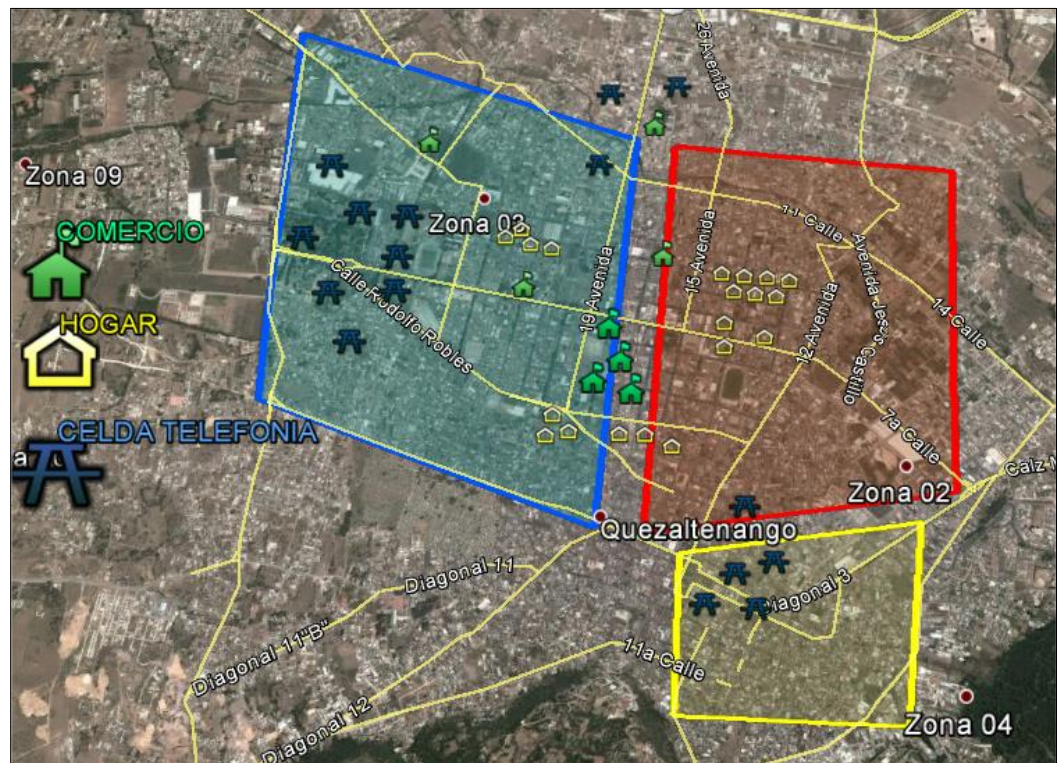
Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Con base en la distribución de clientes, es conveniente hacer un enfoque a las zonas en las que se encuentran los mismos, como zonas de crecimiento,

buscando que la cobertura GPON permita a más usuarios ingresar a la red desplegada. A continuación se observa la distribución de clientes anterior, con las zonas más importantes tomadas en cuenta como zonas de potencial crecimiento.

Al tomar en cuenta zonas de potencial crecimiento, se tendrá la capacidad de diseñar una red escalable y no una red que requiera cambios en diseño e implementación en lapsos de tiempo cortos. En la figura 51, se muestra la identificación de zonas de crecimiento potencial.

Figura 51. **Identificación de zonas de potencial crecimiento GPON**



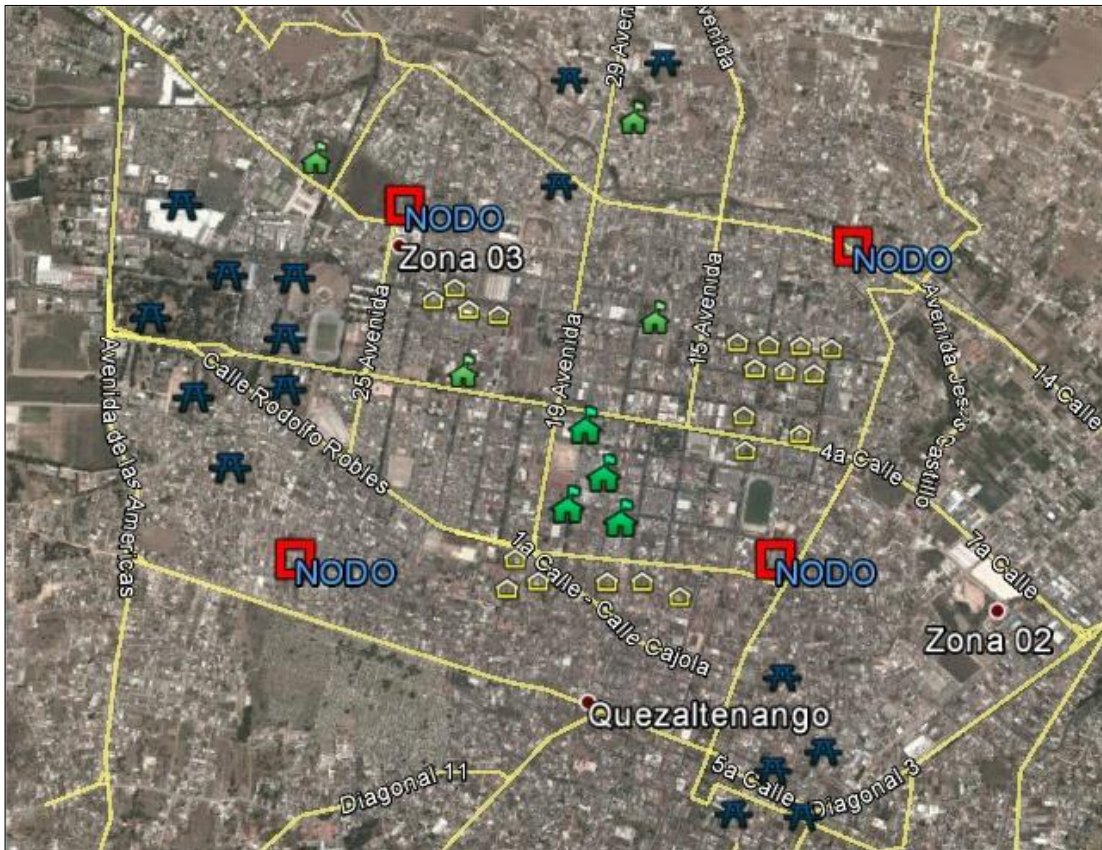
Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

- La siguiente propuesta es identificar los nodos o sitios del proveedor de servicios que puedan servir para la instalación de las OLT, por su holgura en espacio en *rack* o gabinetes, capacidad en energía, ventilación, fácil acceso, cercanía o poseer fibra óptica habilitada hacia sus instalaciones, seguridad, entre otros. Condiciones que son necesarias para dichos equipos y dependen de las características de los equipos de cada *vendor*.

La importancia de analizar estos factores de cada nodo posible, radica en la posibilidad de entregar servicios de alta disponibilidad a los clientes, reduciendo el riesgo de fallas. En el caso del análisis de la red de fibra óptica en dichos nodos, permitirá determinar si de inmediato se puede ejecutar el diseño GPON o es necesaria la habilitación de hilos adicionales de fibra o en el peor de los casos, la construcción de una red de fibra óptica nueva.

En la figura 52 se muestra la ubicación de 4 nodos del proveedor de servicios, asumiendo que cumplen con las características anteriores y que existen o que pueden existir en esas ubicaciones.

Figura 52. Nodos para ubicación de las OLT



Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Se plantea la ubicación anterior de 4 nodos que permitirán la instalación de las OLT, buscando formar una topología anillada y con presencia en la mayor parte de la región central de Quetzaltenango. Al referirse a una topología anillada, se hace uso de los esquemas planteados en la sección 4.2.1 y figura 44.

Se podría utilizar una sola OLT instalada en un nodo estratégico distribuyendo apropiadamente *splitter* de primera etapa con un diseño de ramal. Esto reduciría considerablemente los costos de un proyecto como este, sin

embargo se aplicarán los conceptos de protección GPON, los cuales son útiles en el momento que el proveedor de servicios define como críticos los servicios que transportará sobre la red GPON y estos requieren una alta disponibilidad, disminución de vulnerabilidades y puntos únicos de falla sobre la red.

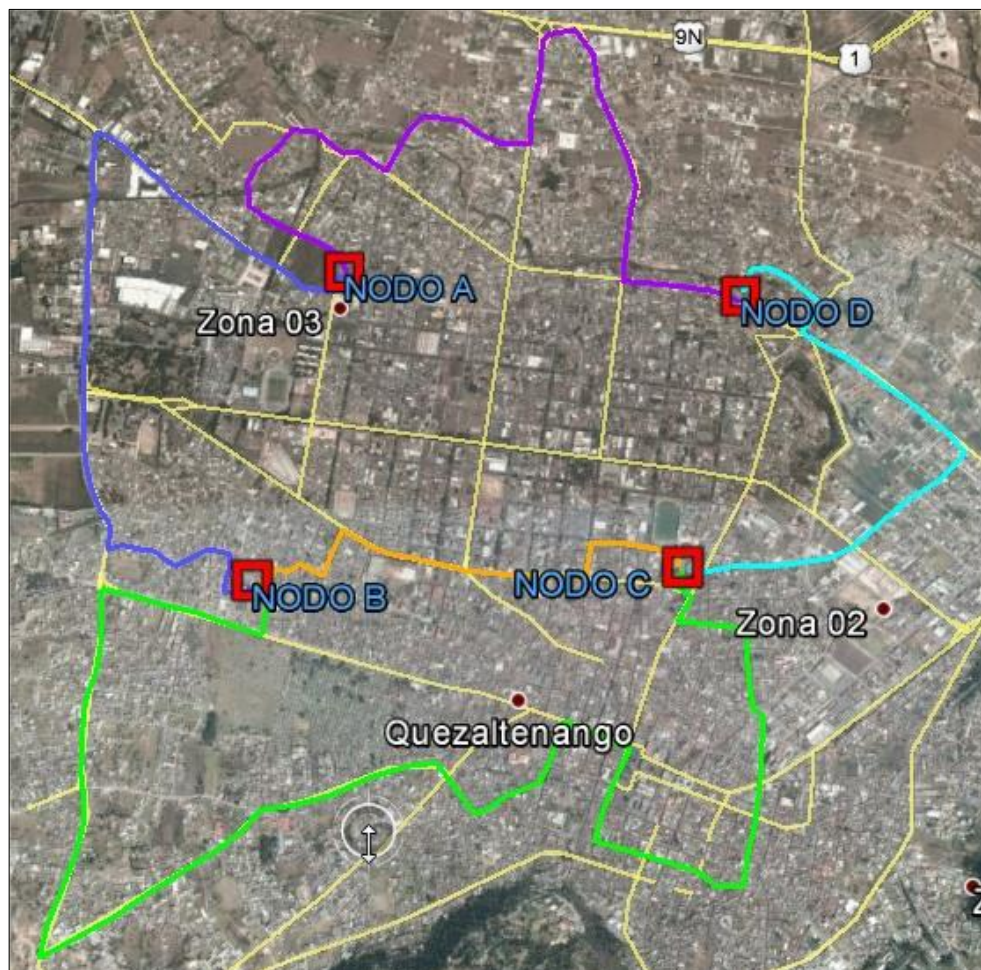
Teniendo ubicados los clientes planteados en este ejemplo de aplicación GPON y las zonas marcadas como zonas de crecimiento potencial, se podrá determinar la siguiente información necesaria para el diseño:

- Puertos GPON necesarios en las OLT.
- *Splitter* necesarios y sus puntos de ubicación.
- Hilos de fibra óptica necesarios, ya sea sobre una red de fibra existente o la construcción de una red nueva, lo cual involucraría:
 - Trabajos de planta externa - Instalación de postes, mufas, fusiones de fibra óptica.
 - Trabajos de planta interna - Instalación de equipos ODF de acceso-salida a la calle y espejos a nivel de nodos, cajas terminales, *Patch Cord* de fibra óptica.
- Cantidad de equipos ONT, dependiendo de los diversos diseños a utilizar como FTTH, FTTB, FTTC, entre otros.
- El presupuesto óptico que se deberá manejar, para garantizar la calidad de los servicios de cada cliente y por consiguiente, las características de los equipos a implementar.

En la figura 53 se muestra la posible ruta de fibra óptica que interconectará las OLT, siendo esta una red existente o una nueva red. Se divide la misma en 4 tendidos distintos:

- Ruta de fibra del nodo A al nodo B (color azul)
- Ruta de fibra del nodo B al nodo C (color verde)
- Ruta de fibra del nodo C al nodo D (color celeste)
- Ruta de fibra del nodo D al nodo A (color morado)
- Ruta de fibra del nodo B al nodo C (color naranja)

Figura 53. Ruta de fibra de interconexión de nodos

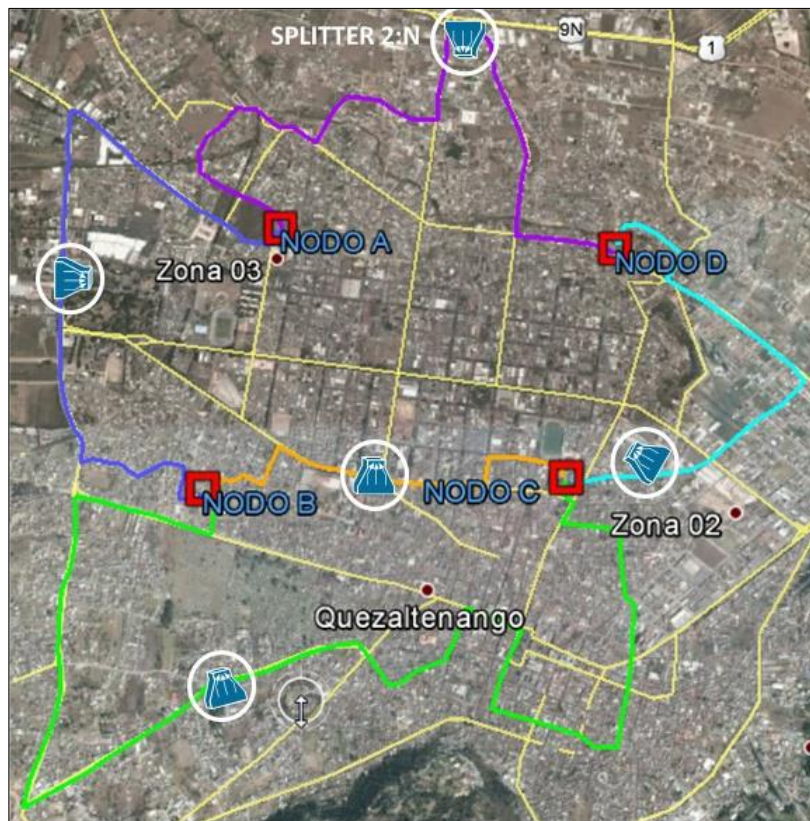


Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Con el tendido de fibra óptica anillado se puede utilizar el esquema de *splitter* de primer etapa 2:N, llevando un hilo de fibra desde cada nodo, hacia cada *splitter* y de allí tener N salidas que servirán para interconectar los *splitter* de segunda etapa si el diseño así lo considera.

En la figura 54 se muestra la posible ubicación de los *splitter* de primera etapa, sin realizar un cálculo exacto de presupuesto óptico para la ubicación de los mismos, únicamente para mostrar cómo se instalarían estos *splitter*, con la conexión de un hilo de fibra óptica proveniente de cada OLT a sus extremos.

Figura 54. **Ubicación de *splitter* de primera etapa 2:N**

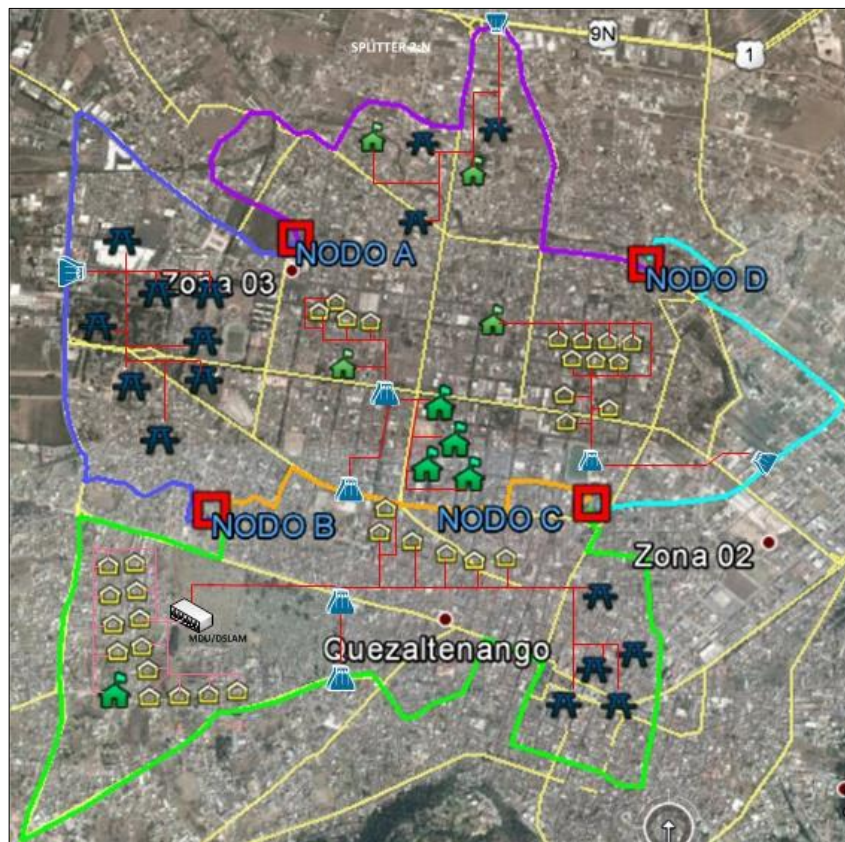


Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Teniendo la ubicación de los *splitter* de primera etapa, se puede proceder a realizar la ubicación de los *splitter* de segunda etapa, en el caso de considerarlos necesarios dentro del diseño GPON o de igual forma mostrar los casos en los que de un *splitter* de primera etapa se realice la entrega de la fibra a los equipos ONT / ONU / MDU de cliente final.

En la figura 55, se muestra la ubicación de varios *splitter* de segunda etapa 1:N y las conexiones respectivas hacia los *splitter* de primera etapa y los usuarios finales.

Figura 55. **Ubicación de *splitter* de segunda etapa**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Para el diseño de la red GPON, específicamente del ejemplo anterior se deben tener en cuenta los siguientes parámetros de diseño, mencionados recientemente, sin los cuales los servicios a entregar no serán los adecuados:

- Cantidad de puertos GPON por OLT: en el diseño planteado en este ejemplo se necesitan los siguientes puertos GPON.
 - 2 puertos en la OLT del nodo A, uno hacia cada dirección del anillo de OLT.
 - 3 puertos en la OLT del nodo B, uno hacia cada dirección del anillo de OLT y otro más que comunica con el nodo C.
 - 3 puertos en la OLT del nodo C, uno hacia cada dirección del anillo de OLT y otro más que comunica con el nodo B.
 - 2 puertos en la OLT del nodo D, uno hacia cada dirección del anillo de OLT.

- *Splitter* necesarios y su punto de ubicación: se pueden ubicar de acuerdo a sus características de entradas y salidas con los siguientes parámetros de diseño:
 - Tener en cuenta el rango de atenuación de la red GPON, el cual depende de la electrónica utilizada (SFP en el puerto GPON), lo cual da lugar a la siguiente clasificación:

Tabla IV. **Atenuación máxima por tipo de red GPON**

RED GPON	RANGO DE ATENUACION
A	20 dB
B	25 dB
C	30 dB
B+	28 dB
C+	32 dB

Fuente: elaboración propia.

Los valores en dB, se pueden ver como el valor máximo de atenuaciones que se pueden tener por puerto GPON, para garantizar que la señal óptica llegue con niveles satisfactorios al usuario final. Entre estas atenuaciones se pueden encontrar:

- Atenuación por *splitter*.

Tabla V. **Atenuación por tipo de *splitter***

Tipo Splitter	Atenuación (dB)
1:2	-3,01
1:4	-6,02
1:8	-9,03
1:16	-12,04
1:32	-15,05
1:64	-18,06
1:128	-21,07

Fuente: elaboración propia.

- Atenuación por kilómetro de fibra óptica y su ventana de uso, conectores de fibra y fusiones realizadas en el trayecto OLT-ONT:

Tabla VI. **Atenuación por elementos de fibra óptica**

Elemento	Atenuación (dB)
Fibra óptica 1310 nm	-0,4
Fibra óptica 1550 nm	-0,3
Fusión de fibra óptica	-0,2
Conectores de fibra óptica	-0,5

Fuente: elaboración propia.

Basándose en la información anterior y tomando como referencia el diseño GPON entre los nodos C y D de este ejemplo, como se muestra en la figura 56, los valores se pueden utilizar de la siguiente forma:

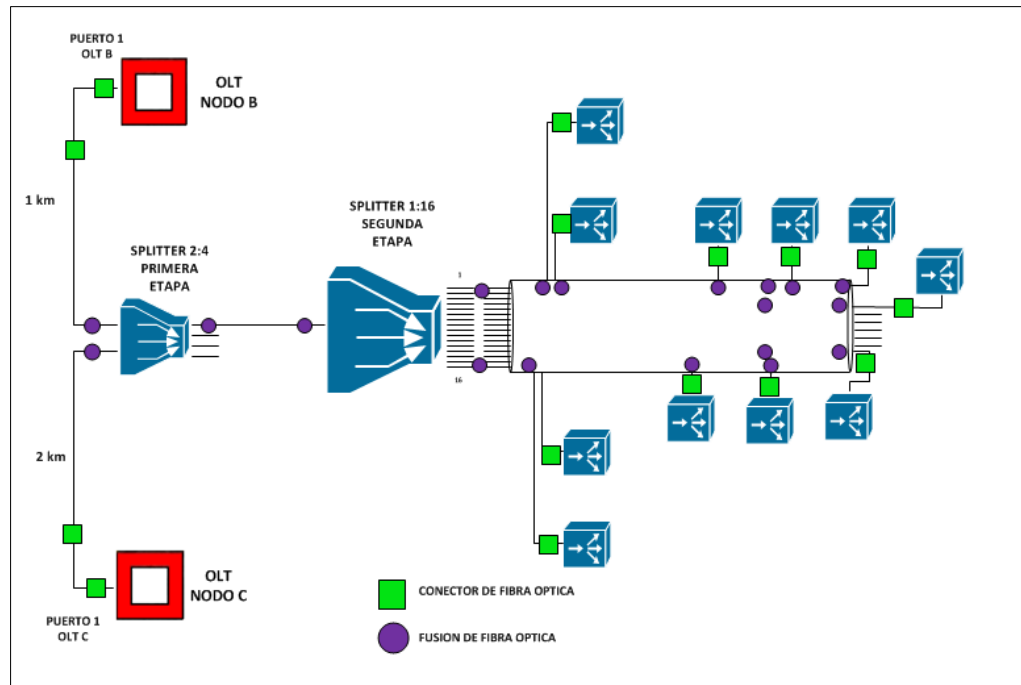
Figura 56. **Distribución GPON entre nodo C y D**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

Se puede ver la figura 56 con un mayor detalle de los parámetros mencionados anteriormente, como longitud de fibra óptica, *splitter* ópticos, conectores de fibra y fusiones de fibra, de acuerdo a la figura 57, en donde están indicados los puntos en donde se encontrará un conector, una fusión, entre otros.

Figura 57. **Detalle de atenuaciones en esquema GPON**



Fuente: elaboración propia, con programa Google Earth 2013.

El esquema anterior puede ayudar a determinar las atenuaciones que se encontrarán en el diseño de red GPON y a saber si con todas esas atenuaciones el diseño puede estar dentro del presupuesto óptico con el que se puede contar.

Para el segmento de la red de ejemplo de nodo B a nodo C, se observa que se han tomado en cuenta las atenuaciones de los *splitter* de primera etapa 2:4 y de segunda etapa 1:16, la atenuación por distancia de fibra óptica y las atenuaciones producidas por los conectores y fusiones de fibra. Se ve en la tabla VII, con todos los valores mencionados anteriormente, multiplicados por su atenuación individual, que para este caso, la atenuación total es de -21,76 dB, lo cual deja dentro de los -28 dB que una red GPON B+ puede manejar para cada uno de los clientes en esa región.

Tabla VII. **Cálculo de la atenuación total de un segmento GPON**

	Atenuación por Splitter			Otros Factores de Atenuación			Total
	Splitter 1	Splitter 2	Atenuación total por <i>splitter</i>	Fibra Distancia(km)	Conector	Fusiones	
Número de <i>splitter</i> por ramal	1	1					-21,76
Relación de <i>splitter</i> 1:N	4	16		4	3	5	
Atenuación (dB)	-6,02	-12,04	-18,06	-1,2	-1,5	-1	

Fuente: elaboración propia.

A partir de un cálculo como el anterior, se puede determinar entonces el presupuesto óptico que se tiene en la red GPON, para asegurar la calidad de los servicios que se transportan entre OLT y ONT.

En resumen, teniendo en cuenta la distribución de clientes con características para incluir en una red GPON, las zonas geográficas con potencial de ubicar a clientes de este tipo, la ubicación de nodos del proveedor de servicios que cuenten con las condiciones de espacio, energía, temperatura,

entre otros. Permitirán determinar los requerimientos de la red de fibra óptica existente o nueva que tenga la capacidad de conectar la red GPON, la ubicación de *splitter* de diversas etapas de acuerdo al diseño de red y los posibles esquemas de protección a utilizar, manejando el presupuesto óptico disponible en la red GPON y finalmente la conexión de los equipos ONT/ONU/MDU dependiendo de los requerimientos de los clientes FTTH, FTTB, FTTC, FTTN, entre otros.

CONCLUSIONES

1. Las redes GPON, son redes de acceso pertenecientes a las redes PON, y utilizan esquemas punto a multipunto para la entrega de servicios a usuarios finales sobre las redes de fibra óptica como transporte.
2. Con las redes GPON se logra la entrega de servicios de alta velocidad de hasta 2,4 Gbps y distancias de 20 km desde el nodo del proveedor de servicios, lo cual permite a los usuarios finales acceso a aplicaciones y servicios que demandan grandes velocidades y anchos de banda, tales como IPTV, enlaces de internet y datos de alta velocidad, voz sobre IP y video, entre otros.
3. GPON utiliza las tecnologías TDM y TDMA para transportar los datos en bajada y subida respectivamente, así como WDM, para transportar estos dos tipos de tráfico sobre un mismo hilo de fibra, con una longitud de onda distinta para cada sentido del tráfico.
4. GPON puede utilizar distintos esquemas de protección, de acuerdo a la importancia determinada para los servicios que se transporten a través de estas redes, variando desde una configuración simple, hasta esquemas anillados y con redundancia de puertos y equipos OLT.

5. Para el diseño de una red GPON, se puede solicitar a distintos *vendor* de tecnologías y servicios, que presenten un diseño de red, de acuerdo a los requerimientos enviados, las condiciones de infraestructura, energía, distribución de clientes, entre otros. Que el proveedor de servicios desee cubrir.

6. Para el diseño de una red GPON, deben estar contempladas la distribución de clientes a cubrir, las zonas potenciales de crecimiento, los nodos o ubicaciones de OLT y *splitter*, la capacidad de la red de fibra existente o que debe construirse, el presupuesto óptico que se tiene para cubrir a cada cliente y los esquemas de protección a utilizar.

RECOMENDACIONES

1. Profundizar en la investigación de las redes PON y sus variantes, sobre todo en las que en otros países hoy en día están en despliegues iniciales, tales como 10G-PON.
2. Investigar el despliegue actual de las redes GPON en Guatemala, para tener un panorama más preciso de las aplicaciones que se pueden conseguir con su despliegue.
3. Motivar a la Universidad de San Carlos, al montaje de laboratorios que permitan experimentar con escenarios de las redes de telecomunicaciones tales como GPON, para tener un mejor conocimiento de las mismas para los estudiantes que se encaminen al mercado laboral de esa área.
4. Actualizar el pensum de Ingeniería Electrónica de la Universidad de San Carlos, para que se pueda tener mayor acercamiento a estas tecnologías, tanto por la investigación del estudiante como por el contenido que los cursos contemplan en la carrera.

BIBLIOGRAFÍA

1. ESPAÑA BOQUERA, María Carmen. *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Madrid: Diaz de Santos, 2005. 408 p.
2. GORALSKI, Walter. *Tecnologías ADSL y xDSL*. Madrid: Osborne/McGraw-Hill, 2000. 362 p.
3. Internacional Telecommunication Union. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON)*. ITU-T G984.1. Suiza: ITU, 2008. 43 p.
4. _____. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la capa dependiente de los medios físicos*. ITU-T G984.2. Suiza: ITU, 2008. 40 p.
5. _____. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la capa de convergencia de transmisión*. ITU-T G984.3. Suiza: ITU, 2008. 170 p.
6. _____. *Redes ópticas pasivas de capacidad Gigabit (GPON): especificación de la interfaz de control y gestión de la OLT*. ITU-T G984.4. Suiza: ITU, 2008. 430 p.
7. _____. *Sistemas de acceso óptico de banda ancha basados en redes ópticas pasivas*. ITU-T G983.1. Suiza: ITU, 2005. 134 p.

8. TOMASI, Wayne. *Comunicaciones de fibra óptica: sistemas de comunicaciones electrónicas*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2003. 948 p. ISBN: 970-26-0316-1.