

**IMPACTO DE LA TOPOLOGÍA DE RED FTTH-GEPON EN EL DESEMPEÑO DE
SERVICIOS TRIPLE PLAY**



**Juan Darío Delgado Lasso
Joseph Camilo Marcillo Bravo**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT- Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Popayán, Diciembre 2016**

IMPACTO DE LA TOPOLOGÍA DE RED FTTH-GEPON EN EL DESEMPEÑO DE SERVICIOS TRIPLE PLAY



Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Juan Darío Delgado Lasso
Joseph Camilo Marcillo Bravo

Director: PhD. Ing. José Giovanni López Perafán

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
GNTT- Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Popayán, Diciembre 2016

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REDES DE ACCESO	3
1.1. DEFINICIÓN DE RED DE ACCESO	3
1.2. TECNOLOGÍAS DE RED DE ACCESO CABLEADAS.....	4
1.2.1. Cable Módem.....	4
1.2.2. Redes Híbridas de Fibra y Coaxial.....	5
1.2.3. Línea de Abonado Digital	6
1.2.3.1. Línea de Abonado Digital Asimétrica	8
1.2.3.2. Línea de Abonado Digital Asimétrica 2	8
1.2.3.3. Línea de Abonado Digital Asimétrica 2 <i>Plus</i>	9
1.2.3.4. Línea de Abonado Digital Simétrica	9
1.2.3.5. Línea de Abonado Digital sobre la Red Digital de Servicios Integrados.....	9
1.2.3.6. Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad	9
1.2.3.7. Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad en un Solo Par	9
1.2.3.8. Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad.....	9
1.2.3.9. Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad 2.....	10
1.2.4. Redes de Acceso de Fibra Óptica hasta la X	10
1.2.4.1. Fibra Hasta el Vecindario	11
1.2.4.2. Fibra Hasta el Edificio	11
1.2.4.3. Fibra Hasta la Acera	12
1.2.4.4. Fibra Hasta el Hogar	12
CAPÍTULO 2. REDES ÓPTICAS PASIVAS GIGABIT ETHERNET Y SERVICIOS TRIPLE PLAY	13
2.1. REDES ÓPTICAS PASIVAS	13
2.1.1. Tecnologías de Redes Ópticas Pasivas	14
2.1.1.1. Redes Ópticas Pasivas con Modo de Transferencia Asíncrono	14
2.1.1.2. Redes Ópticas Pasivas Banda Ancha	14
2.1.1.3. Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit	15
2.1.1.4. Redes Ópticas Pasivas Basadas en Ethernet	16
2.2. REDES ÓPTICAS PASIVAS GIGABIT ETHERNET	16
2.2.1. Arquitectura de una Red GEPON.....	17
2.2.2. Arquitectura de Niveles de GEPON	20

2.2.2.1.	Nivel Físico	21
2.2.2.2.	Nivel de Enlace de Datos	23
2.2.3.	Funcionamiento de una Red GEPON	24
2.2.3.1.	Transmisión de tráfico en <i>Downstream</i>	24
2.2.3.2.	Transmisión de tráfico en <i>Upstream</i>	24
2.2.3.3.	Protocolo de Control Punto a Multipunto	25
2.2.4.	Mecanismos de asignación de ancho de banda	26
2.2.5.	Formato de Trama de GEPON	27
2.2.5.1.	Trama para tráfico <i>Downstream</i>	28
2.2.5.2.	Trama para tráfico <i>Upstream</i>	28
2.3.	SERVICIOS SOPORTADOS POR UNA RED FTTH-GEPON	29
2.3.1.	Convergencia Tecnológica	29
2.3.1.1.	Servicios Convergentes	30
2.3.2.	Triple Play sobre FTTH – GEPON	31
2.3.2.1.	Servicios de Datos	31
2.3.2.2.	Servicio de VoIP	31
2.3.2.3.	Servicio de Televisión	33
CAPÍTULO 3. TOPOLOGÍAS Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN GEPON		43
3.1.	TOPOLOGÍA FÍSICA DE UNA RED	43
3.1.1.	Características de la Topología Física de una Red FTTH-GEPON	43
3.1.2.	Topologías Físicas en GEPON	44
3.1.2.1.	Topología de Red en Árbol	45
3.1.2.2.	Topología de Red en Bus	45
3.1.2.3.	Topología de Red en Anillo	46
3.2.	PARÁMETROS DE DESEMPEÑO PARA SERVICIOS TRIPLE-PLAY EN REDES FTTH-GEPON	48
3.2.1.	Parámetros de desempeño óptico	48
3.2.1.1.	Diagrama del ojo	48
3.2.1.2.	Factor de Calidad	50
3.2.1.3.	Tasa de Error de Bit	50
3.2.1.4.	Jitter	51
3.2.2.	Distorsiones de intermodulación	52
3.2.2.1.	Composición de Segundo Orden	54
3.2.2.2.	Composición de Triple Batido	55
3.2.2.3.	Relación Portadora a Ruido	56

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
4.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN OPTSIM®.....	58
4.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	63
4.2.1. Fase 1: Definición del escenario de simulación.....	63
4.2.2. Fase 2: Definición de las características y parámetros técnicos de simulación..	75
4.2.3. Fase 3: Ejecución de la simulación	77
4.2.4. Fase 4: Evaluación y Análisis de los resultados de la simulación	87
4.2.4.1. Caso de Estudio No. 1. Servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Digital	88
4.2.4.1.1. Caso de Estudio No. 1a. Distancias iguales entre el OLT y cada ONT.....	88
4.2.4.1.2. Caso de Estudio No. 1b. Distancia diferente entre el OLT y cada ONT..	100
4.2.4.2. Caso de Estudio No. 2. Servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y . CATV Analógico.....	113
4.2.4.2.1. Caso de Estudio 2a. Distancias iguales entre el OLT y cada ONT.	113
4.2.4.2.2. Caso de Estudio 2b. Distancia diferente entre el OLT y cada ONT	122
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	141
5.1. CONCLUSIONES	141
5.1.1. Respecto a los resultados de simulación y la topología de red	141
5.1.2. Respecto al desarrollo del Trabajo de Grado	142
5.1.3. Respecto al mercado de las telecomunicaciones.....	143
5.1.4. Respecto a la herramienta de simulación.....	144
5.2. RECOMENDACIONES	145
5.3. TRABAJOS FUTUROS	146
BIBLIOGRAFÍA	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Red de telecomunicaciones y sus segmentos	3
Figura 1.2. Cable Módem	5
Figura 1.3. Arquitectura básica de una red HFC.....	6
Figura 1.4. Red DSL.....	8
Figura 1.5. Red PON.....	11
Figura 1.6. Escenarios FTTx	12
Figura 2.1. Red PON con escenarios FTTx.....	13
Figura 2.2. Escenarios Ethernet en la Primera milla	16
Figura 2.3. Arquitectura de red GEPON	18
Figura 2.4. Estructura del OLT	19
Figura 2.5. Arquitectura de Niveles de IEEE 802.3 para GEPON.....	21

Figura 2.6. Tráfico en sentido Downstream en GEPON	24
Figura 2.7. Tráfico en sentido Upstream en GEPON	25
Figura 2.8. Formato de trama GEPON	28
Figura 2.9. Trama Downstream en GEPON	28
Figura 2.10. Trama Upstream en GEPON.....	29
Figura 2.11. Diversidad de tecnologías para la prestación de servicios Triple Play.....	30
Figura 2.12. Distribución de espectro óptico para el servicio Triple Play	31
Figura 2.13. Configuraciones de VoIP	32
Figura 2.14. Cabeceras de cada protocolo que transportara los 20 [ms] de audio.	33
Figura 2.15. Tipos de transmisión de televisión en FTTH-GEPON.....	34
Figura 2.16. Red PON con soporte de servicios de televisión	34
Figura 2.17. Señal RF overlay superpuesta con la señal de datos.	35
Figura 2.18. Infraestructura del servicio IPTV.....	40
Figura 2.19. Conexiones en la residencia del usuario	42
Figura 3.1. Topología de red en Árbol	45
Figura 3.2. Topología de red en Bus	46
Figura 3.3. Topología de red en Anillo.....	47
Figura 3.4. Diagrama del ojo de una secuencia de 3 bits	48
Figura 3.5. Propiedades fundamentales del diagrama del ojo	49
Figura 3.6. Características de la forma del pulso.....	49
Figura 3.7. Diagrama del ojo con los fenómenos que afectan la calidad de la señal.....	50
Figura 3.8. Parámetros que intervienen en el cálculo de la BER.....	51
Figura 3.9. Efecto del Jitter en el diagrama del ojo.....	51
Figura 3.10. Locación en el espectro RF de las componentes de distorsión CSO en un canal de CATV.	53
Figura 3.11. Locación en el espectro RF de las componentes de distorsión CTB en un canal de CATV.	54
Figura 3.12. Efecto de la composición de distorsión de segundo orden en la señal de video.....	54
Figura 3.13. Efecto de la composición de distorsión de tercer orden en la señal de video.....	55
Figura 3.14. Espectro RF para la medición de CNR en un canal de CATV	56
Figura 4.1. Diagrama de casos de uso del simulador.	60
Figura 4.2. Entorno del área de trabajo del modo bloque (Nombre del archivo: 10 Gbps Link)	61
Figura 4.3. Entorno del área de trabajo del modo muestra (Nombre del archivo: First)....	61
Figura 4.4. Diagrama del ojo en el receptor del ejemplo 10 Gbps Link del modo bloque. 62	
Figura 4.5. Diagrama del ojo en el receptor del ejemplo First del modo muestra.	63
Figura 4.6. Espacio número uno del escenario de simulación, topología de red en árbol. 64	
Figura 4.7. Espacio número dos del escenario de simulación, topología de red en bus. 64	
Figura 4.8. Espacio número tres del Escenario de simulación, topología de red en anillo 65	
Figura 4.9. Configuración caso de estudio número uno, transmisión de Internet/VoIP y CATV Digital.....	66
Figura 4.10. Configuración caso de estudio número dos, transmisión de Internet/VoIP y CATV analógico	66
Figura 4.11. Definición del escenario general de simulación	67
Figura 4.12. Configuración base de la topología de red en árbol a simular	68
Figura 4.13. Configuración base de la topología de red en bus a simular.	69
Figura 4.14. Configuración base de la topología de red en anillo a simular.....	70
Figura 4.15. Sistema Back-To-Back para servicio Triple Play con CATV Digital	78

Figura 4.16. Diagrama del ojo para el servicio de Internet/VoIP	78
Figura 4.17. Diagrama del ojo para el servicio de CATV Digital con modulación 16-QAM	79
Figura 4.18. Diagrama de constelación para el servicio de CATV Digital con modulación 16QAM	79
Figura 4.19. Configuración para selección de portadoras.....	80
Figura 4.20. Componentes de intermodulación de segundo orden.....	81
Figura 4.21. Componentes de intermodulación de segundo y tercer orden.....	82
Figura 4.22. Sistema Back-To-Back para servicio Triple Play con CATV Digital	82
Figura 4.23. Diagrama del ojo para el servicio de Internet/VoIP	83
Figura 4.24. Portadoras para la transmisión del servicio CATV Analógico.	83
Figura 4.25. Topología de red en Árbol.	84
Figura 4.26. Topología de red en Buse.	85
Figura 4.27. Topología de red en Anillo.....	86
Figura 4.28. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 1	89
Figura 4.29. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 2.....	90
Figura 4.30. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 3.....	91
Figura 4.31. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 4.....	92
Figura 4.32. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 1.....	95
Figura 4.33. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 2.....	96
Figura 4.34. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 3.....	97
Figura 4.35. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 4.....	98
Figura 4.36. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 1.....	101
Figura 4.37. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 2.....	102
Figura 4.38. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 3.....	103
Figura 4.39. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 4.....	104
Figura 4.40. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 1.....	108
Figura 4.41. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 2.....	109
Figura 4.42. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 3.....	110
Figura 4.43. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 4.....	111
Figura 4.44. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 1	114
Figura 4.45. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 2.....	115

Figura 4.46. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 3.....	116
Figura 4.47. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 4.....	117
Figura 4.48. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 1.....	118
Figura 4.49. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 2.....	119
Figura 4.50. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 3.....	120
Figura 4.51. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 4.....	121
Figura 4.52. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 1.....	122
Figura 4.53. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 2.....	123
Figura 4.54. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 3.....	124
Figura 4.55. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 4.....	125
Figura 4.56. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 1.....	126
Figura 4.57. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 2.....	127
Figura 4.58. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 3.....	128
Figura 4.59. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 4.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Esquemas de redundancia en BPON.....	15
Tabla 2.2. Velocidades en GPON.....	15
Tabla 2.3. Características principales de los dos tipos de PMD para GEPON.....	22
Tabla 2.4. Servicios de Datos y Ancho de Banda necesario.....	31
Tabla 2.5. Ancho de banda del canal y de los Códecs.....	33
Tabla 2.6. Tasa de bits MPEG-2 según el esquema de modulación para DVB.....	39
Tabla 2.7. Formatos de compresión y su tasa de bits (Mínima y Máxima).....	40
Tabla 3.1. Características principales de las topologías FTTH-GEPON.....	56
Tabla 3.2. Parámetros para la evaluación del desempeño en redes FTTH GEPON.....	57
Tabla 4.1. Distancia entre OLT y cada ONT para el caso 1a y 2a.....	71
Tabla 4.2. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	71
Tabla 4.3. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters.....	71
Tabla 4.4. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	72
Tabla 4.5. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters (con $i=2,3$ y 4) y fibras localizadas entre Splitter y circulador (con $i = 1$ y 5).....	72
Tabla 4.6. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	72
Tabla 4.7. Distancia entre OLT y cada ONT.....	73

Tabla 4.8. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	73
Tabla 4.9. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters	74
Tabla 4.10. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	74
Tabla 4.11. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters (con $i=2,3$ y 4) y fibras localizadas entre Splitter y circulador (con $i = 1$ y 5).....	74
Tabla 4.12. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT.....	75
Tabla 4.13. Parámetros de transmisión en PMD 1000BASE-PX20-D	75
Tabla 4.14. Parámetros de recepción en PMD 1000BASE-PX20-D.....	76
Tabla 4.15. Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación.	76
Tabla 4.16. Niveles de intermodulación de segundo orden.	80
Tabla 4.17. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No.1a.	94
Tabla 4.18. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1a.	100
Tabla 4.19. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1b	107
Tabla 4.20. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1b.	112
Tabla 4.21. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2a.	117
Tabla 4.22. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2a.	121
Tabla 4.23. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2b.	125
Tabla 4.24. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2b.	129
Tabla 4.25. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1a con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km).....	134
Tabla 4.26. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1b con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km)	136
Tabla 4.27. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2a con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km).....	137
Tabla 4.28. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2b con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km).....	139

LISTA DE ACRÓNIMOS

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica
ADSL2	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line 2</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica 2
ADSL2+	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line Plus</i> , Línea de Abonado Digital Asimétrica 2 Plus
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i> , Estándar de Cifrado Avanzado
AM-VSB	<i>Amplitud Modulation Vestigial Side Band</i> , Modulación de Amplitud con Banda Lateral Vestigial
APON	<i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i> , Redes Ópticas Pasivas con Modo de Transferencia Asíncrono
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> , Modo de Transferencia Asíncrono
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i> , Comité de Sistemas de Televisión Avanzado
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit
BGP	<i>Bandwidth Guaranteed Polling</i> , Sondeo de Ancho de Banda Garantizado
BPON	<i>Broadband Passive Optical Network</i> , Redes Ópticas Pasivas de Banda Ancha
CATV	<i>Cable Television</i> , Televisión por Cable
CM	<i>Cable Modem</i> , Cable Módem
CMTS	<i>Cable Modem Termination System</i> , Sistema de Terminación de Cable Módem
CNR	<i>Carrier to Noise Ratio</i> , Relación Portadora a Ruido
CO	<i>Central Office</i> , Oficina Central
CRC	<i>Cyclic Redundance Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i> , Acceso Múltiple con Escucha de Portadora y Detección de Colisiones
CSO	<i>Composite Second Order</i> , Composición de Segundo Orden
CTB	<i>Composite Triple Beat</i> , Composición de Triple Batido
DBA	<i>Dynamic Bandwidth Assignment</i> , Asignación de Ancho de Banda Dinámico
DMIF	<i>Delivery Multimedia Integration Framework</i> , Marco de Integración de Entrega Multimedia
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i> , Especificación de Interfaz de Servicios de Datos por Cable
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital
DTE	<i>Data Terminal Equipment</i> , Equipo Terminal de Datos
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i> , Difusión de Video Digital
DVB-C	<i>Digital Video Broadcasting by Cable</i> , Difusión de Video Digital por Cable
DVB-MC	<i>Digital Video Broadcasting - Microwave Cable-based</i> , Difusión de Video Digital por Microondas sobre Cable
DVB-MS	<i>Digital Video Broadcasting - Microwave Satellite</i> , Difusión de Video Digital por Microondas Satelitales
DVB-S	<i>Digital Video Broadcasting by Satellite</i> , Difusión de Video Digital por Satélite
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i> , Difusión de Video Digital Terrestre
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada de Erbio

EFM	<i>Ethernet in the First Mile</i> , Ethernet en la Primera Milla
EMS	<i>Element Management System</i> , Elemento de Gestión del Sistema
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i> , Redes Ópticas Pasivas Ethernet
erfc	<i>Complementary Error Function</i> , Función Complementaria de Error
ESNR	<i>Electrical Signal To Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido Eléctrica
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i> , Magnitud de Vector de Error
FCAPS	<i>Fault, Configurations, Accounting, Performance and Security</i> , Fallos, Configuraciones, Contabilidad, Rendimiento y Seguridad
FCS	<i>Frame Check Sequence</i> , Secuencia de Verificación de Trama
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores Hacia Adelante
FSAN	<i>Full Service Access Network</i> , Red de Acceso de Servicio Completo
FTTB	<i>Fiber To The Building</i> , Fibra Hasta el Edificio
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i> , Fibra Hasta la Acera
FTTH	<i>Fiber To The Home</i> , Fibra Hasta el Hogar
FTTN	<i>Fiber To The Neighborhood</i> , Fibra Hasta el Barrio o Vecindario
FTTx	<i>Fiber To The x</i> , Fibra hasta la x
GEM	<i>GPON Encapsulation Method</i> , Método de Encapsulamiento GPON
GEPON	<i>Gigabit Ethernet Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva Gigabit Ethernet
GFP	<i>Generic Framing Procedure</i> , Procedimiento de Entramado Genérico
GMII	<i>Gigabit Media Independent Interface</i> , Interfaz Gigabit Independiente del Medio
GPON	<i>Gigabit Capable Passive Optical Network</i> , Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit
GUI	<i>Graphic User Interface</i> , Interfaz Gráfica de Usuario
HDSL	<i>High Bit Rate Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad
HDTV	<i>High Definition Television</i> , Televisión de Alta Definición
HFC	<i>Hybrid Fiber Coaxial</i> , Híbrido de Fibra y Coaxial
IDSL	<i>Integrated Services Digital Network Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital sobre la Red Digital de Servicios Integrados
IMD	<i>Intermodulation Distorsion</i> , Distorsión por Intermodulación
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
IPACT	<i>Interleaved Polling with Adaptative Cycle Time</i> , Sondeo Intercalado con Ciclo de Tiempo Adaptativo
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i> , Televisión Sobre Protocolo de Internet
IPTVCD	<i>IPTV Consumer Device</i> , Dispositivo IPTV del Consumidor
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i> , Red Digital de Servicios Integrados
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersímbolo
ISO	<i>International Standards Organization</i> , Organización Internacional de Estándares
ISP	<i>Internet Service Provider</i> , Proveedor de Servicios de Internet
LAN	<i>Local Area Network</i> , Red de Área Local
LLC	<i>Logical Link Control</i> , Control de Enlace lógico
LLID	<i>Logical Link ID</i> , Identificador de Enlace Lógico

MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio
MDI	<i>Medium Dependent Interface</i> , Interfaz Dependiente del Medio
MGCP	<i>Media Gateway Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Pasarela de Medios
MPCP	<i>Multi point Control Protocol</i> , Protocolo de Control Punto a Multipunto
MPEG	<i>Moving Pictures Experts Group</i> , Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento
NTSC	<i>National Television Standards Committee</i> , Comité Nacional de Sistema de Televisión
OAM	<i>Operation Administration and Maintenance</i> , Operación, Administración y Mantenimiento
ODN	<i>Optical Distribution Network</i> , Red de Distribución Óptica
OFCOM	<i>Office of Communication</i> , Oficina de Comunicaciones
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminal de Línea Óptico
ONT	<i>Optical Network Terminal</i> , Terminal de Red Óptico
ONU	<i>Optical Network Unit</i> , Unidad de Red Óptica
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos
PAL	<i>Phase Alternating Line</i> , Línea de Fase Alternada
PCS	<i>Physical Coding Sublayer</i> , Subnivel de Codificación Física
PLOAM	<i>Physical Layer-Operation and Maintenance</i> , Operaciones y Mantenimiento - Capa Física
PMA	<i>Physical Medium Attachment</i> , Subnivel de Unión con el Medio Físico
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i> , Subnivel Dependiente del Medio Físico
P-OLT	<i>Packet OLT</i> , OLT de Paquetes
PON	<i>Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva
PPV	<i>Pay Per View</i> , Pago por Ver
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i> , Red Pública Telefónica Conmutada
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia
RS	<i>Reconciliation Sublayer</i> , Subnivel de Reconciliación
RTT	<i>Round Trip Time</i> , Tiempo de Ida y Vuelta
SBA	<i>Static Bandwidth Assignment</i> , Asignación Estática de Ancho De Banda
SCM	<i>Subcarrier Multiplexing</i> , Multiplexado de Subportadora
SDSL	<i>Symmetric Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital Simétrica
SDTV	<i>Standard Definition Television</i> , Televisión de Definición Estándar
SECAM	<i>Séquential Couleur á Mémoire</i> , Color Secuencial con Memoria
SHDSL	<i>Single Pair High Speed Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad en un Solo Par
SLD	<i>Start LLID Delimiter</i> , Delimitador de Inicio de LLID
SMF	<i>Single Mode Fiber</i> , Fibra Monomodo
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i> , Protocolo Simple de Gestión de Red
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido
SPD	<i>Start Preamble Delimiter</i> , Delimitador de Inicio del Preámbulo
SPT	<i>Spectral Propagation Technique</i> , Técnica de Propagación Espectral

TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo
TS	<i>Time slot</i> , Intervalo de Tiempo
VBS	<i>Variable Bandwidth Simulation</i> , Simulación de Ancho de Banda Variable
VDSL	<i>Very High Bit Rate Digital Subscriber Line</i> , Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad
VDSL2	<i>Very High Bit Rate Digital Subscriber Line 2</i> , Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad 2
VoD	<i>Video on Demand</i> , Video bajo demanda
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i> , Voz sobre Protocolo de Internet
V-OLT	<i>Video OLT</i> , OLT de Video
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexer</i> , Multiplexor por División de Longitud de onda

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el crecimiento significativo del tráfico de Internet ha acentuado la presencia de dificultades en cuanto a la capacidad, principalmente, en las redes de acceso cableadas. Las soluciones de acceso banda ancha cableadas son las basadas en Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*), Cable Módem (CM, *Cable Modem*), Híbrido de Fibra y Coaxial (HFC, *Hybrid Fiber Coaxial*) y Fibra Óptica. Con los servicios emergentes tales como Voz (VoIP, *Voice over Internet Protocol*), Datos (Internet) y Televisión, se presenta una creciente necesidad de mayor ancho de banda en la sección de la red denominada primera milla o primer kilómetro (esta sección constituye la conexión desde la oficina central del proveedor de servicios hasta la empresa o residencia del suscriptor), por lo que las redes actuales no satisfacen los requerimientos de capacidad de tales servicios, además de tener una cobertura alrededor de 5.5 Km (en el caso de las redes DSL). Por esta razón se tornan atractivas las tecnologías de acceso mediante fibra óptica hasta el hogar o domicilio del cliente (FTTH, *Fiber To The Home*). Las redes FTTH tienen la capacidad de entregar servicios banda ancha integrados, tales como Voz, Datos y Televisión (servicios Triple Play) con una cobertura de aproximadamente 20 Km entre el proveedor de servicios y la residencia de los suscriptores, característica establecida por los estándares que definen este tipo de redes [1] [2] [3] [4].

Para realizar el despliegue y el soporte del sistema FTTH y con el fin de proporcionar tasas de transmisión a altas velocidades, servicios integrados, alta eficiencia, entre otras ventajas, los operadores han optado por emplear las redes ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Network*), que carecen de elementos activos¹ entre el tramo comprendido desde el proveedor de servicios hasta el domicilio del usuario final, en su lugar utilizan componentes pasivos², tales como la propia fibra óptica, empalmes y divisores ópticos o *splitters*. La presencia de solo elementos pasivos permite que la red sea más tolerante a fallos y disminuye los costos de operación y mantenimiento de su infraestructura. Entre las tecnologías que se han desarrollado en torno a las redes PON las más llamativas son las redes ópticas pasivas Gigabit Ethernet (GEPON, *Gigabit Ethernet Passive Optical Network*) que ofrecen velocidades de 1.25 Gbps, tanto en sentido *Upstream*³ como en sentido *Downstream*⁴. La estructura de redes GEPON permite que el operador pueda proporcionar servicios con fibra óptica directamente al hogar del suscriptor, además, al estar soportada sobre Ethernet y ser mundialmente aceptado, se ha convertido en la solución ideal para los proveedores de servicios que pretendan emigrar al modelo Triple Play, con la capacidad de transportar Voz, Datos y Televisión (Digital o Analógica) a costos que hacen factible su implementación y comercialización [5] [6] [7].

¹ Según [8] se entiende por componentes activos aquellos que generan o detectan la señal óptica, amplificándola o realizando alguna conversión en ella, necesitando una fuente de alimentación eléctrica externa para su funcionamiento. Algunos ejemplos: fuentes láser, amplificadores ópticos y conversores de longitud de onda.

² Según [8] se entiende por componente de carácter pasivo aquellos que no generan, detectan o amplifican la señal óptica.

³ En este documento, se utiliza el término *Upstream* para hacer referencia al flujo de información en sentido ascendente entre el usuario final y la cabecera de red.

⁴ En este documento, se utiliza el término *Downstream* para hacer referencia al flujo de información en sentido descendente entre la cabecera de red y el usuario final.

Por otra parte, para desplegar este tipo de redes existen alternativas en cuanto a su topología, teniendo la posibilidad de ser implementadas en árbol, anillo y bus [3] [9].

Con base en lo anterior, este trabajo de grado está enfocado en evaluar y analizar el desempeño de servicios Triple Play⁵ en las topologías anteriormente mencionadas para una red FTTH-GEPON, con el fin de determinar el impacto que la topología de red puede tener en los parámetros de desempeño de dichos servicios.

De esta manera, en cada uno de los capítulos que se describen a continuación se expone el desarrollo de las actividades que permitieron dar cumplimiento a los objetivos planteados en el anteproyecto:

En el primer capítulo se realiza una visión general relacionada con las tecnologías de acceso desarrolladas hasta el momento, con el fin de sentar una base conceptual sobre los antecedentes que precedieron al desarrollo de las redes de acceso FTTH.

En el segundo capítulo se exponen los aspectos más importantes sobre las redes ópticas pasivas, enfatizando en redes FTTH-GEPON, y además se hace un estudio de los servicios que este tipo de redes proporciona de manera integrada, como son los servicios Triple Play.

En el tercer capítulo se exponen las características más importantes de la topología física de una red FTTH-GEPON, describiendo cada una de las topologías estudiadas en el presente trabajo de grado. Por otra parte, se hace un estudio de los parámetros que se deben considerar en este tipo de redes para evaluar el desempeño de los servicios Triple Play proporcionados.

En el cuarto capítulo se presenta el procedimiento para la evaluación y análisis del desempeño, a nivel de simulación, de los servicios Triple Play en una red FTTH-GEPON con cada una de las topologías descritas en el tercer capítulo; exponiendo la herramienta de simulación utilizada y las fases de la metodología de simulación adoptada.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones, las recomendaciones y los posibles trabajos futuros derivados de este trabajo de grado.

⁵ Cabe resaltar que se realiza un análisis a nivel de señal, es decir, de señales que representan cada servicio.

CAPÍTULO 1. REDES DE ACCESO

En el presente capítulo se expone una base conceptual sobre la red de acceso y se exhibe una visión general sobre las tecnologías de red de acceso fijas o cableadas existentes, con el fin de dar a conocer las tecnologías precedentes a las redes de acceso de fibra óptica.

1.1. DEFINICIÓN DE RED DE ACCESO

La red de acceso es el segmento de la red que conecta los usuarios finales a las centrales de los proveedores de servicios u Oficina Central (CO, *Central Office*), cuyo objetivo es permitir al usuario acceder a los servicios de telecomunicaciones mediante diferentes tecnologías que se clasifican según el medio físico que utilizan. En la actualidad, también se utiliza el término “primer kilómetro” o “bucle de abonado” para referirse a esta conexión [10] [11].

En la figura 1.1 se observan los segmentos de una red de telecomunicaciones, donde se distinguen la red de acceso, la red de transporte y la red core:

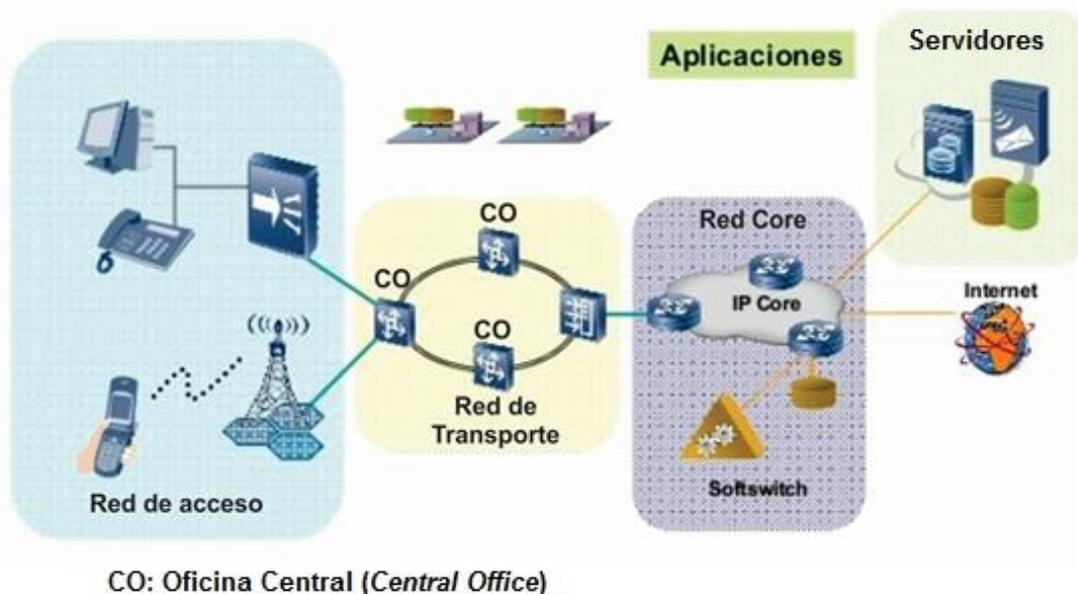


Figura 1.1. Red de telecomunicaciones y sus segmentos. Modificado de [12].

Para llevar a cabo la conexión entre el proveedor de servicios y los abonados, existen dos tipos de redes de acceso [13]:

- Redes de acceso inalámbricas, que emplean como medio de transmisión el aire, mediante el cual se propagan las ondas electromagnéticas.
- Redes de acceso fijas o cableadas, que emplean medios físicos de transmisión como cable de cobre, par trenzado, cable coaxial o fibra óptica.

Como se mencionó al principio de este capítulo, solamente se realiza una visión general a las tecnologías de red de acceso fijas, ya que este trabajo de grado hace énfasis en una tecnología de acceso de este tipo.

1.2. TECNOLOGÍAS DE RED DE ACCESO CABLEADAS

1.2.1. Cable Módem

El nombre que recibe esta tecnología de acceso se basa en la contracción entre Red de Televisión por Cable (CATV, *Cable Television*) y la palabra Módem (Modulador-Demodulador) y se refiere a un módem que opera sobre las redes de televisión por cable convencionales. Esencialmente, solo se necesita conectar el Cable Módem (CM, *Cable Modem*) a la toma de CATV, y que el operador de cable conecte un Sistema de Terminación de Cable Módem (CMTS, *Cable Modem Termination System*) en su extremo o cabecera. Es preciso recalcar que un Cable Módem funciona más como una interfaz de Red de Área Local (LAN, *Local Area Network*) que como un módem. El sistema Cable Módem está constituido por dispositivos que ofrecen velocidades desde 3 Mbps hasta 50 Mbps (dependiendo del dispositivo módem, la red cableada y la carga de tráfico), y se alcanza una distancia de aproximadamente 100 Km. Los suscriptores pueden acceder al servicio de Internet que ofrece el sistema Cable Módem sin necesidad de marcar el número asignado por el Proveedor de Servicios de Internet (ISP, *Internet Service Provider*), sino simplemente encendiendo su equipo de cómputo, además, el abonado puede disfrutar del servicio de Televisión por Cable de manera simultánea al servicio de Internet [14] [15].

Es preciso mencionar que la primera generación de cable módem no se basaba en ningún estándar, por lo cual los Cable Módems de diferentes fabricantes no tenían compatibilidad con un mismo CMTS. Posteriormente, las nuevas generaciones de Cable Módem ya son sistemas basados en estándares, como por ejemplo el estándar internacional de Especificación de Interfaz de Servicios de Datos por Cable (DOCSIS, *Data Over Cable Service Interface Specification*), que define los requerimientos de la interfaz de soporte de comunicaciones y operaciones para los sistemas de datos por cable [16].

La figura 1.2 (a) representa un sistema cable módem donde se distingue la CMTS en la cabecera del operador y el cable módem propiamente dicho. La figura 1.2 (b) muestra algunas características de transmisión de la CMTS y el Cable Módem.

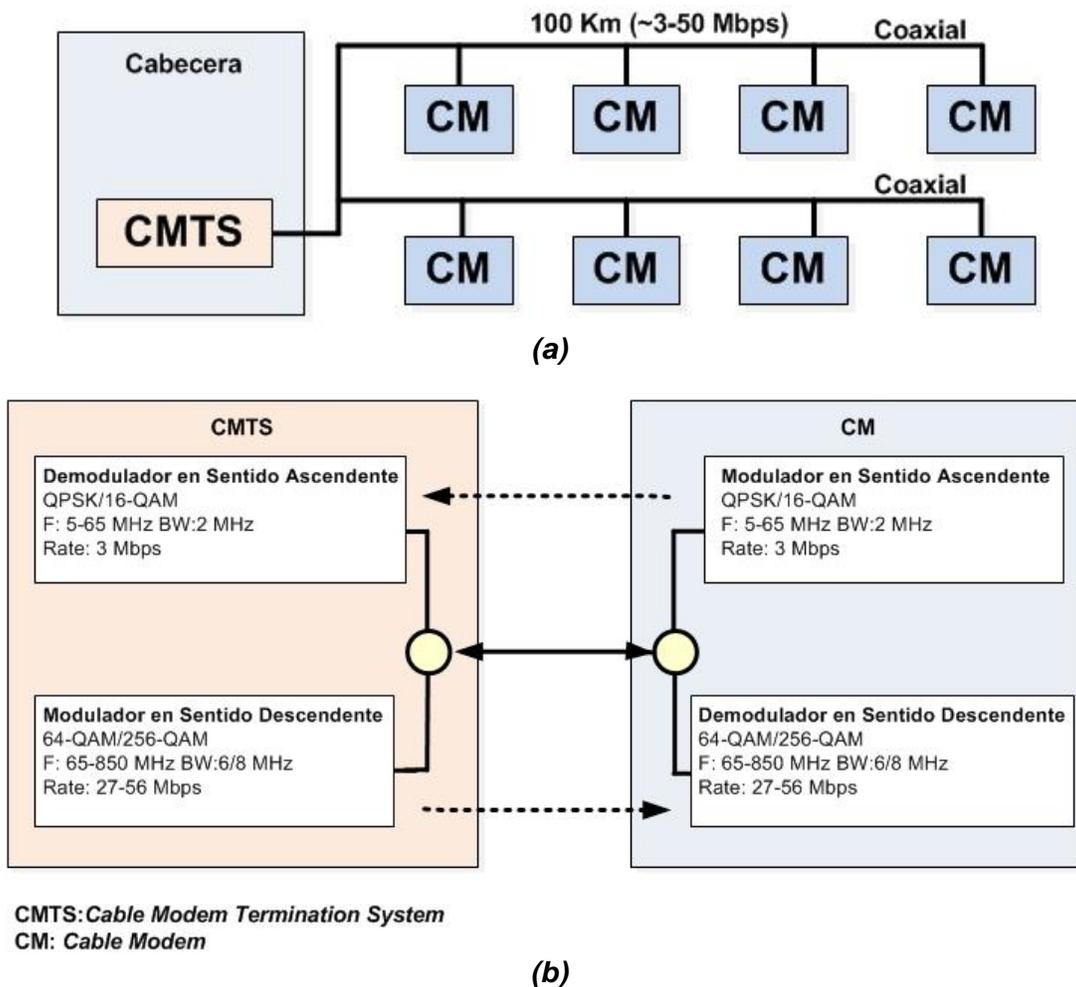


Figura 1.2. Cable Módem: (a) Elementos del sistema, (b) Características de transmisión. Modificado de [16].

1.2.2. Redes Híbridas de Fibra y Coaxial

La red híbrida de fibra y coaxial (HFC, *Hybrid Fibre Coaxial*) es una tecnología de acceso cuyo medio de transmisión está compuesto por cable coaxial y fibra óptica, permitiendo la circulación de servicios de televisión, Internet y telefonía, además de nuevos servicios como Pago por Ver (PPV, *Pay Per View*), Video bajo demanda (VoD, *Video on Demand*), entre otros. Las redes HFC son una evolución de las redes CATV, facilitando la utilización de la red, no solo en sentido *Downstream* sino también para el tráfico *Upstream*, lo que permite el monitoreo de servicios y el retorno de datos provenientes de los clientes. En cuanto a las velocidades de transmisión, para el sentido *Upstream* y *Downstream* se alcanzan tasas, generalmente, de 10 y 40-100 Mbps, respectivamente. Por otra parte, la distancia alcanzada por esta tecnología está en el orden de 100 Km [17] [18].

La estandarización de las redes HFC se ha hecho mediante el estándar internacional DOCSIS, permitiendo adicionar la transferencia de datos de alta velocidad a un sistema CATV sobre una infraestructura HFC. Actualmente, DOCSIS es el principal estándar utilizado por los Cable Módem [19].

Los usuarios se conectan a la red HFC a través del Punto de Terminación de Red (PTR) instalado en su residencia, que constituye la interfaz entre la infraestructura del operador y la red del usuario. Al igual que en la tecnología Cable Módem, para acceder al servicio de Internet que ofrece la red HFC, se dispone de un dispositivo módem en la vivienda del suscriptor conectado a la CMTS del proveedor de servicios [18].

Esencialmente, la configuración de la red HFC es la siguiente: a la residencia del suscriptor llegan dos cables, uno para teléfono y uno para LAN/TV. Para separar la señal LAN/TV, se necesita un divisor o *splitter* (que puede estar dentro del PTR o conectado a él) que permite llevar la señal de TV a un decodificador o *Set-Top Box*⁶ (STB) y de LAN al Cable Módem [20]

En la figura 1.3, se puede observar un esquema básico de una red HFC.

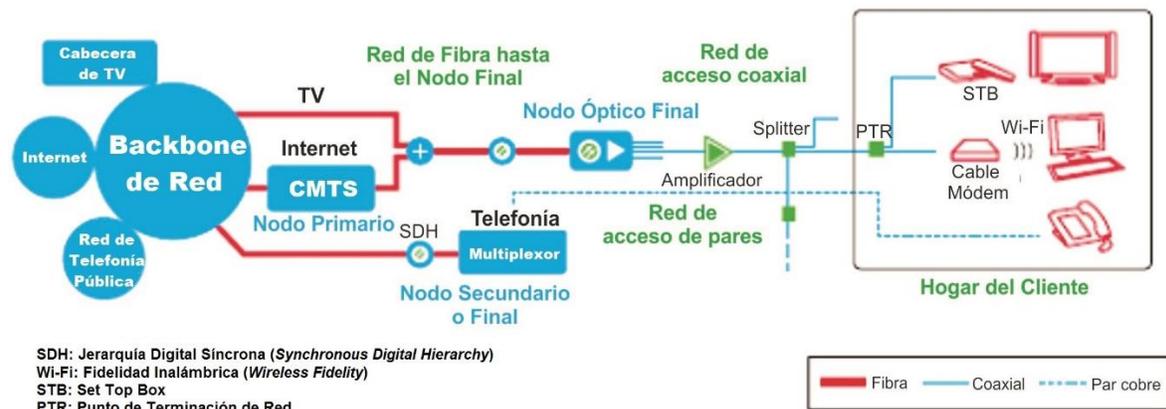


Figura 1.3. Arquitectura básica de una red HFC. Modificado de [21].

Como se puede observar en la figura 1.3, el despliegue de fibra óptica llega hasta un nodo óptico final que se encarga de realizar una conversión opto-eléctrica para distribuir la señal a cada uno de los abonados mediante cable coaxial.

1.2.3. Línea de Abonado Digital

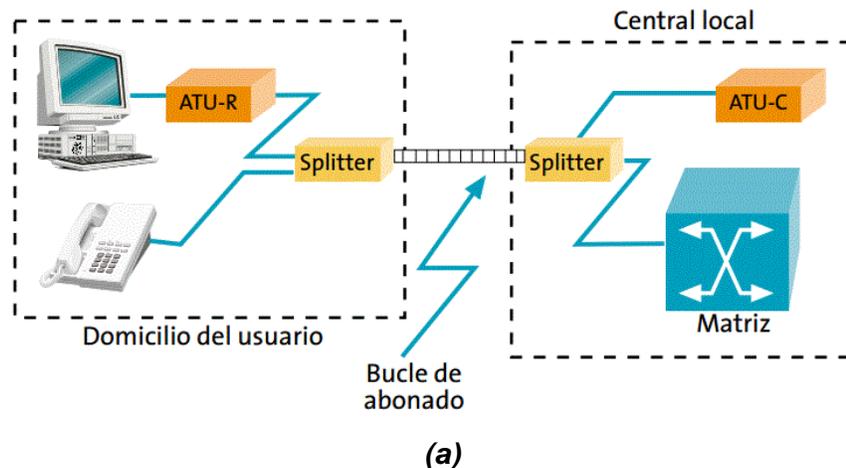
La tecnología Línea de Abonado Digital (DSL, *Digital Subscriber Line*) [22] [23] [24] hace referencia a una gama de tecnologías que proporcionan una conexión digital sobre las líneas de transmisión de cobre de la red telefónica convencional. El factor común de las tecnologías DSL es que funcionan sobre par trenzado y emplean modulación para lograr elevadas tasas de transmisión, cada una con sus propias características de distancia y configuración. El sistema DSL permite que tanto la voz como los datos puedan transmitirse simultáneamente sin necesidad de adicionar algún tipo de conexiones con el proveedor de Internet. Por otra parte, DSL está compuesta por una gama de tecnologías que ofrecen velocidades desde los 32 Kbps hasta 50 Mbps, lo que posibilita su utilización

⁶ Un *Set-Top Box* es un dispositivo externo que recibe la señal de televisión digital y la convierte en analógica, para que pueda ser visualizada en los televisores analógicos convencionales y posibilitar el acceso a servicios, como televisión de alta definición, servicios interactivos [25].

en aplicaciones que demanden alto ancho de banda, como la transmisión de video, aprendizaje multimedia, entre otros.

En cuanto a su funcionamiento, básicamente DSL trabaja sobre tres canales, dos canales de alta velocidad (envío y recepción de datos) y un canal para la voz. Cada canal ocupa una frecuencia diferente con el propósito de impedir interferencias, para la voz se tiene el rango de 200 Hz a 3.4 KHz, y para los canales de datos se tiene el rango de 24 KHz a 1.1 MHz. La voz y los datos son separados mediante *splitters*, ubicados en la central telefónica y en la residencia del abonado, donde también se encuentran los equipos terminales de abonado. El *splitter* está constituido por dos filtros, un pasa-bajo, que permite el paso únicamente a la señal de voz, y un pasa-alto que permite el paso solamente a los datos.

En la figura 1.4 (a) se muestra un esquema básico de una red de acceso DSL, donde se muestra sus componentes, y en (b) se muestra una conexión DSL en la residencia del suscriptor, donde se distinguen los elementos que la constituyen:



En (a) se distinguen los siguientes componentes:

- Bucle de abonado en par de cobre.
- *Splitter*, que separa los canales de voz y datos.
- Módem del lado del usuario ATU-R (*ADSL Terminal Unit Remote*)
- Módem del lado de la central ATU-C (*ADSL Terminal Unit Central*)

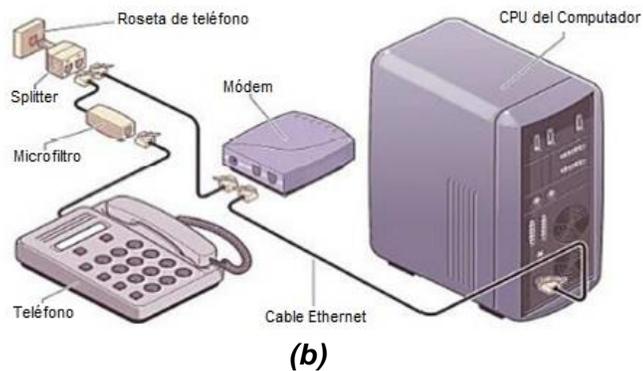


Figura 1.4. Red DSL: (a) Elementos de la red [26], (b) Conexión DSL en la residencia del abonado [23].

Para comprender las características de las tecnologías DSL que se describirán a continuación, es preciso mencionar dos conceptos de gran relevancia y que definen los dos tipos de DSL:

- DSL simétrico hace referencia a que las velocidades en sentido *Upstream* y *Downstream* son de igual valor.
- DSL asimétrico hace referencia a que las velocidades en sentido *Upstream* y *Downstream* son distintas, siendo la de mayor valor la de *Downstream*.

A continuación se describen las características principales de las tecnologías más destacadas que se enmarcan dentro de la gama DSL:

1.2.3.1. Línea de Abonado Digital Asimétrica

La tecnología Línea de Abonado Digital Asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*), utiliza el par de cobre como medio de transmisión y el cual puede tener distancias de aprox. 5.5 km⁷. ADSL tiene una transmisión asimétrica, es decir el *Downstream* está aproximadamente entre: 1,5 a 6.1 Mbps y el *Upstream* se encuentra entre los 16 a 640 kbps. La tecnología ADSL utiliza bandas de frecuencia superiores a la banda utilizada por la voz [27] [28] [29].

1.2.3.2. Línea de Abonado Digital Asimétrica 2

La tecnología Línea de Abonado Digital Asimétrica 2 (ADSL2, *Asymmetric Digital Subscriber Line 2*), es la mejora de ADSL en el ámbito de que proporciona mayores velocidades. ADSL2, al igual que su antecesora, tiene una transmisión asimétrica, pero con mayores velocidades de transmisión; para *downstream* se tiene un tasa entre los 8-12 Mbps y para el *Upstream*, entre los 0,8 - 1 Mbps. El medio de transmisión que utiliza la tecnología ADSL2 es el par de cobre, el cual puede tener una distancia de aprox. 2.5 km [27] [28][30].

⁷ Esta cobertura se establece por restricciones de la línea telefónica.

1.2.3.3. Línea de Abonado Digital Asimétrica 2 Plus

La tecnología Línea de Abonado Digital Asimétrica 2 Plus (ADSL2+, *Asymmetric Digital Subscriber Line Plus*) tiene mejoras en la velocidad de transmisión en relación a las tecnologías que lo precedieron. En el *Downstream* puede alcanzar 16-24,5 Mbps y en *Upstream* alcanza 0.8-1 Mbps. Mantiene la característica de transmisión asimétrica y alcanza una distancia alrededor 2.4 Km [27] [28] [31].

1.2.3.4. Línea de Abonado Digital Simétrica

La tecnología Línea de Abonado Digital Simétrica (SDSL, *Symmetric Digital Subscriber Line*), es un tipo de DSL que utiliza una transmisión simétrica. Las velocidades que puede proporcionar esta tecnología son de 400 kbps, 800 kbps, 1200 kbps y 2048 kbps [27] [28].

1.2.3.5. Línea de Abonado Digital sobre la Red Digital de Servicios Integrados

La tecnología Línea de Abonado Digital sobre la Red Digital de Servicios Integrados (IDSL, *Integrated Services Digital Network Digital Subscriber Line*), es una tecnología de bucle local, la cual provee un servicio básico de la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN, *Integral Services Digital Network*) sobre DSL. Utiliza un modo de transmisión simétrica de hasta 128 kbps tanto en *Upstream* como en *Downstream*. La cobertura que se alcanza en esta tecnología es de aprox. 8 km en el bucle de abonado [28].

1.2.3.6. Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad

La tecnología Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad (HDSL, *High Bit Rate Digital Subscriber Line*), utiliza un solo par de cobre simétrico y por medio de un módem HDSL se establece un circuito digital unidireccional que proporciona velocidades de 1,544 Mbps (T1) o 2,048 Mbps (E1); cuando se utilice dos pares se puede realizar una comunicación bidireccional a 1,024 Mbps en cada sentido. La distancia entre terminales oscila entre 3 y 4 Km [27] [28] [32].

1.2.3.7. Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad en un Solo Par

La tecnología Línea de Abonado Digital de Alta Velocidad en un Solo Par (SHDSL, *Single Pair High Speed Digital Subscriber Line*), utiliza la modulación de Trellis para que con la misma potencia de HDSL, se pueda reducir la complejidad de HDSL, cuadruplicar el ancho de banda para mayor capacidad o igual capacidad en menor ancho de banda y mejorar la Interferencia Intersímbolo (ISI, *Intersymbol Interference*). SHDSL mediante un solo par de cobre alcanza una velocidad de transmisión entre 192 kbps y 2,304 Mbps y si utiliza dos pares, la velocidad se incrementa entre 384 kbps y 4,608 Mbps. La distancia puede ser de aproximadamente 6 Km [27] [28] [33].

1.2.3.8. Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad

La tecnología Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad (VDSL, *Very High Bit Rate Digital Subscriber Line*), habitualmente utiliza como medio de transmisión el par trenzado, aunque también puede haber una combinación con fibra óptica debido a que existe una interfaz denominada unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*) que se encuentra

en las inmediaciones del usuario y le permite establecer la conexión, a diferencia de las tecnologías DSL que le preceden, las cuales establecen la conexión desde el cliente hasta la central. Esta tecnología tiene modo de transmisión asimétrico y simétrico con un máximo de 55 Mbps para *Downstream* y 15 Mbps para *Upstream*. Utiliza un ancho de banda de hasta 12 MHz lo que le permite proporcionar televisión de alta definición (HDTV, *High Definition Television*) [27] [28] [29].

1.2.3.9. Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad 2

La tecnología Línea de Abonado Digital de Muy Alta Velocidad 2 (VDSL2, *Very High Bit Rate Digital Subscriber Line 2*), es la más reciente tecnología de la familia DSL. VDSL2 tiene modos de transmisión simétricos o asimétricos. Con VDSL2, se puede conseguir velocidades netas bidireccionales de hasta 200 Mbps. La red de acceso puede ser absolutamente de cobre o parte de ella puede utilizar arquitecturas como Fibra hasta la x (FTTx, *Fiber to the x*), las cuales se definen a continuación [27] [28] [34] [35].

1.2.4. Redes de Acceso de Fibra Óptica hasta la X

Los proveedores de servicios de telecomunicaciones al buscar alternativas que superen las limitaciones de las tecnologías de las redes de acceso convencionales basadas en cobre han introducido las soluciones de red de acceso estructuradas en fibra óptica, consideradas como la alternativa más promisorias para servicios que demandan alta capacidad, ya que permite un mayor alcance y mayor ancho de banda en comparación con algunas tecnologías de red de acceso fijas, una vida útil de mayor duración, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, flexibilidad y escalabilidad de la red, mayor fiabilidad, mayor gama de servicios para brindar al suscriptor, entre otras ventajas [36] [37] [38]. De esta manera, los proveedores pueden realizar la oferta de servicios Triple Play (Voz, Internet y Televisión) utilizando redes FTTx que pueden ser combinadas con otras tecnologías de acceso si así se desea. FTTx [39] [40], es un término genérico que describe diferentes escenarios o configuraciones utilizadas en las redes de acceso por fibra óptica, es decir, la expresión FTTx generaliza las distintas configuraciones desplegadas, donde "x" denota los diferentes destinos del cableado de fibra óptica. Esta tecnología de acceso se basa principalmente en redes ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Network*). Como se observa en la figura 1.5, estas redes, según el IEEE 802.3ah están constituidas por cuatro elementos:

- Oficina Central del Proveedor: Este es el lugar donde reside el equipo Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Terminal*), el cual es la interfaz entre la red *core* y la red PON.
- Red de Distribución Óptica (ODN, *Optical Distribution Network*): Constituida por los componentes de la red óptica, tales como la propia fibra óptica y los divisores ópticos o *splitters*.
- Unidad de Red Óptica (ONU, *Optical Network Unit*): Elemento conectado a la OLT mediante fibra óptica y permite que se distribuyan los diferentes servicios ofrecidos por el proveedor al abonado, por medio de otras tecnologías de acceso.

- Terminal de Red Óptico (ONT, *Optical Network Terminal*): Elemento conectado a la OLT mediante fibra óptica, y se localiza en la residencia del suscriptor. Su funcionamiento es análogo a un módem DSL.

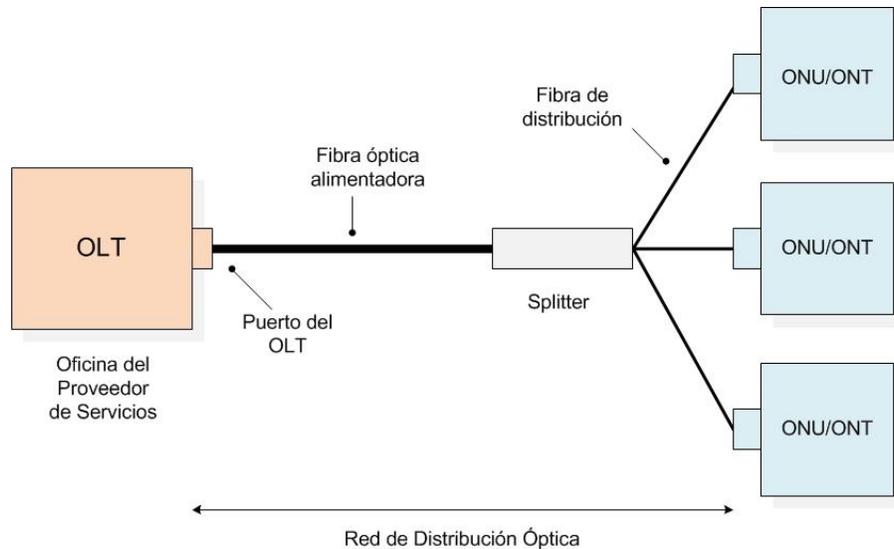


Figura 1.5. Red PON. Adaptado de [41].

En cuanto a la cobertura, este tipo de redes alcanzan distancias, alrededor de 20 Km desde la OLT hasta la ONT y respecto a las velocidades de transmisión que se alcanzan con esta tecnología de acceso, depende de la tecnología de red PON que se despliegue, como se expone en el siguiente capítulo.

1.2.4.1. Fibra Hasta el Vecindario

Este escenario, conocido como Fibra Hasta el Vecindario (FTTN, *Fiber To The Neighborhood*), permite distribuir la información desde la central hasta un punto, el cual converge a las zonas residenciales mediante la red de distribución existente en esta área y donde la velocidad de transmisión es propia de la infraestructura utilizada. El punto de concentración ONU de la arquitectura FTTN se puede encontrar a distancias superiores a los 300 m de la residencia del cliente. De la familia de arquitecturas FTTx, la arquitectura FTTN es la que mayor distancia tiene desde el punto de concentración hasta los usuarios [40] [42].

1.2.4.2. Fibra Hasta el Edificio

Este escenario, conocido como Fibra Hasta el Edificio (FTTB, *Fiber To The Building*), se caracteriza por que utiliza fibra óptica desde la oficina central del proveedor hasta un punto centralizado del edificio y desde este punto hasta los usuarios se utiliza la red de distribución propia del edificio, permitiendo reutilizar la infraestructura de red de este sin la necesidad de intervenir en la acometida hasta el abonado para poder distribuir los servicios. FTTB implementa una interfaz ONU entre la central y el usuario, la cual permite encaminar la información al usuario [28] [40] [43].

1.2.4.3. Fibra Hasta la Acera

En este escenario, conocido como Fibra Hasta la Acera (FTTC, *Fiber To The Curb*), la fibra óptica llega hasta la ONU ubicada aproximadamente a menos de 300 metros del lugar de residencia de los suscriptores, más cerca que en el escenario FTTN. La conexión entre la ONU y los abonados se realiza mediante la infraestructura de cable existente, por lo cual tiene menor costo en su implementación [39] [44] [45].

1.2.4.4. Fibra Hasta el Hogar

En este escenario, conocido como Fibra Hasta el Hogar (FTTH, *Fiber To The Home*), la fibra óptica llega directamente desde la Oficina del Proveedor hasta la casa del abonado, donde se encuentra la ONT, permitiendo la distribución de servicios banda ancha avanzados como telefonía, Internet y televisión. Este sistema de telecomunicaciones es relativamente nuevo y se ha ido consolidando rápidamente como una manera de proporcionar altos índices de ancho de banda, no solo a lugares residenciales sino también a negocios, por lo cual el abonado puede acceder a cualquier clase de servicios de transmisión de información a altas velocidades. En cuanto al despliegue de fibra, el escenario FTTH utiliza una cantidad de fibra óptica mucho mayor, en comparación con otras soluciones FTTx [46] [47].

En la figura 1.6, se pueden observar los escenarios FTTx anteriormente descritos.

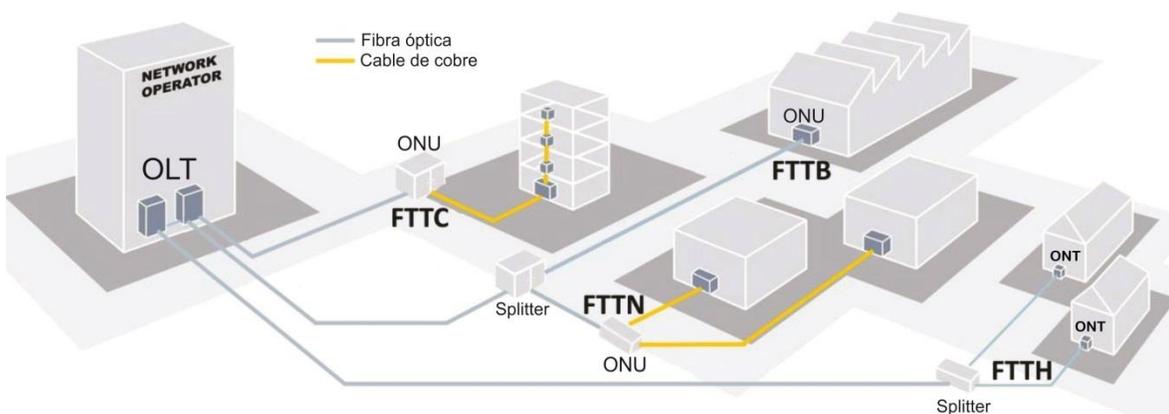


Figura 1.6. Escenarios FTTx. Modificado de [48].

En el presente capítulo se han expuesto los aspectos más relevantes en cuanto a las tecnologías de acceso cableadas existentes en la actualidad, introduciendo al concepto de redes de acceso de fibra óptica. En el siguiente capítulo se abordan los conceptos más importantes en torno a las redes ópticas pasivas, enfatizando en las redes FTTH-GEPON y en los servicios que este tipo de redes pueden proporcionar de manera integrada, conocidos como servicios Triple Play.

CAPÍTULO 2. REDES ÓPTICAS PASIVAS GIGABIT ETHERNET Y SERVICIOS TRIPLE PLAY

En el presente capítulo se tratan aspectos relacionados con redes ópticas pasivas y se profundiza sobre redes ópticas pasivas Gigabit Ethernet, además se abordan los aspectos más importantes sobre los servicios ofrecidos por este tipo de redes. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente capítulo se estructura en tres partes. En la primera parte, se realiza una visión general a las redes ópticas pasivas y a las tecnologías más destacadas que se han desarrollado en torno a estas. En la segunda parte, se enfatiza en las redes ópticas pasivas Gigabit Ethernet, exponiendo su arquitectura y los apartados más relevantes del estándar mediante el cual fueron desarrolladas. En la tercera parte, se abarca la base teórica relacionada con los servicios que este tipo de redes pueden proporcionar de manera integrada, denominados Triple Play, conformados por servicios de video, datos y voz.

2.1. REDES ÓPTICAS PASIVAS

Las redes ópticas pasivas son redes punto a multipunto que no poseen elementos activos en la red de distribución óptica, en su lugar utilizan dispositivos de carácter pasivo tales como, divisores ópticos (*splitters*⁸), combinadores y otros para distribuir las señales provenientes del proveedor de servicios hacia los abonados. La figura 2.1 muestra una red básica PON, con los escenarios FTTx más destacados.

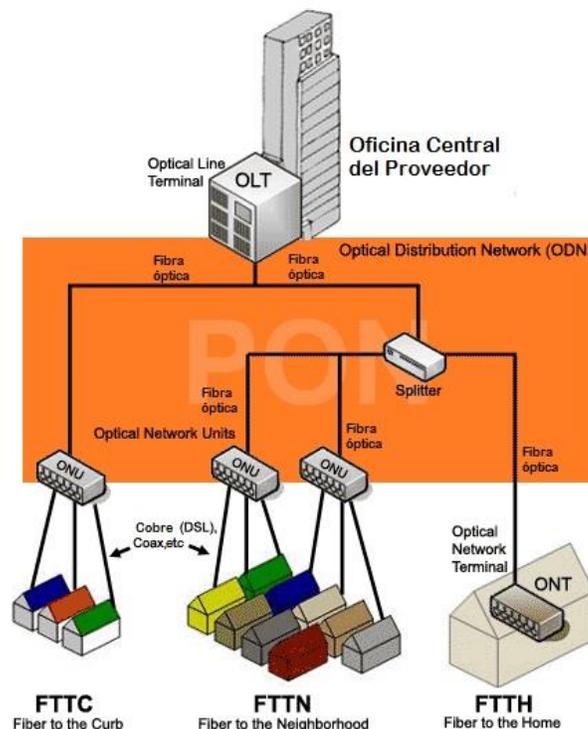


Figura 2.1. Red PON con escenarios FTTx. Modificado de [49].

⁸ A partir del presente capítulo, el término *Splitter* se utilizará para hacer referencia a divisores ópticos pasivos.

Entre las principales ventajas de las redes ópticas pasivas están mayor fiabilidad, reducción de consumo de energía (debido a la ausencia de elementos activos) y mantenimiento más sencillo, lo que representa una significativa disminución en el costo de operación de la red. Por lo anterior, este tipo de redes son consideradas como la manera más económica y adecuada para la implementación de enlaces de fibra óptica en la red de acceso, especialmente de FTTH [50].

2.1.1. Tecnologías de Redes Ópticas Pasivas

Entorno a las redes PON existen cuatro tecnologías que se han popularizado he implementado en los últimos años [51], los cuales se describen a continuación:

2.1.1.1. Redes Ópticas Pasivas con Modo de Transferencia Asíncrono

Las Redes Ópticas Pasivas con Modo de Transferencia Asíncrono (APON, *Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network*) se definen a través del estándar ITU-T G.983, el cual fue el primer estándar que se desarrolló para redes PON. Los sistemas APON emplean el protocolo Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*). Para el sentido *Downstream*, la transmisión se realiza en ráfagas de celdas ATM de 53 bytes cada una (48 bytes de datos y 5 de encabezado), y proporciona una velocidad de 622 Mbps, repartidos entre todos los usuarios de la red. Para el sentido *Upstream*, la trama de información está formada por 54 celdas ATM, dentro de las cuales hay dos celdas de Operaciones y Mantenimiento-Capa Física (PLOAM, *Physical Layer-Operation and Maintenance*), que guardan información relacionada con los destinos de cada celda, operación, mantenimiento y administración. La velocidad que proporciona en sentido *Upstream* es de 155 Mbps [52] [53].

2.1.1.2. Redes Ópticas Pasivas Banda Ancha

Bajo los estándares G.983.1 y G.983.5 de la ITU-T, surgen las Redes Ópticas Pasivas de Banda Ancha (BPON, *Broadband Passive Optical Network*) como evolución de las redes APON, dada la limitación de velocidad en las mismas. La redes BPON ofrecen velocidades que van desde 155.52 Mbps hasta 1.24 Gbps en sentido *Downstream* y 155.52 Mbps hasta 622,08 Mbps en sentido *Upstream*, además, permite dar soporte a otros estándares de banda ancha [50] [52] [53].

A continuación se nombran sus características más relevantes:

- De manera similar a APON, sus celdas pueden ser de datos o PLOAM.
- Alcanza una distancia de 20 Km y soporta hasta 64 usuarios finales.
- El estándar permite transportar los canales *Upstream* y *Downstream* con 1 o 2 fibras monomodo (SMF, *Single Mode Fiber*).
- Implementa redundancia en la red, a partir de cuatro esquemas, los cuales se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Esquemas de redundancia en BPON. Adaptada de [50].

TIPO	SIGNIFICADO
A	Una fibra adicional
B	Duplicado de fibra de alimentación y OLT
C	Duplicado en las fibras de distribución
D	Combinación de los esquemas B y C

2.1.1.3. Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit

Las Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit (GPON, *Gigabit Capable Passive Optical Network*) se definen a través de la recomendación G.984 de la ITU-T, como evolución de las redes BPON. De esta manera, GPON ofrece tasas de transmisión como las que se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Velocidades en GPON. Adaptada de [2].

Tasa de transmisión <i>Upstream</i>	Tasa de transmisión <i>Downstream</i>
155 Mbps	1.2 Gbps
622 Mbps	1.2 Gbps
1.2 Gbps	1.2 Gbps
155 Mbps	2.4 Gbps
622 Mbps	2.4 Gbps
1.2 Gbps	2.4 Gbps
2.4 Gbps	2.4 Gbps

Una característica importante de GPON es que tiene dos posibilidades para el protocolo de transporte, ATM al igual que APON y BPON y el Método de Encapsulamiento GPON (GEM, *GPON Encapsulation Method*) que permite soportar cualquier tipo de servicio (Ethernet, ATM, TDM⁹, entre otros). Este mecanismo está basado en el Procedimiento de Entramado Genérico (GFP, *Generic Framing Procedure*) descrito en la recomendación G.7041 de la ITU-T. Además, GPON implementa capacidades de Operación, Administración y Mantenimiento (OAM, *Operation, Administration and Maintenance*) avanzadas, ofreciendo una potente gestión de servicio extremo a extremo. Otras características de las redes GPON son [2] [52] [53]:

- Al igual que las anteriores redes PON, el estándar permite transportar los canales *Upstream* y *Downstream* bajo 1 o 2 fibras monomodo.
- Alcanza una distancia de 30 Km y soporta hasta 128 usuarios finales.
- Añade herramientas de seguridad con base en el Estándar de Cifrado Avanzado (AES, *Advanced Encryption Standard*) para los datos del usuario.

⁹ TDM: *Time Division Multiplexing*-Multiplexación por División de Tiempo

2.1.1.4. Redes Ópticas Pasivas Basadas en Ethernet

En forma paralela a la evolución de las redes PON estandarizadas por la ITU, cuyo inicio se encuentra en el Grupo de Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN, *Full Service Access Network*), se desarrolla una nueva especificación por parte del grupo de trabajo Ethernet en la Primera Milla (EFM, *Ethernet in the First Mile*), cuya intención era aprovechar las ventajas de las redes PON y fusionarlas con Ethernet para utilizarse en la red de acceso, inicialmente con una arquitectura FTTB, con el objetivo de constituir posteriormente una arquitectura FTTH, teniendo en cuenta que Ethernet es el protocolo dominante en redes de área local [53] [54] [55]. Además, se planteó que un único protocolo para la red de área local, la red de acceso y la red *Backbone*, facilitaría el despliegue de fibra óptica hasta el hogar [6]. En este orden de ideas, se desarrolló el estándar para las Redes Ópticas Pasivas Ethernet (EPON, *Ethernet Passive Optical Network*), especificado por la recomendación 802.3ah del IEEE (Junio de 2004), en el que su sistema se basa en el transporte de tráfico sobre tramas Ethernet en lugar de celdas ATM a una tasa de transmisión simétrica de 1 Gbps, razón por la cual se conoce ampliamente como Gigabit EPON o simplemente GEPON [56].

2.2. REDES ÓPTICAS PASIVAS GIGABIT ETHERNET

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de EFM era utilizar Ethernet en la red de acceso (primer kilómetro) por ser bastante efectivo al reducir los costos derivados de la utilización de elementos conversores de protocolo, y por ende, minimizar la complejidad de la arquitectura de red. Esencialmente, este grupo se enfocó en la estandarización de tres aspectos, Ethernet sobre cobre, Ethernet a través de una red de fibra punto a punto (P2P), Ethernet a través de una red de fibra óptica punto a multipunto (GEPON) y OAM [57]. La figura 2.2 ilustra los escenarios de Ethernet en la primera Milla.

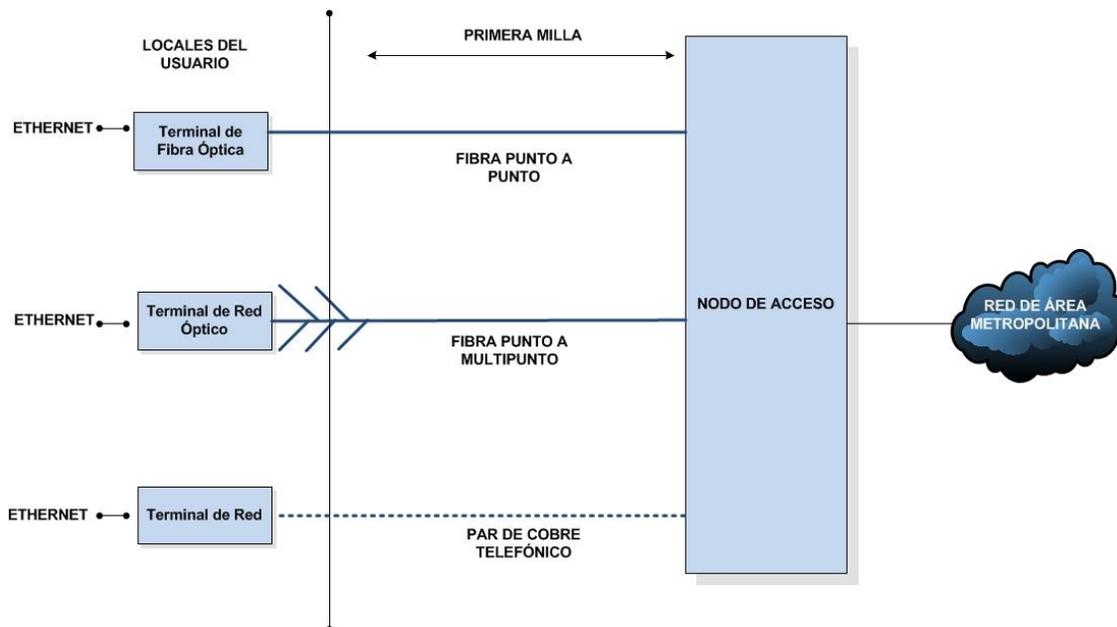


Figura 2.2. Escenarios Ethernet en la Primera milla. Tomada de [58].

En una topología punto a punto, el costo del despliegue de una fibra óptica dedicada para cada usuario final desde el nodo de acceso u oficina central, la instalación de dispositivos electrónicos activos en ambos extremos de cada fibra y la gestión de todas las conexiones de fibra, es bastante elevado. Por lo que las redes GEPON se convierten en una solución eficiente, al implementar una topología punto a multipunto, además de eliminar el empleo de componentes electrónicos activos, tales como regeneradores, amplificadores en la planta externa y reducir la cantidad de elementos láser necesarios en la CO. Claramente, una ventaja importante de redes GEPON es que utiliza fibra óptica, siendo esta el medio de transmisión más efectivo para el transporte de grandes volúmenes de información, ya que ofrece un gran ancho de banda, entre otras ventajas [59].

A continuación se muestran sus características principales [53] [55] [60]:

- A diferencia de las tecnologías PON anteriormente mencionadas, la estandarización de GEPON define la utilización de una sola fibra óptica monomodo para transportar el canal *Upstream* y *Downstream*.
- Las redes GEPON emplean una arquitectura FTTH con topología punto a multipunto para proveer servicios banda ancha a usuarios residenciales y comerciales, conformando un sistema de red más viable, debido a que los equipos con los que accede el usuario tienen interfaces Ethernet.
- La gestión y administración de la red se basa en el Protocolo Simple de Gestión de Red (SNMP, *Simple Network Management Protocol*), logrando reducir el nivel de complejidad característico de sistemas de gestión de otras tecnologías.
- Al soportarse en tecnología Ethernet, permite proporcionar de manera eficiente servicios basados en el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*), como VoIP, Televisión sobre Protocolo de Internet (IPTV, *Internet Protocol Television*), Internet, etc.

2.2.1. Arquitectura de una Red GEPON

Una red GEPON está constituida por el Elemento de Gestión del Sistema (EMS, *Element Management System*), OLT, el ONT, fibra óptica monomodo, *splitters* y acopladores. En la figura 2.3 se ilustra los elementos que componen una red GEPON.

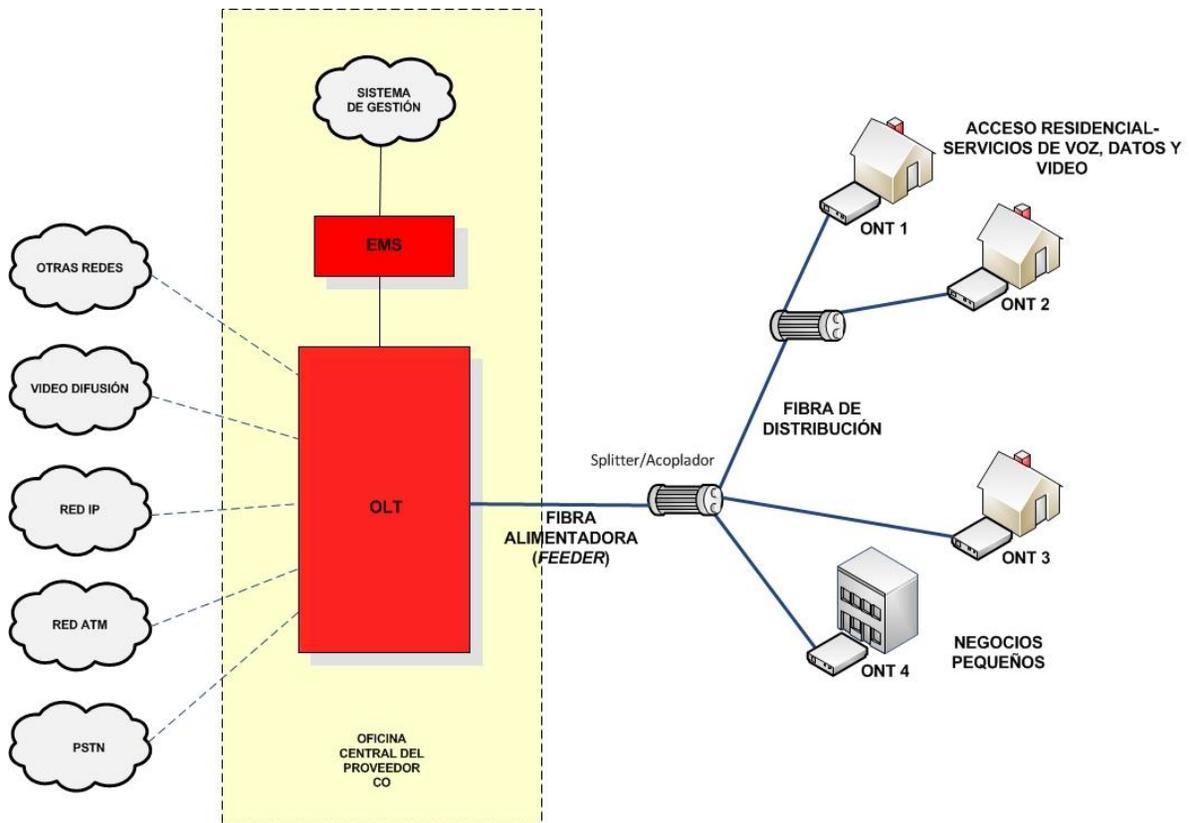


Figura 2.3. Arquitectura de red GEPON. Adaptada de [59].

A continuación se describen los principales elementos que conforman una red GEPON.

➤ Equipo Terminal de Línea Óptico

El equipo Terminal de Línea Óptico u OLT es un elemento activo localizado en la CO o nodo central desde donde parte el tendido de fibra óptica y es el encargado de gestionar el tráfico de información hacia los ONT y el tráfico proveniente de estos. El OLT permite la interconexión y conmutación de información con otras redes externas. Además, el OLT se encarga de la conversión de las señales provenientes de redes externas a un formato compatible con la red óptica pasiva Ethernet y viceversa. Básicamente, el OLT adquiere información de tres fuentes de tráfico diferentes, tales como [53]:

- Red Publica Telefónica Conmutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*) para los servicios de voz. El OLT se conecta por medio de un *gateway* o pasarela de voz a través del Protocolo de Control de Pasarela de Medios (MGCP, *Media Gateway Control Protocol*).
- Red IP. Para los servicios basados en IP, como datos, Internet, VoIP, etc.

- Red de Video. Para los servicios de video difusión (Video Broadcast¹⁰)

Además, el OLT está compuesto por tres módulos encargados de gestionar un tráfico diferente [53]:

- P-OLT: El Módulo OLT de Paquetes (P-OLT, *Packet OLT*) es el encargado de recoger tráfico de voz y datos dirigido a la red GEPON, procedente de la PSTN y la red IP, y adaptarlo en señales que puedan ser transportadas en la red óptica, para lo cual utiliza una longitud de onda dedicada. Es decir, se encarga de generar las señales ópticas de voz y datos para ser transportadas hacia los ONT. Por otra parte, también se encarga de recibir las tramas de voz y datos procedentes de los ONT, y redirigir el tráfico de voz hacia la PSTN y el tráfico de datos hacia la red IP.
- V-OLT: El Módulo OLT de Video (V-OLT, *Video OLT*) se encarga de recibir y procesar las señales procedentes de la red de video-difusión, para que sean transportadas hasta los ONT de los usuarios. Es decir, adapta las señales de video para ser transportadas en la red óptica y las envía en una longitud de onda dedicada.
- Dispositivo Multiplexor por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexer*): Es un dispositivo que se encarga de combinar las señales provenientes del módulo V-OLT y del módulo P-OLT.

La figura 2.4 muestra una representación esquemática de la estructura del OLT, donde se distinguen los módulos anteriormente mencionados.

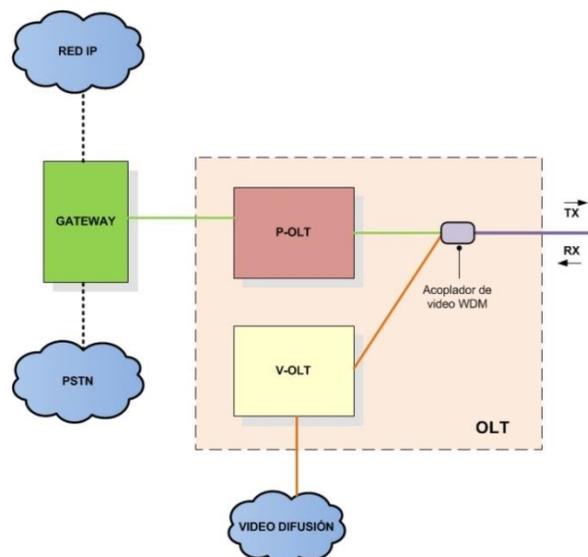


Figura 2.4. Estructura del OLT. Adaptada de [53].

¹⁰ En este contexto, el termino *Broadcast* hace referencia a la transmisión y recepción de señales de video en la modalidad de entrega de una fuente a varios receptores, donde la información será recibida por todos los dispositivos de recepción que componen la red [61].

➤ Terminal de Red Óptico

El Terminal de Red Óptico u ONT es un elemento activo que permite al usuario acceder a los servicios proporcionados por el proveedor de servicios. Utilizando diferentes longitudes de onda, es capaz de transmitir y recibir simultáneamente tráfico conformado por voz, datos y televisión. Básicamente, su función es convertir el formato de la señal proveniente de la red óptica a una señal compatible con los dispositivos del usuario final y viceversa. A diferencia de la ONU, el ONT está instalado en el hogar o negocio del usuario, por lo tanto es propio de la arquitectura FTTH. Por su parte, la ONU es un dispositivo compartido por varios usuarios, por lo tanto hace parte de otras arquitecturas FTTx, combinadas con otras tecnologías de acceso como VDSL2, ADSL2+, entre otras. La información proporcionada por el OLT llega a todos los ONT por igual, por lo que una de sus funciones es disponer de aquella información que solamente se destine a éste. Una vez seleccionada la información, el ONT diferencia entre las señales de televisión y las tramas de voz y datos [53].

➤ Elemento de Gestión del Sistema

El elemento de gestión del sistema o EMS se encarga de gestionar los diferentes elementos que constituyen la red GEPON y proporciona la interfaz para que el proveedor de servicios pueda llevar a cabo las operaciones principales de la red. Entre sus funcionalidades se incluyen la gestión de Fallos, Configuraciones, Contabilidad, Rendimiento y Seguridad (FCAPS, *Fault, Configurations, Accounting, Performance and Security*) [59].

Las principales características del EMS son [59] [62]:

- Proporciona una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, *Graphic User Interface*) para que el proveedor de servicios realice la gestión de FCAPS.
- Gestión de múltiples equipos que constituyen el sistema GEPON.
- Permite que múltiples operarios de la red puedan administrar y utilizar la interfaz GUI simultáneamente.
- Constituido por interfaces estandarizadas que permiten administrar y tener un control sobre las operaciones de la red.

2.2.2. Arquitectura de Niveles de GEPON

El grupo de trabajo IEEE 802.3 se enfoca en los dos primeros niveles del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*), esto son, el nivel físico y el nivel de enlace de datos. Cada uno de estos niveles está conformado por subniveles e interfaces. La figura 2.5 ilustra la arquitectura de niveles definida para sistemas basados en Ethernet que operan a 1Gbps, como el caso de GEPON [63].

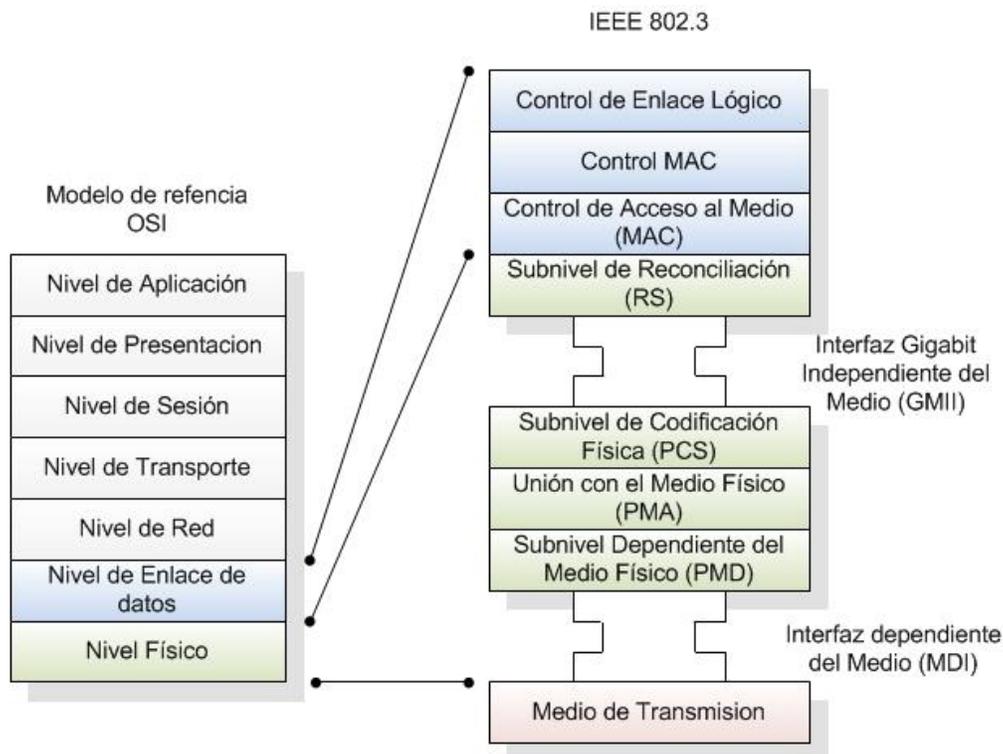


Figura 2.5. Arquitectura de Niveles de IEEE 802.3 para GEPON. Tomada de [64].

2.2.2.1. Nivel Físico

La velocidad de transmisión en redes GEPON es simétrica y ofrece 1 Gbps. Utiliza una codificación de línea 8B/10B (por cada 8 bits de datos se transmiten 10 bits de línea). Esta codificación demanda 0.25 Gbps de ancho de banda, por lo que resulta una velocidad de transmisión de 1.25 Gbps. Como se mencionó anteriormente, utiliza únicamente una fibra monomodo como alimentadora, es decir desde la CO hasta un *splitter* pasivo de relación 1: N, donde N puede ser 2, 4, 8, 16, 32. Además, las distancias que se fijan en 802.3ah pueden ser de aprox. 20 Km y la topología empleada es punto a multipunto. Por otra parte, en GEPON pueden utilizarse dos esquemas de asignación de longitud de onda. El primero define la utilización de dos longitudes de onda, 1490 nm para el tráfico en *Downstream* (tráfico IP) y 1310 nm para tráfico *Upstream*. El segundo esquema define la utilización de tres longitudes de onda, adicionando a las dos anteriores la de 1550 nm, dedicada únicamente a la transmisión *Downstream* de servicios de CATV Digital o CATV Analógico [59] [63] [65].

Los subniveles e interfaces que conforman el nivel físico se describen a continuación con base en [60] [63] [64]

- Interfaz Dependiente del Medio (MDI, *Medium Dependent Interface*): Especifica el medio de transmisión, las señales y las interfaces electro-ópticas entre el medio físico y los elementos que componen la capa física.

- Subnivel Dependiente del Medio Físico (PMD, *Physical Medium Dependent*): Este subnivel es responsable de la interfaz hacia el medio de transmisión y se localiza sobre el MDI. El subnivel PMD se detalla en la cláusula 60 de IEEE 802.3ah y define los siguientes criterios:
 - ✓ Soporte para medio punto a multipunto mediante fibra óptica
 - ✓ 1000 Mbps hasta 20 Km sobre una fibra monomodo con una relación de división o Split de 1:32.
 - ✓ Tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) mejor o igual que 10^{-12} .
 - ✓ Se establece dos tipos de PMD: 1000BASE PX10 y 1000BASE PX20, cuyas características o parámetros principales se muestran en la tabla 2.3 y que sirven como referencia para la implementación de modelos de simulación descritos en el capítulo 4.

Tabla 2.3. Características principales de los dos tipos de PMD para GEPON.
Adaptada de [64].

Características	1000BASE-PX10		1000BASE-PX20		Unidades
	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-U	1000BASE-PX20-D	
Tipo de fibra	Fibra Monomodo				
Número de Fibras	1				
Longitud de onda de transmisión	1310	1490	1310	1490	nm
Dirección de transmisión	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	--
Distancia	0.5 m-10 Km		0.5 m-20 Km		--
Perdidas de inserción de canal (máx.)	20	19.5	24	23.5	dB
Perdidas de inserción de canal (mín.)	5		10		
Potencia de transmisión (máx.)	+4	+2	+4	+7	dBm
Potencia de transmisión (min.)	-1	-3	-1	+2	dBm
Sensibilidad del receptor	-24	-24	-24	-27	dBm
BER	10^{-12}				

- Subnivel de Unión con el Medio Físico (PMA, *Physical Medium Attachment*): Este subnivel contiene las funciones de transmisión, recepción, recuperación de reloj y alineamiento de fase.
- Subnivel de Codificación Física (PCS, *Physical Coding Sublayer*): Este subnivel contiene las funciones encargadas de codificar los bits de datos en grupos de códigos que pueden ser transmitidos sobre el medio físico. Además, especifica el mecanismo de Corrección de Errores hacia Adelante (FEC, *Forward Error Correction*) que permite incrementar la distancia de transmisión de la fibra óptica, utilizando codificación Reed Solomon y 16 bytes de paridad, utilizados para corregir errores en el receptor.
- Interfaz Gigabit Independiente del Medio (GMII, *Gigabit Media Independent Interface*): Este subnivel especifica una interfaz entre el nivel MAC y el nivel físico. Su objetivo es permitir que diferentes Equipos Terminales de Datos (DTE, *Data Terminal Equipment*) puedan conectarse a través de diferentes medios de transmisión.
- Subnivel de Reconciliación (RS, *Reconciliation Sublayer*): Proporciona un mapeo de las señales producidas por la GMII enviadas hacia el nivel MAC. Además permite la comunicación entre los ONT de la red GEPON, realizando una emulación de un comportamiento punto a punto. Esta emulación se basa en la asignación de un marcador único para cada ONT conectada a la GEPON, conocido como Identidad de Enlace Lógico (LLID, *Logical Link ID*), el cual va encapsulado en el preámbulo de cada transmisión.

2.2.2.2. Nivel de Enlace de Datos

El nivel de enlace de datos está conformado por los siguientes subniveles, los cuales se describen desde el subnivel más bajo hacia el subnivel más alto, según se plantea en [60] [63]:

- Subnivel de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*): Su función es transferir datos desde y hacia la capa física. Básicamente, este subnivel define la encapsulación de datos (entramado, direccionamiento y detección de errores) y el acceso al medio.
- Subnivel de control MAC: Realiza tareas de control y operación del subnivel MAC en tiempo real.
- Subnivel de Control de Enlace Lógico (LLC, *Logical Link Control*): Define un subnivel que pertenece al nivel de enlace y se caracteriza por ser independiente del medio, sin embargo, esta fuera del alcance del estándar IEEE 802.3ah y es propio del estándar IEEE 802.3. A pesar de ello, es compatible con las especificaciones de GEPON.

2.2.3. Funcionamiento de una Red GEPON

En una red GEPON la información es transmitida en tramas de longitud variable de hasta 1518 bytes, tal como se establece en el estándar IEEE 802.3 que define las características para Ethernet. Esto marca la diferencia con las redes ópticas pasivas basadas en el protocolo ATM, en donde los datos son transmitidos en celdas de longitud fija de 53 bytes. Se considera que ATM es una manera ineficiente para transportar datos en formato IP, ya que tiene que dividir los paquetes IP en unidades de 48 bytes con 5 bytes de encabezamiento cada uno. Para un servicio IP, donde la longitud de los paquetes alcanza hasta 65535 bytes, el proceso de fragmentación demandaría bastante tiempo, por lo que los OLT y ONT se caracterizan por ser unidades más complejas y por ende más costosas. Por ello, Ethernet facilita el transporte de tráfico IP reduciendo la complejidad en la transmisión y los costos de los equipos de la red [59].

2.2.3.1. Transmisión de tráfico en *Downstream*

Como se mencionó anteriormente, la información es enviada desde el OLT hasta los ONT en tramas de longitud variable. Cada trama tiene un encabezado propio que identifica su pertenencia a un ONT en particular. En algunos casos, las tramas que se transmiten pueden pertenecer a todos los ONT (transmisión *broadcast*) o a un grupo particular de ONT (transmisión *multicast*). En el *splitter*, el tráfico es dividido en señales separadas, cada una transportando las tramas de todos los ONT. Cuando estos llegan a cada ONT, este identifica y acepta las tramas de datos que le pertenecen y descarta las tramas pertenecientes a otros ONT. Por ejemplo, en la figura 2.6 se observa que el ONT-1 recibe las tramas 1, 2 y 3 pero solamente acepta la trama 1 para entregarlo al usuario 1, descartando las tramas del ONT-2 y ONT-3 [59].

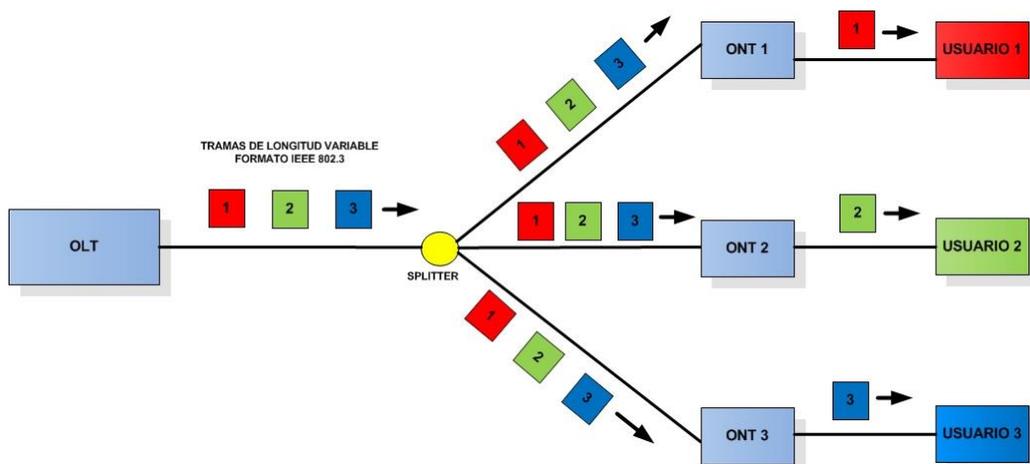


Figura 2.6. Tráfico en sentido Downstream en GEPON. Modificado de [66].

2.2.3.2. Transmisión de tráfico en *Upstream*

En la figura 2.7 se ilustra el modo en el que el tráfico en *Upstream* se lleva a cabo, para ello utiliza la tecnología de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), en la cual cada ONT tiene asignado un periodo o Intervalo de Tiempo

(TS, *Time slot*) para transmitir hacia el OLT. Estos periodos de tiempo están sincronizados, de tal manera que las tramas enviadas hacia el OLT no interfieran entre sí cuando compartan la misma fibra óptica, después de llegar al *splitter*. Por ejemplo, el ONT-1 transmite la trama 1 en el primer TS, el ONT-2 transmite la trama 2 en un segundo TS y de igual manera, el ONT-3 transmite la trama 3 en un tercer TS, de tal manera que los datos no se superpongan [59] [62].

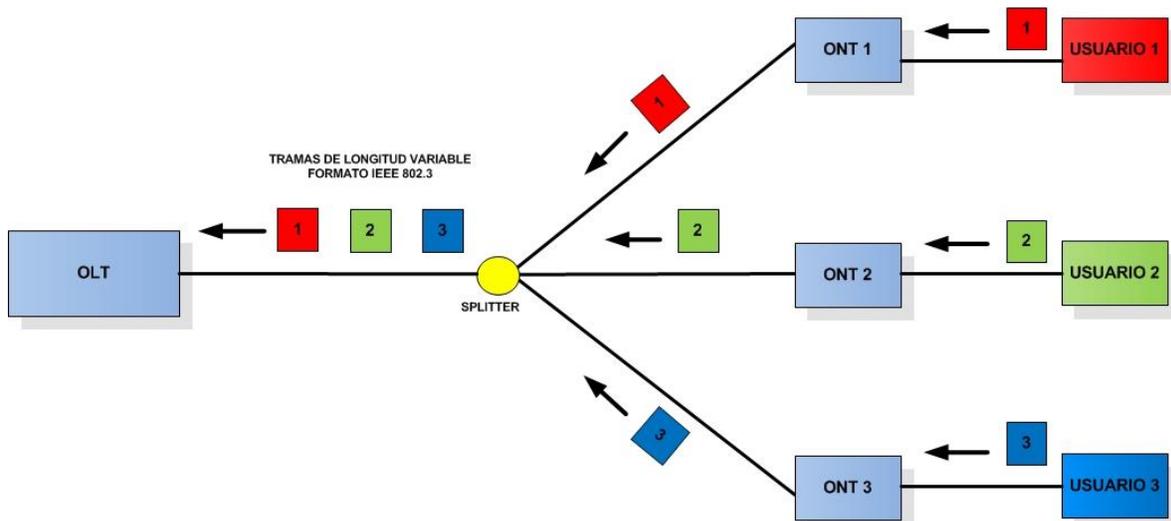


Figura 2.7. Tráfico en sentido Upstream en GEPON. Modificado de [66].

2.2.3.3. Protocolo de Control Punto a Multipunto

El Protocolo de Control Punto a Multipunto (MPCP, *Multi Point Control Protocol*) es un protocolo orientado a tramas basado en mensajes de control MAC de 64 Bytes cuya función principal es controlar y coordinar las transmisiones en sentido ascendente, deteniendo la transmisión de datos hasta que el ONT reciba un mensaje de control que le indique que puede utilizar el medio de transmisión, a partir de ese momento cuenta con un tiempo determinado para llevar a cabo la transmisión de los datos y de esta manera evitar las colisiones en el OLT [67]. El protocolo MPCP tiene dos modos de operación:

- Modo de asignación de ancho de banda [2] [63] [67].

Este mecanismo es utilizado para garantizar a cada ONT un slot de tiempo para que pueda transmitir hacia el OLT, es decir, para llevar a cabo la transmisión en *Upstream*. Está basado en el envío de mensajes GATE (para conceder) y REPORT (para solicitar) los cuales son tramas propias de control MAC.

Un mensaje GATE es enviado desde el OLT a cada ONT que compone la red con el fin de establecer un *time slot* para la transmisión de datos de un ONT determinado. Este *time slot* está constituido por los valores de Tiempo de Inicio o tiempo de inicialización y Longitud, asignados por el planificador o por el agente de Asignación de Ancho de Banda Dinámico (DBA, *Dynamic Bandwidth Assignment*) ubicado en el cliente de control MAC. Estos dos valores son procesados por el ONT (específicamente en el planificador o *scheduler*) el cual organiza de manera

ordenada las tramas que serán transmitidas y establece la duración de la transmisión, con el fin de adaptarse al *time slot* asignado por el OLT.

Por su parte, REPORT es un mensaje de retroalimentación el cual indica al OLT el tamaño del *buffer* de transmisión de cada ONT con el propósito de que asigne un *time slot* determinado en la transmisión siguiente con base en los requerimientos de los ONT. Este mensaje es iniciado en el agente DBA y es enviado únicamente en un *time slot* previamente asignado. De esta manera, los mensajes REPORT son procesados y analizados por el agente DBA en el OLT para asignar los *time slots* en la siguiente transmisión de mensajes GATE.

➤ Modo de autodescubrimiento [2] [63] [68]

Este mecanismo es llevado a cabo periódicamente por el OLT para “descubrir” nuevos dispositivos ONT que se han conectado a la red. El proceso es controlado por el Agente de descubrimiento en el OLT y en el ONT. Básicamente, el proceso de autodescubrimiento es el siguiente:

1. El agente de descubrimiento del OLT comienza un sondeo de descubrimiento y reserva una ventana de descubrimiento. El OLT envía un mensaje de inicialización denominado *GATE_Discovery*, en el que se incluye el tiempo de inicialización y su longitud.
2. Únicamente los ONT no inicializados pueden aceptar el mensaje. A partir del momento estipulado por el Tiempo-Inicio, el ONT espera un tiempo para evitar posibles colisiones con otros ONT que aún no han sido inicializadas. Luego, envía un mensaje *REGISTER_REQ* (que contiene la dirección MAC y Tiempo Local en el que fue enviado) con el que el OLT reconoce el nuevo ONT y se calcula el Tiempo de ida y vuelta (RTT, *Round Trip Time*).
3. Posteriormente, después de verificar el mensaje *REGISTER_REQ*, el OLT envía un *REGISTER* al nuevo ONT (el cual contiene el Identificador de Enlace Lógico o LLID asignado) y luego un *GATE* al mismo ONT.
4. Finalmente, después de que el ONT recibe el *REGISTER* y el *GATE*, envía un mensaje *REGISTER_ACK* en el intervalo *GATE* asignado en el paso anterior, para confirmar al OLT que el proceso de registro se realizó exitosamente.

2.2.4. Mecanismos de asignación de ancho de banda

➤ Asignación Estática de Ancho de Banda

La Asignación Estática de Ancho de Banda (SBA, *Static Bandwidth Assignment*) proporciona una ventana de transmisión de datos fija para cada ONT. Esta asignación opera de manera similar a TDMA donde cada intervalo de transmisión es fijo, sin tener en cuenta el tráfico en la red. Aunque este mecanismo es fácil para su implementación, es ineficiente, ya que al asignar al ONT un intervalo de transmisión aún sin tener datos para transmitir, se desperdicia los recursos ofrecidos por el medio de transmisión [60] [69].

➤ Asignación Dinámica de Ancho de Banda

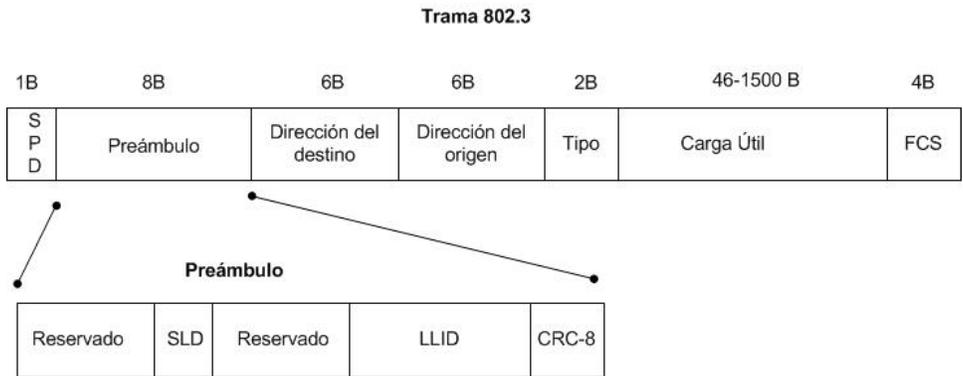
El mecanismo de Asignación Dinámica de Ancho de Banda (DBA, *Dynamic Bandwidth Allocation*) asigna bajo demanda el ancho de banda de un medio compartido, de tal manera que dicha asignación se realice de una manera más equitativa entre todos los usuarios del medio, por lo cual es más eficiente. DBA también se define como el proceso de proporcionar Multiplexación estadística entre nodos ONT donde se adapta el ancho de banda del medio de transmisión a los requerimientos de tráfico de los usuarios conectados a la red [60] [69].

Para redes GEPON existen varios esquemas DBA, dentro de los cuales los más importantes son:

- ✓ El Sondeo Intercalado con Ciclo de Tiempo Adaptativo (IPACT, *Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time*), que utiliza los mensajes *REPORT* y *GATE* de MPCP para asignar ancho de banda a los ONT. Si el OLT asigna un ancho de banda a un ONT determinado y espera hasta que la transmisión del ONT finalice para enviar el *GATE* del siguiente ONT, el RTT del mensaje se desperdicia. Lo que IPACT hace es eliminar el tiempo de espera enviando el mensaje *GATE* al siguiente ONT mientras recibe el mensaje del ONT que está transmitiendo. Para esto, se calcula el tiempo en el que la comunicación con el ONT que transmite terminaría. En GEPON es el más utilizado, debido a su compatibilidad con MPCP, por lo que está más desarrollado y ofrece un mejor rendimiento [60] [69].
- ✓ El Sondeo de Ancho de Banda Garantizado (BGP, *Bandwidth Guaranteed Polling*) divide la ventana de transmisión en intervalos de tamaño fijo que se asignan a cada ONT. En el caso en el que un ONT no utilice todo el intervalo que le ha sido asignado, se le informa al OLT para que determine a que ONT se le puede asignar esta ventana de transmisión de acuerdo con su carga de tráfico. Este esquema no es del todo compatible con MPCP [60] [69].

2.2.5. Formato de Trama de GEPON

La tecnología GEPON al basarse en Ethernet, tiene su misma estructura de trama de datos, con algunas modificaciones en el preámbulo, el cual es heredado de los inicios de las redes Ethernet con Acceso Múltiple con Escucha de Portadora y Detección de Colisiones (CSMA/CD, *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*). Sin embargo, el modo CSMA/CD actualmente ya no se usa debido a la implementación del modo de transmisión *full duplex*, por lo que el preámbulo se modificó para darle un mejor uso en GEPON. Por otra parte, un mecanismo de acceso al medio como CSMA/CD, tiene complicaciones para implementarse en GEPON, ya que un ONT no tiene la capacidad de informar a otros ONT sobre una colisión. El OLT podría detectar la presencia de una colisión y enviar una señal a los ONT para informar la colisión, pero los retardos de propagación en la red, la cual puede alcanzar hasta 20 Km de longitud, reducen drásticamente la eficiencia de este esquema. Por esta razón, CSMA/CD ha quedado obsoleto y en su lugar se utiliza TDMA, como se mencionó en apartados anteriores [3] [63] [69]. En la figura 2.8 se muestra la estructura de la trama Ethernet y el formato del preámbulo.



SPD: Delimitador de Inicio del Preámbulo (*Start Preamble Delimiter*)
 FCS: Secuencia de Verificación de trama (*Frame Check Sequence*)
 SLD: Delimitador de Inicio de LLID (*Start LLID Delimiter*)
 CRC: Verificación de Redundancia Cíclica (*Cyclic Redundance Check*)
 LLID: Identificador de Enlace Lógico (*Logical Link ID*)

Figura 2.8. Formato de trama GEPON. Tomada de [60]

2.2.5.1. Trama para tráfico *Downstream*

En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de una transmisión de tráfico en sentido *Downstream*, para la cual, el tráfico es dividido en segmentos fijos que transportan tramas de longitud variable. La información de reloj, cuya funcionalidad es la de un marcador de sincronización, se incluye al comienzo de cada trama. Este marcador de sincronización es un código constituido por un byte y es transmitido cada 2 ms con el propósito de sincronizar el OLT con el ONT. Cada paquete incluye el encabezado, la carga útil de longitud variable y un campo de detección de errores. El número que identifica cada paquete indica el ONT a la cual está dirigido [59].

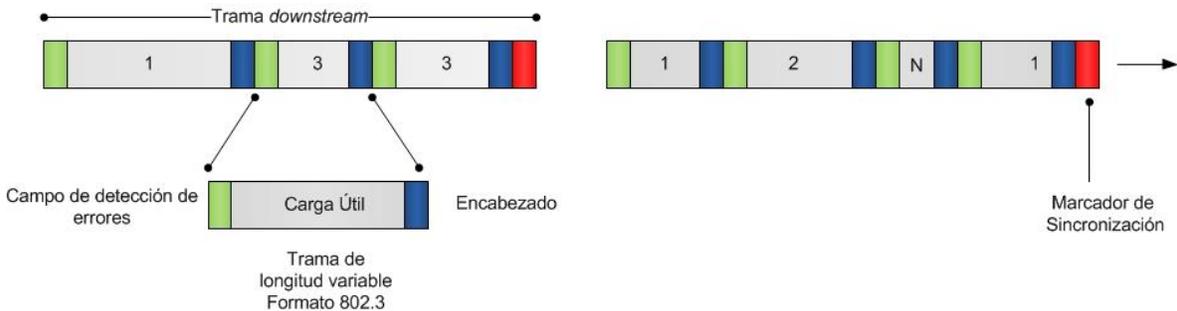


Figura 2.9. Trama Downstream en GEPON. Modificado de [59].

2.2.5.2. Trama para tráfico *Upstream*

En la figura 2.10 se ilustra la trama para tráfico *Upstream* en una red GEPON. Las tramas *Upstream*, son segmentadas en intervalos de tiempo dedicados para cada ONT. Por lo tanto, cada trama *Upstream* es dividida en N intervalos de tiempo, con cada intervalo de tiempo correspondiente a un ONT. En otras palabras, cada ONT tiene su intervalo de tiempo propio, que puede ser tratado como un intervalo de transmisión, dentro de cada

trama *Upstream*. Las tramas *Upstream* se transmiten en un intervalo continuo de 2 ms [59][62].

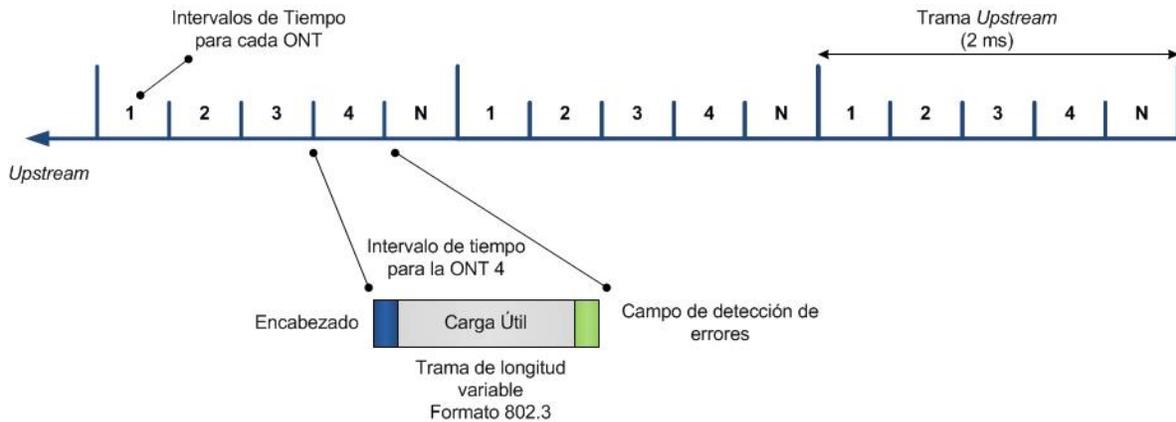


Figura 2.10. Trama *Upstream* en GEPON. Modificado de [59].

2.3. SERVICIOS SOPORTADOS POR UNA RED FTTH-GEPON

2.3.1. Convergencia Tecnológica

En los últimos años, el transporte de servicios tradicional en donde se tiene un único medio para la prestación de un único servicio, perdió fortaleza, debido principalmente a que no se adaptó a las demandas solicitadas por los agentes del mercado. A nivel de consumidor se solicitaba una mejor calidad de servicios y a nivel de operador se buscaba un posicionamiento como proveedor único a las necesidades del cliente [70].

Empujados por las necesidades e intereses del mercado, los agentes encargados del progreso en el sector de las telecomunicaciones desarrollaron tecnologías con los siguientes requisitos:

- Ampliación del ancho de banda
- Redes transnacionales
- Terminales multifunción
- Canales integrados
- Oferta única de servicios
- Gestión única

Las nuevas tecnologías permitieron cambiar la estructura “vertical” de las redes independientes por una estructura “horizontal”, que puede entregar muchos tipos de contenido a través de una misma plataforma. Ahora, las llamadas de voz o telefax, las comunicaciones entre computadoras y la radiodifusión ya no serían mundos separados.

La entidad regulatoria de difusión y de las industrias de las telecomunicaciones OFCOM (*Office of Communication*) define al proceso de convergencia como, la tendencia a que una amplia gama de contenidos (audio, video, texto e imágenes) y servicios se distribuyan a través de distintas redes (fija, de banda ancha, infraestructura móvil, satélite, cable

terrestre) a una variedad de dispositivos de consumo (computadores personales, TV, teléfonos móviles).

Existen diferentes dimensiones en el proceso de convergencia, entre las más importantes se encuentran [71]:

- *Convergencia en la red*: Prestación de diferentes servicios sobre una única infraestructura.
- *Convergencia de servicios*: Empaquetamiento de los servicios tradicionales.
- *Convergencia en las terminales*: Convergencia en equipos, por ejemplo, se tiene televisión, telefonía móvil, computador personal en un solo dispositivo.

2.3.1.1. Servicios Convergentes

Los servicios convergentes son el desarrollo tecnológico que integra las comunicaciones en un lugar residencial. La unificación de las comunicaciones en una residencia permite al usuario acceder por medio de una sola red de acceso a los principales servicios constituidos por datos, voz y televisión. Este modelo de agrupación de servicios se comercializa comúnmente como servicio Triple Play.

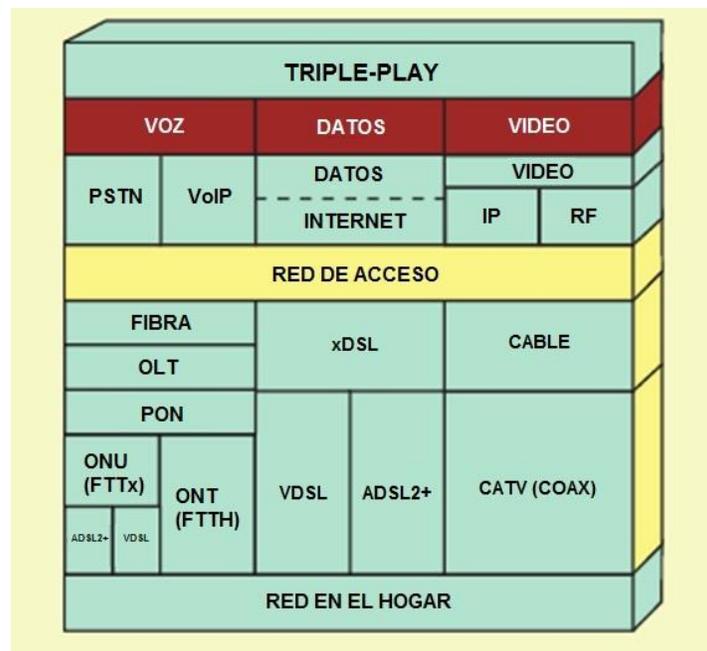


Figura 2.11. Diversidad de tecnologías para la prestación de servicios Triple Play. Modificada de [72].

En la actualidad existen diferentes redes de acceso que permiten distribuir el servicio Triple Play a las residencias, como se puede visualizar en la figura 2.11. La diversidad de redes de acceso en el mercado permite tener diferentes niveles de calidad en los servicios, logrando de esta manera que muchos usuarios disfruten del servicio Triple Play.

2.3.2. Triple Play sobre FTTH – GEPON

La tecnología GEPON al estructurarse en una arquitectura de red FTTH permite que los usuarios tengan una conexión de fibra directamente con la oficina del proveedor de servicios que no entrega solamente un servicio, sino que puede ofrecer servicios de voz, video y datos de manera integrada (servicios Triple Play) bajo el mismo soporte físico, ya sea hacia un lugar residencial o comercial. Los servicios son enviados en tres longitudes de onda diferentes (como se puede observar en la figura 2.12) y combinadas mediante un multiplexor WDM para ser transportadas sobre la arquitectura FTTH-GEPON y entregadas al usuario final [53] [73].



Figura 2.12. Distribución de espectro óptico para el servicio Triple Play. Modificado de [74].

A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de los servicios presentes en Triple Play teniendo en cuenta sus características más trascendentales.

2.3.2.1. Servicios de Datos

Los servicios de datos ofrecidos por las redes FTTH son servicios de banda ancha. Por lo tanto, se proporciona conexión a Internet con elevada velocidad, ofertando un conjunto de diferentes posibilidades, entre las importantes se encuentran, el servicio de entretenimiento digital, el cual engloba descargas de música y video a elevadas tasas de velocidad, servicio de juegos en línea, que requiere un elevado ancho de banda, debido a la cantidad de usuarios conectados simultáneamente, servicio de mensajería instantánea y *e-mails*, con gran contenido de información y servicios generales de monitorización y telecontrol [53]. En la tabla 2.4, se muestran los principales servicios de datos ofrecidos por redes FTTH con su respectivo ancho de banda simétrico.

Tabla 2.4. Servicios de Datos y Ancho de Banda necesario. Tomado de [2].

Servicio de Datos	Demanda de Ancho de Banda (Mbps)
Video bajo Demanda	15
Redes Privadas Virtuales	2
Videoconferencia	1
Navegación en Internet	1.5
Juegos en Línea	1
Dos conversaciones telefónicas de VoIP	0.190

2.3.2.2. Servicio de VoIP

El servicio VoIP o telefonía IP se basa en el transporte de voz encapsulado en paquetes IP. Para esto, la voz humana de carácter analógico se codifica, digitaliza y se ensambla

en paquetes para poder ser enviada por la red. La alta disponibilidad y bajo costo de equipos IP hacen de esta tecnología una alternativa atractiva para el transporte de voz con respecto al sistema tradicional PSTN. Entre las ventajas más importantes de este servicio están [75]:

- Los usuarios tienen un gran beneficio respecto al costo de llamadas ya que se evita el pago por interconexión.
- Para las compañías, la telefonía IP ofrece la posibilidad de integrarse con el servicio de datos y proporcionarse a través de la misma infraestructura de red. Por lo que, las tareas de instalación y gestión son más sencillas y más económicas.
- La telefonía IP va más allá de prestar servicio de voz tradicional y puede ofrecer servicios como son los centros de atención de llamadas, centralitas privadas, entre otros.

VoIP tiene diferentes infraestructuras entre las más importantes se encuentran, voz sobre IP a través de Internet y combinación de telefonía pública con voz sobre IP a través de Internet, las configuraciones de cada una se ilustran en la figura 2.13.

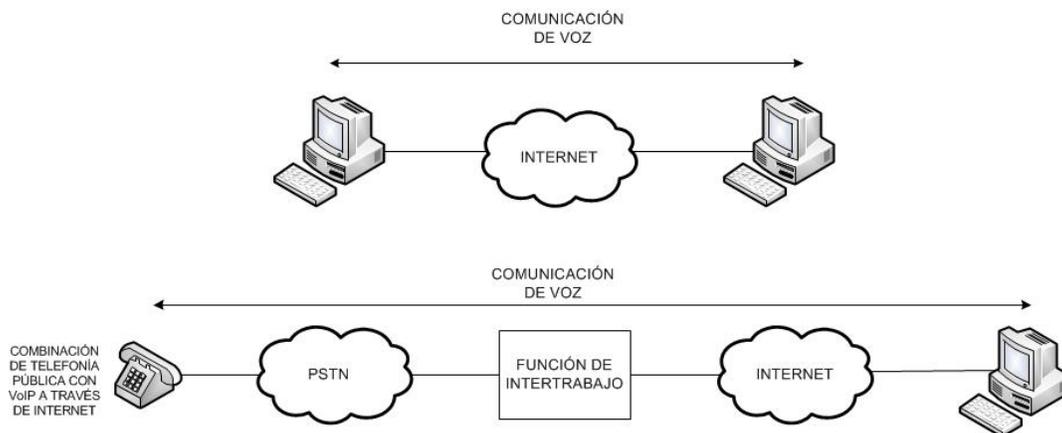


Figura 2.13. Configuraciones de VoIP. Modificada de [73].

Para realizar una óptima prestación del servicio VoIP se requiere un ancho de banda conforme a dos parámetros: el primero es el número de llamadas concurrentes, es decir, la cantidad máxima de llamadas simultáneas que se puedan efectuar y el segundo es el ancho de banda necesario en el canal para una conversación. El ancho de banda varía según el códec a utilizar, entre los más comerciales se encuentran: G.711, G.729 y G.729A.

Para los Códecs mencionados anteriormente, una llamada se segmenta en paquetes de 20 ms. Para conocer el ancho de banda del servicio, en primer lugar, se determina el tamaño de la carga útil de voz según el Códec a utilizar. Luego, se especifica el tamaño total del paquete que será transmitido por el canal y el número de paquetes que se transmiten por segundo, obteniendo finalmente el ancho de banda requerido por el servicio. En la tabla 2.5 se presentan los Códecs más comerciales con el respectivo ancho de banda.

Tabla 2.5. Ancho de banda del canal y de los Códecs. Tomado de [76].

Códec	Tamaño de carga útil de voz (bytes)	BW Códec (Kbps)	Tamaño del Paquete (bytes)	Paquetes por segundo	BW Servicio [Ethernet] (Kbps)
G.711	160	64	238	50	95.2
G.726	80	32	158	50	63.2
G.729A	20	8	98	50	39.2

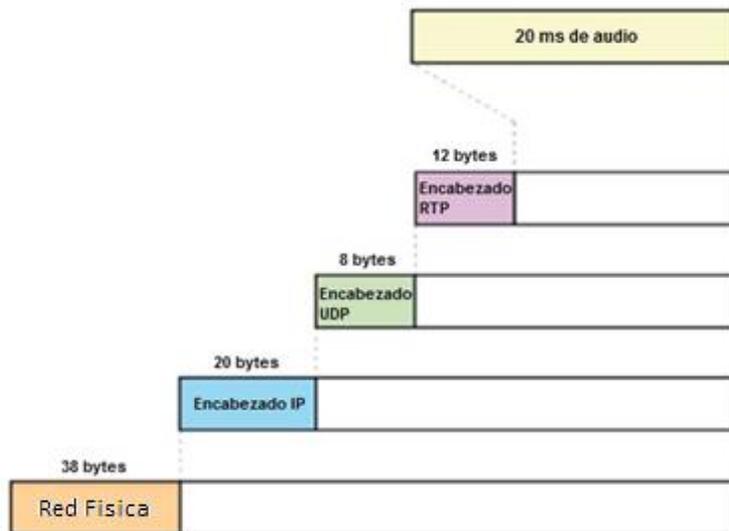


Figura 2.14. Cabeceras de cada protocolo que transportara los 20 [ms] de audio. Modificada de [76].

2.3.2.3. Servicio de Televisión

Los servicios de televisión están enfocados directamente a las unidades residenciales, por lo tanto, es una de las aplicaciones clave que justifica el despliegue de redes FTTH-GEPON. En este tipo de redes, la transmisión de video puede proporcionarse de dos maneras, como se muestra en la figura 2.15. La primera consiste en la transmisión de televisión por cable digital (CATV Digital) o televisión por cable analógico (CATV Analógico) en modo *Broadcast*, utilizando una longitud de onda dedicada (1550 nm), diferente a la de la transmisión de datos IP. La segunda consiste en la transmisión de IPTV. Para esta opción la misma longitud de onda (1490 nm) es utilizada para transmitir Internet, VoIP e IPTV en sentido *Downstream*, tal como se define en el estándar para GEPON [77]. La señal óptica para CATV y Ethernet son divididas en el ONT. La señal de CATV es convertida a una señal eléctrica que alimenta el sistema de cableado coaxial del hogar y proporciona el servicio de televisión, ya sea en modo analógico o modo digital.

IPTV	CATV Analógico	CATV Digital
IP/ Ethernet	Señal Broadcast	
1490 nm (Downstream) 1310 nm (Upstream)	1550 nm (Downstream)	
Fibra Óptica		

Figura 2.15. Tipos de transmisión de televisión en FTTH-GEPON. Por los autores.

El sistema conformado para proporcionar televisión *Broadcast* en la longitud de onda de 1550 nm para redes FTTH se denomina sistema de Multiplexado de Subportadora (SCM, *Subcarrier Multiplexing*) que consiste en modular una portadora cuya frecuencia se encuentra en el rango del espectro utilizado para la televisión, la cual puede estar modulada en amplitud, en frecuencia o en fase, utilizando técnicas digitales, como la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*), o técnicas analógicas, como la Modulación de Amplitud con Banda Lateral Vestigial (AM-VSB, *Amplitud Modulation Vestigial Side Band*) [78].

En la figura 2.16 se puede observar la configuración de una red óptica pasiva con la prestación de este servicio de televisión, integrado con el servicio de datos.

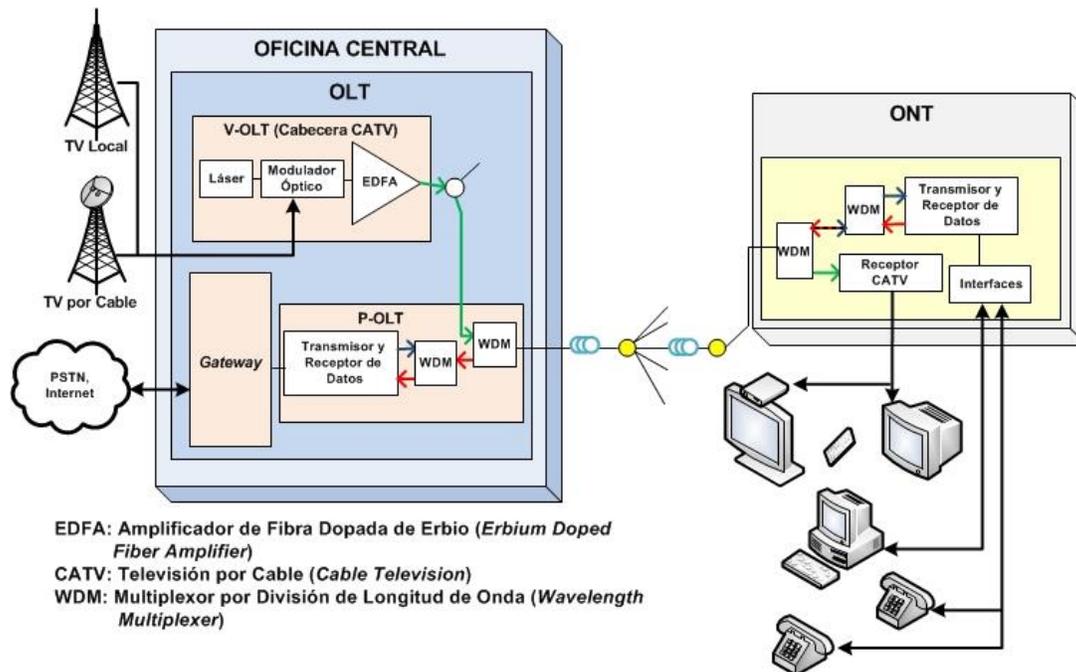


Figura 2.16. Red PON con soporte de servicios de televisión. Tomado de [79].

➤ Televisión Analógica (CATV Analógico)

La transmisión de CATV analógica se ejecuta mediante una fuente láser con una longitud de onda dedicada de 1550 nm, a este proceso se le conoce como *video overlay* o *video*

“superpuesta”. Video overlay ofrece compatibilidad directa con la distribución de TV existente ya que la terminación de la etapa residencial se realiza mediante un enlace coaxial. En este modo de transmisión de televisión, la señal de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) de la cabecera de televisión no se envía de manera digital, sino que se transmite de forma analógica a través de la red óptica, “superpuesta” a la transmisión de datos (como se muestra en la figura 2.17), utilizando otra longitud de onda. Dicha señal RF se obtiene de una cabecera de televisión y contiene todos los canales de televisión, según el plan de frecuencias sobre el cual se base la transmisión de video, teniendo en cuenta la existencia de tres especificaciones para tal objetivo, estos son el del Comité Nacional de Sistema de Televisión (NTSC, *National Television Standards Committee*) usado en EE.UU, Canadá y Japón, el de Color Secuencial con Memoria (SECAM, *Séquential Couleur á Mémoire*) utilizado en Francia y otros países europeos, y el de Línea de Fase Alternada (PAL, *Phase Alternating Line*) usado en el resto de países del mundo [80] [81].

Una característica de la operación con este servicio de televisión es que puede ser necesaria la utilización de Amplificadores de Fibra Dopada de Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) en la cabecera del proveedor de servicios ya que el hecho de modular el espectro RF y transmitirlo de manera analógica por la fibra hace que las sensibilidades en recepción sean bajas, obligando al emisor a transmitir a alta potencia [79] [82].

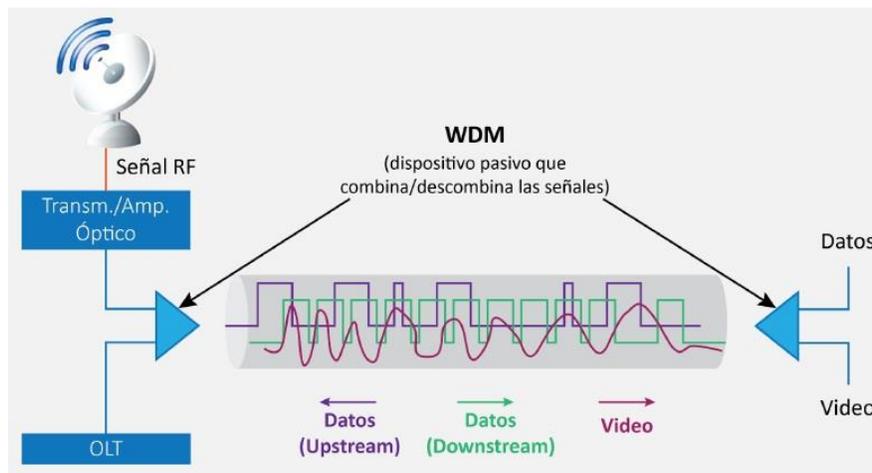


Figura 2.17. Señal RF overlay superpuesta con la señal de datos. Tomada de [81].

Estos sistemas también se conocen como SCM analógicos, en el que redes CATV distribuyen los canales de televisión empleando técnicas de modulación como AM-VSB. Las subportadoras son moduladas en cualquiera de los formatos y combinadas para componer una señal que modula directamente la intensidad de un láser. Durante la transmisión, estos sistemas presentan distorsiones en la señal transmitida. La principal fuente de distorsión es la Distorsión por Intermodulación (IMD, *Intermodulation Distorsion*) la cual puede ser provocada por la dispersión de la fibra, el *chirp* frecuencial, en la que aparecen nuevas frecuencias o productos de intermodulación de la forma $F_i + F_j$ (IMD de segundo orden) y $F_i + F_j \pm F_k$ (IMD de tercer orden), los cuales se denominan “batidos de

frecuencia” o “beats de frecuencia”¹¹ y algunos de ellos caen dentro del ancho de banda de transmisión distorsionando la señal enviada. En un sistema SCM con N canales se generan $N(N-1)(N-2)/2$ batidos triples y $N(N-1)$ batidos dobles. Estas distorsiones son caracterizadas por dos parámetros: Composición de Segundo Orden (CSO, *Composite Second Order*) y la Composición de Triple Batido (CTB, *Composite Triple Beat*). Estos parámetros se definen como el cociente entre la potencia del producto de intermodulación de segundo o de tercer orden y la potencia de la portadora, respectivamente. La unidad de medida que caracteriza a estos parámetros es el *dBc*, donde “c” indica que se normaliza la potencia de los términos de distorsión con la potencia de la subportadora [83] [84]. Además del CSO y el CTB, el desempeño en estos sistemas depende de la Relación Portadora a Ruido (CNR, *Carrier to Noise Ratio*) y se define como la relación entre la potencia RMS de la portadora y la potencia RMS del ruido en el receptor. En el caso de emplear modulación AM-VSB, la CNR debe superar los 50 dB, para lo cual la potencia óptica recibida debe estar por encima de 0.1 mW. En el caso de sistemas con modulación de frecuencia, el valor de la CNR necesaria para un buen desempeño es menor que la anterior, alrededor de 16 dB [83] [84]. En el lado del usuario, los ONT con interfaces RF CATV, se encargan de extraer, por un lado la señal de datos IP y por otro, la señal RF, permitiendo a los suscriptores conectar directamente mediante un cable coaxial su televisor convencional sin ningún equipo intermedio.

➤ Televisión Digital

El ancho de banda utilizado para la transmisión de la televisión analógica es desaprovechado debido a que las señales de vídeo varían muy poco al pasar de un elemento de imagen o sonido a los contiguos. Por lo tanto, para tener un mejor aprovechamiento del ancho de banda se realiza el proceso de digitalización de los parámetros de imagen y sonido. Este proceso permite que las señales de televisión que tienen más información de la que el ojo humano requiere para percibir correctamente una imagen o un sonido, sea reducida por técnicas de compresión digital hasta unos niveles apropiados para su transporte con calidad y economía de recursos. Las anteriores ventajas de la televisión digital sobre la analógica la han convertido en la tecnología empleada por los operadores para la transmisión de contenidos de televisión con gran calidad de vídeo y audio. El contenido que es transmitido por televisión digital al usuario puede ser capturado en vivo por una cámara o proveniente de un servidor de vídeo. El método de despliegue del contenido permite diferenciar dos modelos básicos de televisión digital [75]:

- *El modelo unidireccional:* Este modelo se define cuando el contenido es multiplexado y enviado simultáneamente sobre un medio de transmisión a todos los receptores.
- *El modelo bidireccional:* El contenido se transmite individualmente en paquetes IP a los suscriptores que lo han solicitado previamente. Este modelo, se transmite mediante los protocolos de Internet, permitiendo ser más flexible en la utilización de nuevas aplicaciones interactivas.

Para la transmisión de televisión digital, se utiliza ampliamente la familia de estándares del Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento (MPEG, *Moving Pictures Experts*

¹¹ En este contexto, el término “batido” o “beat” puede interpretarse como una componente de distorsión causada por la mezcla de diferentes frecuencias en un mismo instante de tiempo.

Group) de la Organización Internacional de Estándares (ISO, *International Standards Organization*), los cuales definen técnicas de compresión para reducir la cantidad de *bits* necesarios para digitalizar una señal de video. Es el grupo más destacado y aceptado por la industria en lo que respecta a la estandarización de video digital donde detallan la codificación y decodificación del contenido multimedia y cuya familia de estándares son los más utilizados. Hoy en día los códecs con gran trascendencia son MPEG-2, MPEG-4 y H.200 de la serie ITU [73] [85] [86].

❖ MPEG-2 [60] [87][88]

Posterior al éxito que se obtuvo con el estándar MPEG-1 (1993), el grupo decidió obtener un estándar más completo y mejorado. Hacia 1995 se desarrolla MPEG-2 que presenta mejoras en la compresión respecto a su antecesor, codificación entrelazada y gran flexibilidad debido a la utilización de perfiles y niveles¹². Además, el MPEG-2 estandariza tanto el video como el audio que lo acompaña.

Este estándar se encuentra definido en la ISO/IEC 13818 la cual está dividida en partes, cada una de las cuales se considera un estándar. En este orden de ideas, se puede decir que MPEG-2 es un conjunto de estándares. Las partes que conforman el MPEG-2 son:

- ISO/IEC 13818-1 Sistemas MPEG-2 (Rec. H.222) cómo sincronizar y conjuntar los flujos de video y audio en un solo flujo de datos.
- ISO/IEC 13818-2 Video MPEG-2 (ITU-T Rec.H262) para señales entrelazadas y progresivas.
- ISO/IEC 13818-3 Audio MPEG-2 que es una extensión del MPEG-1 audio capacitado para sonido multicanal.

La parte de H.262 opera con codificación de video de alta calidad con posible video entrelazado de NTSC, PAL o Televisión de Alta Definición. Posee un amplio rango de aplicaciones, velocidades, resolución, calidad de las señales y servicios, además incluye todas las formas de medios de almacenamiento digital, televisión *broadcasting*, comunicaciones y es capaz de codificar televisión de definición estándar (SDTV, *Standard Definition Television*) a tasas de datos que van desde 3 Mbps hasta 5 Mbps y HDTV desde 15 Mbps hasta aproximadamente 30 Mbps.

❖ MPEG-4 [60] [88].

MPEG-4 hereda las características de su antecesor y adiciona el empaquetamiento y transporte del contenido multimedia sobre redes IP. Además, se caracteriza por tener un alto grado de versatilidad y complejidad que las primeras dos versiones de MPEG debido a su operación basada en algoritmos numerosos y variados para llevar a cabo la compresión de video, audio e imagen. Además, incluye una sofisticada ingeniería de aplicación y descripción de escena para contenido interactivo en 2D y 3D.

De manera similar a MPEG-2, se compone de varias partes. Entre las más importantes cabe resaltar:

¹² Los perfiles y niveles definen la variación de la resolución y la calidad de video.

- Parte 6, en la que se define un Marco de Integración de Entrega Multimedia (DMIF, *Delivery Multimedia Integration Framework*), con la capacidad de operar sesiones para multiplicidad de protocolos de transporte.
- Parte 8, en la que especifica un método para transporte de contenido MPEG-4 sobre redes IP.
- Parte 8 y Parte 10, las cuales son de suma importancia que especifica un método para transportar MPEG-4 sobre redes IP y H.264, respectivamente.

En la actualidad los métodos de mayor impacto comercial para la transmisión de televisión digital son: el estándar europeo de Difusión de Video Digital (DVB, *Digital Video Broadcasting*) y el estándar americano del Comité de Sistemas de Televisión Avanzado (ATSC, *Advanced Television Systems Committee*) para la transmisión de televisión por cable digital o CATV Digital y la transmisión de televisión sobre el Protocolo de Internet o IPTV. Estos estándares vienen a reemplazar las normas de televisión analógica PAL y NTSC. En resumen, para entregar el servicio de televisión digital sobre FTTH existen dos maneras, CATV Digital (definido por el estándar ATSC y DVB) e IPTV, los cuales se tratan a continuación.

- **CATV Digital**

Para CATV digital, los estándares ATSC y DVB permiten tipos de servicios muy similares (múltiples programas o vistas de programa, programas de alta definición, interactividad, etc.). Los principales contrastes entre estos estándares, se encuentran en las características intrínsecas a la transmisión terrestre de la señal, como son: el método de modulación de portadoras, robustez de la recepción y la eficiencia en el uso del ancho de banda del canal de transmisión.

- ❖ Estándar ATSC

El estándar ATSC de televisión por cable digital fue desarrollado por el Comité de Sistemas Avanzados de Televisión en los Estados Unidos. El estándar ATSC describe un sistema para transmisión de video, audio y datos que transporta datos a una velocidad de transferencia fija de 19,4 Mbps a través de un canal convencional de 6 MHz. Aunque el sistema fue desarrollado y probado para canales de 6 MHz, se puede elegir entre canales con un ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz. El sistema se desplegó para difusión terrestre y para distribución por cable. El modelo de operación por cable utiliza la modulación 16-VSB o modulación de banda vestigial de nivel 16 y el modelo de operación por difusión terrestre utiliza la modulación 8-VSB o modulación de banda vestigial de nivel 8 la cual es más inmune a interferencias con el sistema NTSC de televisión analógica [89].

El estándar ATSC utiliza formato MPEG para la compresión y codificación de video, y el estándar AC-3 para la compresión y codificación del audio. El flujo de bits está constituido por paquetes multiplexados de flujo de bits de video, audio, datos y la información de señalización [89].

El sistema ATSC es eficiente y capaz de operar bajo varias circunstancias, como por ejemplo se diseñó para resistir varios tipos de interferencia: sistemas existentes de televisión analógica NTSC, ruido blanco, ruido de fase y reflexiones continuas por

multitrayectorias. El sistema también fue diseñado para ofrecer eficiencia en el uso del espectro y facilidad en la planificación de frecuencias [89].

❖ Estándar DVB

El estándar DVB define especificaciones para distribución de CATV digital por diversos medios, incluyendo Difusión de Video Digital por Satélite (DVB-S, *Digital Video Broadcasting by Satellite*), Difusión de Video Digital por Cable (DVB-C, *Digital Video Broadcasting by Cable*), Difusión de Video Digital Terrestre (DVB-T, *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), Difusión de Video Digital por Microondas Satelitales (DVB-MS, *Digital Video Broadcasting - Microwave Satellite*) y Difusión de Video Digital por Microondas sobre Cable (DVB-MC, *Digital Video Broadcasting - Microwave Cable-based*). Los estándares DVB establecen aspectos como:

- ✓ Provisión de servicios interactivos mediante canales de retorno sobre varios medios y protocolos.
- ✓ Acceso condicional a contenidos pagados y protección de copia.
- ✓ Formato e interfaz para transferir señales DVB hacia las localidades de distribución mediante de redes de datos tradicionales.
- ✓ En todos los casos, el estándar de video digital utilizado es el MPEG-2 definido en la ISO/IEC 13818-1.

DVB utiliza la técnica de modulación digital multinivel QAM que generalmente puede ser 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, 128 QAM o 256 QAM, siendo una de las técnicas digitales de modulación más empleadas en sistemas SCM digitales, la cual combina la modulación en amplitud y en fase. Aprovecha el hecho de que se pueden transmitir dos señales de manera simultánea sobre la misma portadora si están en cuadratura, es decir, desfasadas 90°. Es multinivel, ya que emplea M amplitudes distintas de tal manera que $M=2^m$, luego cada símbolo representa una cadena de “m” bits. [80] [90].

En la tabla 2.6 se muestran ejemplos de las tasas de bits posibles de acuerdo a la modulación QAM empleada.

**Tabla 2.6. Tasa de bits MPEG-2 según el esquema de modulación para DVB.
Tomada de [90].**

Tasa de bits para MPEG-2 (Mbps)	Esquema de modulación
38	64-QAM
32	32-QAM
25	16-QAM

Para los dispositivos de televisión convencionales con tecnología analógica, DVB exige la existencia de un *set-top box* (STB) en la residencia del usuario para decodificar los canales digitales enviados en formato MPEG. Una ventaja de este sistema es que usa el mismo cableado que el utilizado en televisión analógica y su instalación es sencilla, comprende únicamente la conexión entre el puerto del ONT destinado para este servicio y el STB mediante cable coaxial.

- **Televisión sobre Protocolo de Internet**

En un sistema FTTH-GEPON, los servicios de Internet y telefonía, componentes del Triple Play, son servicios digitales que utilizan una red Ethernet. El servicio de Televisión sobre Protocolo de Internet o IPTV utiliza esta misma red Ethernet para entregar servicios de televisión en la premisa del usuario, además, utiliza compresión MPEG y la información digital resultante es encapsulada en paquetes IP y transmitida sobre una conexión Ethernet tal como se hace con telefonía IP e Internet [80].

Por otra parte, el concepto IPTV se presenta para solucionar los problemas de transmisión asociados al video *overlay*, transmitiendo las señales de video conjuntamente con las señales de datos sobre la misma longitud de onda, como se mencionó anteriormente.

El servicio de televisión IPTV está definido, según [91] como el conjunto de servicios multimedia (televisión, video, audio, texto, gráficos y datos) transmitidos por medio de redes basadas en IP, con las cuales se provee los niveles necesarios de calidad de servicio y experiencia, seguridad, interactividad y fiabilidad. En la tabla 2.7, se muestran los códecs utilizados para prestar el servicio IPTV y su tasa de bits por usuario, según la calidad de video.

Tabla 2.7. Formatos de compresión y su tasa de bits (Mínima y Máxima). Tomado de [60]

Códec	Formato	Tasa de bits mínima (Mbps)	Tasa de bits máxima (Mbps)
MPEG-2	SDTV	3	5
	HDTV	15	30
MPEG-4	SDTV	1.5	2.5
	HDTV	8	12

La infraestructura de red de IPTV está constituida por cuatro elementos principales, a saber, el proveedor de servicios IPTV, la red de acceso banda ancha, dispositivo IPTV del consumidor (IPTVCD, *IPTV Consumer Device*) y la red residencial [92]. En la figura 2.18 se puede visualizar la configuración de la red IPTV.

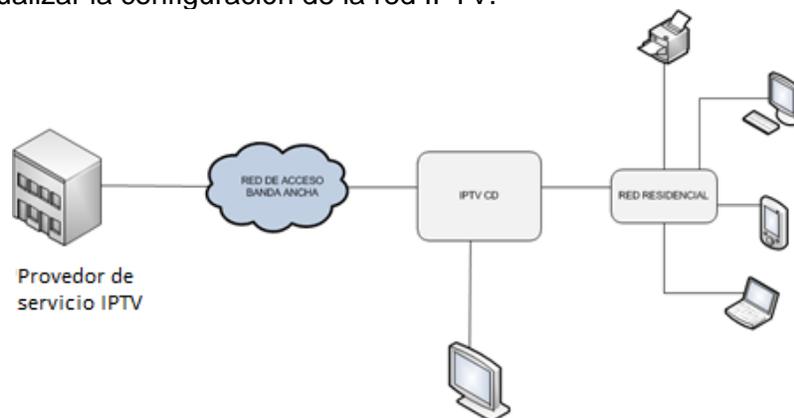


Figura 2.18. Infraestructura del servicio IPTV. Modificado de [92].

A continuación se describen los componentes del sistema de Televisión sobre Protocolo de Internet [92].

- Proveedor de servicio IPTV: Es el encargado de recibir el contenido multimedia proveniente de diferentes fuentes. Está conformado por codificadores, servidores de video, *router* IP y hardware de seguridad, los cuales en conjunto preparan el contenido multimedia para entregarlo por medio de una red IPTV.
- Red de acceso banda ancha *Broadband*: Permite distribuir los servicios mediante conexiones *one to one*. El número de conexiones *one to one* se limita por el ancho de banda que dispone el medio.
- Dispositivo IPTV del consumidor o IPTVCD: Es la interfaz, entre la red de reparto y la red residencial, encargada de decodificar y procesar el contenido para que los usuarios tengan acceso a los servicios IPTV. Los componentes más populares de tipo IPTVCD se encuentran: *Gateway* Residencial, Consolas de juego, decodificador, entre otros.
- Red Residencial: Su propósito es proveer acceso a la información a todos los dispositivos digitales disponibles en el hogar.

Entre las aplicaciones y servicios de IPTV, los que se destacan son [53]:

- El servicio VoD, le permite al usuario tener un acceso a contenidos multimedia de forma personalizada. El usuario puede elegir en cualquier momento el contenido que desea ver, sin depender de un horario fijo de programación.
- El servicio PPV, Servicio de Pago por ver o por evento, es una modalidad de televisión de pago, en la que el abonado paga por los eventos individuales que desea ver.

Muchas veces se utiliza indistintamente los conceptos de IPTV con video por Internet o Televisión por Internet, sin tener en cuenta que son dos términos completamente diferentes. El video por Internet es un servicio de *streaming*¹³ administrado mediante la red pública de Internet caracterizado por ser un servicio basado en el “mejor esfuerzo”, es decir, sin garantía de una calidad de servicio determinada. Por su parte, IPTV es una tecnología que emplea una red IP que garantiza la calidad de servicio para cada flujo de información de video y que constituye una tecnología de televisión interactiva que puede igualar o mejorar la calidad de la distribución de señales digitales de video implementadas actualmente. Además, todas las opciones de televisión digital, incluyendo IPTV tienen asociado un dispositivo hardware sintonizador o *Set Top Box* que convierte la señal de video digital MPEG a una señal de video compuesta denominada CVBS¹⁴ que el televisor tradicional es capaz de procesar, mientras que la televisión por Internet tiene asociado

¹³ El término *Streaming* hace referencia a la transmisión de audio o video remotamente a través de una red de Internet en tiempo real sin la necesidad de descargar el archivo completo, por ejemplo, cuando se transmite un canal de televisión en vivo por Internet [93].

¹⁴ Las siglas CVBS hacen referencia a los vocablos en inglés *Color, Video, Blanking and Sync* que significa Color, Video, Borrado y Sincronismo.

como componente principal a un software reproductor multimedia, como Windows Media Player, Flash, VLC Player, entre otros. El atractivo principal de IPTV, además de TV Lineal¹⁵ como opción de contenido, radica en la oferta personalizada e interactiva, por lo que los proveedores de servicios eligen IPTV para una amplia oferta de servicios [87].

El servicio IPTV con relación al servicio tradicional de TV, presenta una diferencia considerable, en cuanto al beneficio que genera al usuario y al proveedor. Desde la perspectiva del usuario, IPTV brinda nuevas características tales como, soporte interactivo, grabación y almacenamiento de contenido multimedia y personalización de la TV. Desde la visión del operador de servicio, IPTV es la solución más atractiva porque se limita a transmitir el contenido que el usuario este solicitando [73].

A manera de resumen y con el fin de ilustrar los servicios que la red FTTH-GEPON proporciona, en la figura 2.19 se representa una conexión típica en la residencia del usuario.

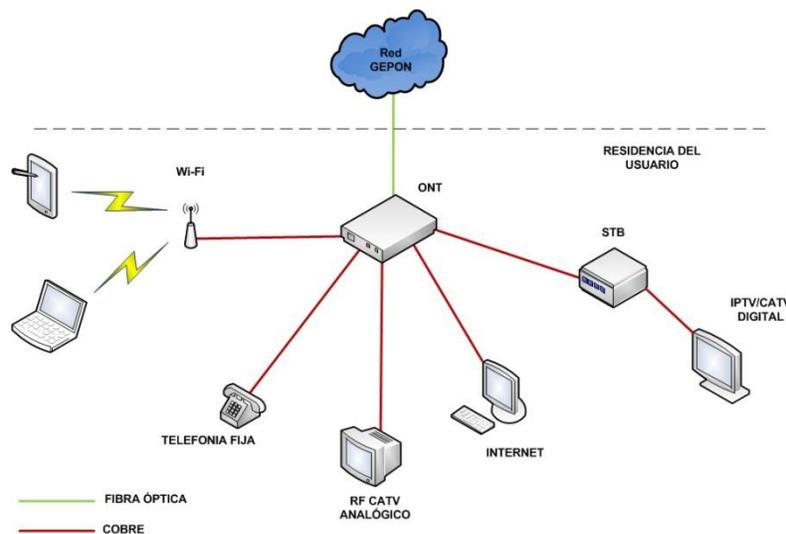


Figura 2.19. Conexiones en la residencia del usuario. Adaptada de [94]

En el presente capítulo se han considerado los aspectos más relevantes en cuanto al marco conceptual y teórico que se enmarca en torno a las redes FTTH-GEPON así como los aspectos que otorgan a estas redes un nivel de atracción por parte de los operadores y de los usuarios finales como lo es el soporte de convergencia de servicios reflejándose en la prestación de servicios de video, datos y voz de manera integrada, mejor conocidos como servicios Triple Play. En el siguiente capítulo se hace énfasis en las topologías de red mediante las cuales se puede llevar a cabo la implementación de redes FTTH-GEPON teniendo en cuenta sus características más importantes; además, con base en los conceptos consolidados en el presente capítulo sobre los servicios soportados por estas redes, en el siguiente capítulo se estudian los parámetros que permiten evaluar el desempeño de dichos servicios en este tipo de redes, siendo una parte importante para la construcción de modelos de simulación que se lleva a cabo en el capítulo cuatro.

¹⁵ La televisión lineal es la forma tradicional de ver la televisión, aquella que se ve sin la posibilidad de controlar nada diferente al canal y al volumen [95]

CAPÍTULO 3. TOPOLOGÍAS Y PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN GEPON

En este capítulo se exponen las características más importantes que determinan a una topología física de una red FTTH-GEPON. Además, se describe cada una de las topologías que fueron estudiadas en el presente trabajo de grado, estas son, topología en árbol, anillo y bus de una red FTTH-GEPON. Por otra parte, se hace un estudio de los parámetros que se deben considerar en este tipo de redes para evaluar el desempeño de los servicios Triple Play mencionados en el capítulo dos. En primer lugar, se da al lector las definiciones básicas sobre una topología física de red y sobre las características principales de las topologías físicas de una red FTTH-GEPON como lo son la cobertura, la escalabilidad, la resistencia de la red y la dificultad de implementación. En segundo lugar, se realiza una descripción detallada de las topologías mencionadas anteriormente. Finalmente, se hace un estudio detallado de los parámetros de desempeño que deben ser evaluados en este tipo de redes para analizar el desempeño de los servicios proporcionados por la red.

3.1. TOPOLOGÍA FÍSICA DE UNA RED

La topología física describe la manera en la que se puede configurar, disponer u organizar la estructura física de la red, representando la forma en la que los componentes de la red se interconectan físicamente. La elección de una topología depende en gran parte, de la condición o distribución geográfica que especifica el emplazamiento de los usuarios finales. De esta manera, las características propias de cada topología de red pueden afectar el desempeño de la señal óptica que viaja a través de la red [96] [97] [98] [99].

3.1.1. Características de la Topología Física de una Red FTTH-GEPON

Para una FTTH-GEPON se tienen las siguientes características principales:

- **Cobertura**

La cobertura de red define la distancia entre el OLT y el ONT de cada usuario. Para una red GEPON, esta característica tiene un valor que varía de 10 a 20 Km. Esta característica es un factor que puede determinar el desempeño de la señal que se proporciona al usuario, ya que a mayores distancias el nivel de atenuación acumulado por los dispositivos que componen la red es mayor, teniendo consecuencias en la calidad de la señal que viaja a través de ella, en otras palabras, el nivel de señal que recibe el usuario depende de la distancia del enlace. Por lo tanto, esta característica define la distancia que puede alcanzar la red para que se proporcione al receptor una calidad de señal considerable. De esta manera, la cobertura depende fuertemente de la topología de la red y de la distribución de los componentes ópticos, que pueden producir efectos como atenuación¹⁶ y baja sensibilidad en los receptores [97] [100] [101] [102] [103].

¹⁶ La atenuación de la señal óptica hace referencia a la disminución de la energía luminosa o potencia de transmisión en la propagación a través de la red. Las pérdidas causadas por la atenuación producen efectos no deseados como la reducción del ancho de banda, velocidad de transmisión, eficiencia, capacidad del sistema y limita la distancia total del enlace de la red [106].

- **Escalabilidad**

La escalabilidad hace referencia a la capacidad de la red para aumentar su tamaño, es decir, que sea capaz de soportar el aumento de nodos ONT sin que se produzcan cambios trascendentales en su infraestructura que alteren su funcionamiento y sin que se afecte el desempeño de los servicios proporcionados, de tal manera que se cumpla con los parámetros de desempeño establecidos. Es decir, una red GEPON escalable tendrá la capacidad de ser reconfigurada añadiendo más terminales de usuarios cuando el proveedor de servicios aumente sus suscriptores. La topología hace que la cantidad de ONT que la red GEPON puede soportar dependa de ella, teniendo en cuenta que el adicionar más nodos ONT puede causar efectos en el desempeño si se requiere la adición de otros dispositivos pasivos adicionales, según sea la infraestructura de la topología. De esta manera, la escalabilidad está relacionada con la topología física de la red [103] [104].

- **Network Survivability**

La resistencia de la red o *network survivability* hace referencia a la capacidad de la red para “sobrevivir” a un posible fallo en algún punto del enlace de fibra óptica. Estos daños a menudo son causados por factores externos que provocan el corte del cableado, por ejemplo, catástrofes naturales, ataques terroristas o en el caso en donde la fibra óptica comparte conductos con otros cables destinados a una utilidad diferente y es manipulada en conjunto con dichos cables sin el cuidado necesario. Esta característica guarda estrecha relación con la confiabilidad o *reliability* de la red, puesto que una red será más confiable si es capaz de seguir funcionando ante un fallo en algún punto del enlace de fibra óptica que compone la red [103] [105].

Por su parte, cada topología dependiendo de su configuración, puede ser capaz de soportar fallos en ciertos puntos de la red, afectando el funcionamiento de la misma. En [105] [107] se proponen mecanismos para mejorar esta característica en este tipo de redes a nivel de infraestructura, por ejemplo redundancia de equipos, de enlaces de fibra, utilización de conmutadores ópticos, y de esta manera aumentar la protección de la red. Sin embargo, el propósito de este trabajo de grado no es implementar ni evaluar el desempeño de estrategias o mecanismos de protección.

- **Dificultad de Implementación**

Esta característica tiene relación con la escalabilidad, si se desea incorporar más nodos ONT a la red con una topología determinada y se tiene que afectar la integridad de su configuración, es decir, abrir algún punto de la red inhabilitándola, será una topología con una mayor dificultad para implementarse. Además, el uso de dispositivos ópticos pasivos diferentes y de mayor complejidad que los *splitters* comúnmente utilizados en redes ópticas pasivas, añade dificultad para que una topología sea implementada [103].

3.1.2. Topologías Físicas en GEPON

Las redes GEPON pueden configurarse en múltiples topologías físicas punto a multipunto utilizando *splitters* ópticos con relación $1: N$, las más utilizadas y comunes encontradas en

la literatura son árbol, anillo y bus [66] [108]. A continuación se describe cada una de ellas.

3.1.2.1. Topología de Red en Árbol

La topología en árbol es la configuración comúnmente utilizada en redes de acceso GEPON. Su configuración consiste en la conexión del OLT, mediante un solo tramo de fibra óptica, a un punto intermedio de la red compuesto por un *splitter*, denominado punto de *splitting* o de división, desde el cual se desprenden otros tramos de fibra para conectar cada ONT con la red y distribuir los servicios proporcionados por el proveedor, es decir, cada ONT tiene una fibra óptica dedicada y comparte el enlace troncal de fibra hacia el OLT con otras ONT. La principal ventaja de esta topología está en la facilidad con la que se puede modificar la red si se requiere aumentar la cantidad de ONT. Sin embargo, en términos de confiabilidad esta topología presenta una desventaja en el sentido de que un rompimiento en el enlace troncal de fibra o un fallo en el divisor óptico resultarían en la caída de todo el sistema [99] [109] [110] [111]. La figura 3.1 muestra la topología de red en árbol.

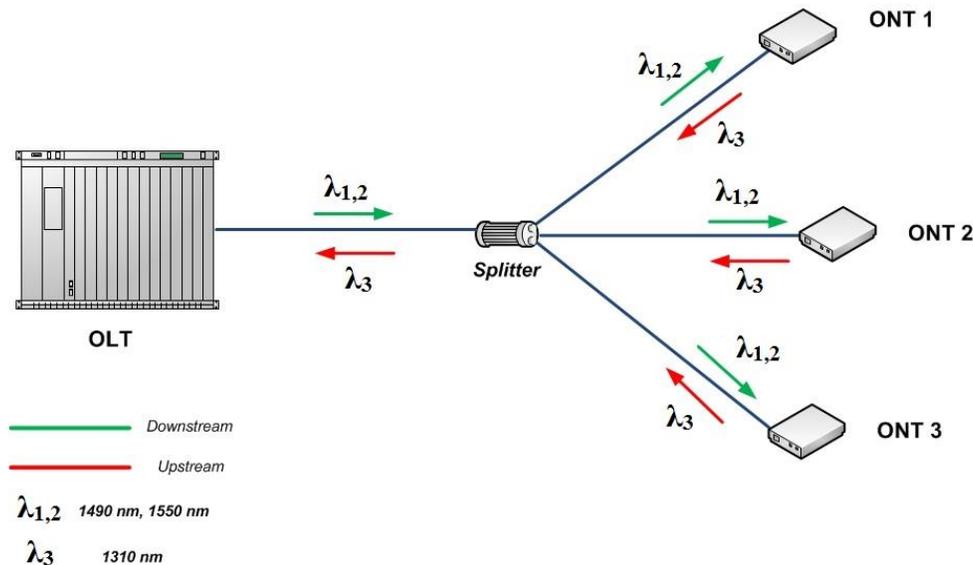


Figura 3.1. Topología de red en Árbol. Adaptada de [108].

3.1.2.2. Topología de Red en Bus

En esta topología, el OLT está conectado a los ONT mediante un enlace común, compartido por todos los nodos de la red como se muestra en la figura 3.2. Cada ONT se puede conectar mediante un *splitter* de relación 1:2, que extrae parte de la potencia enviada desde el OLT. Una de las ventajas de esta topología es que posee flexibilidad respecto a la implementación de nuevos ONT, permitiendo que estos se puedan conectar a la red mediante la adición de más *splitters* [111]. Sin embargo, la cantidad de *splitters* y de tramos de fibra óptica es un factor que determina la calidad de la señal principalmente en los ONT ubicados en la última posición de la red, ya que se verá afectada por la atenuación provocada por todos los *splitters* y por los tramos de fibra óptica que atraviese. En otras palabras, por necesitar más cantidad de elementos, entre tramos de fibra óptica

y *splitters*, la calidad de la señal de los ONT más alejados presentara una mayor afectación. Por esta razón, la cantidad de nodos ONT que pueden ser conectados a la red es limitada [112].

Lo anterior, supone un efecto en la cobertura de esta topología, ya que el alcance que pueda tener depende de los ONT más alejados de la central. Es evidente que la desventaja de esta topología es la confiabilidad de red; la ruptura del enlace de fibra óptica entre *splitters* causa la caída de la comunicación con los usuarios situados en el tramo consecutivo a la ruptura [99] [111] [113].

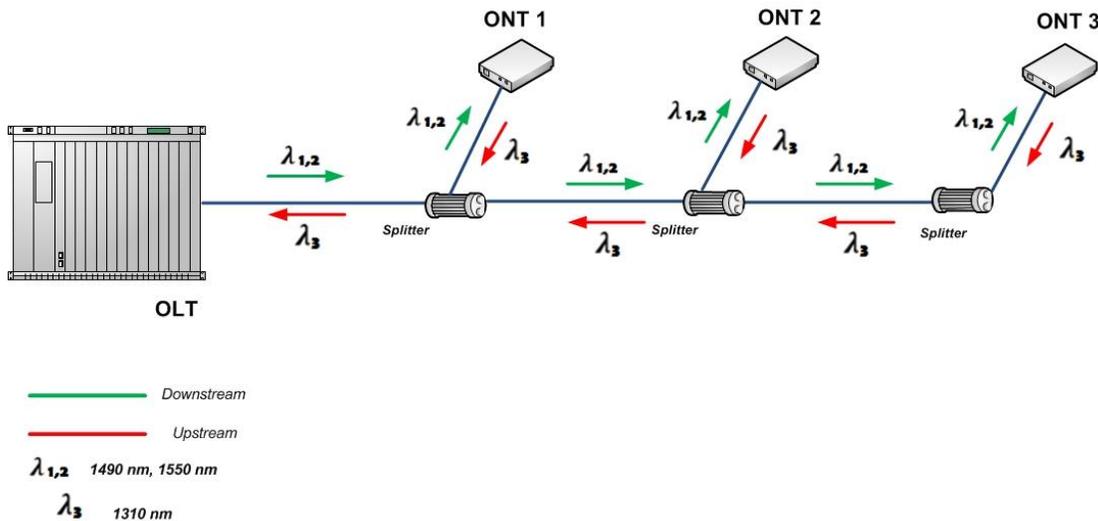


Figura 3.2. Topología de red en Bus. Adaptada de [108] [112].

3.1.2.3. Topología de Red en Anillo

Esta topología de red consiste en un enlace común de fibra óptica formando un lazo cerrado que es compartido por todos los ONT. La señal óptica que envía el OLT viaja en una sola dirección (en el sentido de las manecillas del reloj) y pasa por todos los ONT de la red hasta llegar al ONT destino.

En [110] [114] se plantea una topología de red de acceso en anillo¹⁷ en la que, básicamente, su configuración consiste en la conexión del OLT con los ONT mediante un enlace troncal o *feeder* de fibra óptica, un circulador óptico pasivo de tres puertos y un anillo de acceso de fibra óptica, como se muestra en la figura 3.3. Los enlaces de fibra dentro del anillo son unidireccionales, esto es, la señal *Downstream* y *Upstream* (señal combinada) son transmitidas en una sola dirección. Cada ONT se conecta al anillo de acceso mediante un *splitter* que puede tener una relación 1:2, que le permite recibir la información proporcionada por el OLT.

¹⁷ Es preciso mencionar, que esta topología ha sido tomada como referencia en estudios actuales relacionados con redes de acceso, como se evidencia en [120], por lo que la configuración propuesta para esta topología aún se encuentra vigente y fue tomada como base para el desarrollo del trabajo de grado.

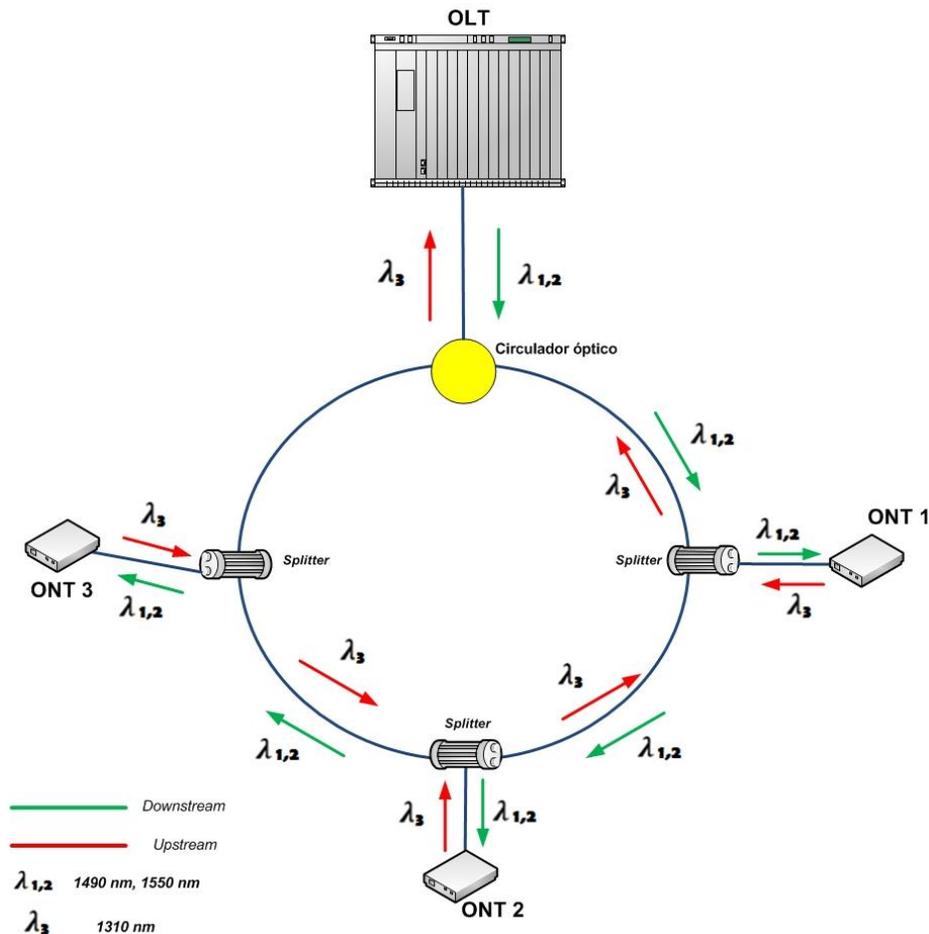


Figura 3.3. Topología de red en Anillo. Adaptada de [108] [114].

Por otra parte, se han propuesto nuevas alternativas en cuanto a la configuración de la topología de red PON en anillo como se aprecia en [98] [115] [116] [117] [118] [119], cuyos estudios se enfocan principalmente en proponer mecanismos de protección en la red partiendo de dicha topología, lo que la ha convertido en una oportunidad atractiva en el campo investigativo para innovar en mecanismos que proporcionen una mayor confiabilidad en la red. Sin embargo, en cualquiera de las configuraciones propuestas para esta topología, el uso de una cantidad considerable de tramos de fibra óptica, *splitters* y de otros dispositivos ópticos es un factor que influye en el desempeño de la señal óptica que viaja a través de la red. Además, una desventaja en esta topología es que, cuando la red necesita disponer de más nodos, generalmente el funcionamiento queda interrumpido y un fallo en la línea provoca la caída de la red. No obstante, si se presentaran fallos en los ONT, estos no influyen en la integridad del anillo.

Como se planteó en el anteproyecto del presente trabajo de grado, únicamente se evaluó y analizó el desempeño en sentido *Downstream*, es decir, desde el OLT hasta los ONT. En la siguiente sección se exponen los parámetros que permitieron evaluar el desempeño de los servicios Triple Play proporcionados por una red FTTH-GEPON.

3.2. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO PARA SERVICIOS TRIPLE-PLAY EN REDES FTTH-GEPON

3.2.1. Parámetros de desempeño óptico

Tomando como referencia los parámetros de desempeño del enfoque de monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*), el cual se profundiza en el anexo A, y la literatura consultada, los parámetros que permiten evaluar el desempeño en una red GEPON con arquitectura FTTH son los considerados en la capa de calidad de la señal, estos son: diagrama del ojo, Tasa de Error de Bit, Factor Q y *Jitter*, los cuales se describen a continuación, con base en la información extraída de [44] [75] [121] [122] [123] [124] [125] [126]. Los anteriores parámetros resultan de gran importancia al momento de evaluar el desempeño cuando el servicio Triple Play está conformado por servicios digitales, como por ejemplo Internet, VoIP y CATV digital. Pero cuando el servicio Triple Play está conformado por el servicio de CATV analógico se deben considerar, adicionalmente a los anteriores, otros parámetros propios de este tipo de servicio para evaluar su desempeño (que no pertenecen al modelo OPM), los cuales dependen de las distorsiones de intermodulación que se producen en el sistema, estos son Composición de Segundo Orden, Composición de Triple Batido y la Relación Portadora a Ruido, los cuales se tratan posteriormente a los parámetros del modelo OPM, con base en [129] [130] [131].

3.2.1.1. Diagrama del ojo

Existen muchas técnicas y sistemas de medición para obtener las características propias del enlace, pero en determinadas circunstancias y frente a distintos problemas que se presentan en la comunicación, muchas de ellas no son apropiadas para observar y diagnosticar el origen del problema o visualizarlo. En este sentido el análisis que reúne todas las características de un enlace de comunicaciones se conoce como Diagrama del Ojo.

El diagrama del ojo permite observar en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones de posibles unos y ceros lógicos que se propagan en el canal de transmisión. En la figura 3.4 se muestran las posibles combinaciones de una secuencia de tres bits que tiene una cantidad total de ocho combinaciones y como a partir de estas se esquematiza el diagrama del ojo.

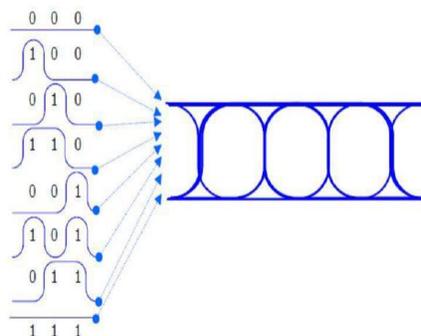


Figura 3.4. Diagrama del ojo de una secuencia de 3 bits. Tomada de [127].

El diagrama del ojo tiene cinco propiedades fundamentales nivel de 1 lógico, nivel de 0 lógico, cruce de amplitud, cruce de tiempo y periodo de bit, estas propiedades están relacionadas con distintas características de la forma del pulso como son Tiempo de subida, Tiempo de bajada, Impulso por encima e Impulso por debajo. En la figura 3.5 se puede visualizar las propiedades fundamentales y en la figura 3.6 se observan las características.

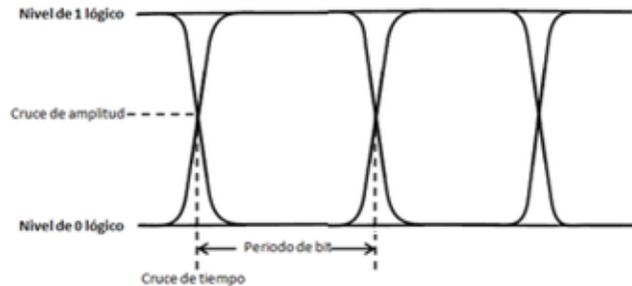


Figura 3.5. Propiedades fundamentales del diagrama del ojo. Tomada de [123].

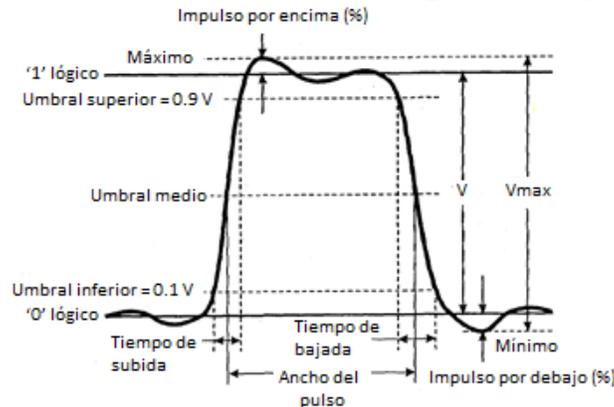


Figura 3.6. Características de la forma del pulso. Modificada de [123].

- **Cruce de tiempo:** Pertenece al tiempo en que se genera apertura y cierre del ojo.
- **Cruce de amplitud:** Pertenece el nivel de voltaje que produce la apertura y cierre del ojo.
- **Periodo de bit:** Se define como la medida temporal entre la apertura y cierre del ojo.
- **Nivel de '1' lógico:** Corresponde al valor promedio del nivel de '1' lógico. La medida del nivel '1' lógico promedio se genera a partir de un histograma que contiene los diferentes valores del pulso.
- **Nivel de '0' lógico:** Corresponde al valor promedio del nivel de '0' lógico. La medida del nivel '0' lógico promedio se genera a partir de un histograma que contiene los diferentes valores del pulso.

El diagrama del ojo permite conocer las fuentes de degradación presentes en un enlace óptico, con el fin de hacer una valoración de la calidad de transmisión. Existen unos comportamientos probables que permiten determinar errores en el sistema, los cuales se mencionan a continuación:

- Si la apertura vertical es poco pronunciada, el sistema tiene una baja tolerancia a efectos como la atenuación, Interferencia Intersímbolo (ISI, *Intersymbol Interference*) y el margen de ruido.
- Si la apertura horizontal es poco pronunciada, el sistema tiene una baja tolerancia a efectos como sincronismo y el *Jitter*.

En la Figura 3.7 se muestran los efectos del sistema sobre la señal transmitida.

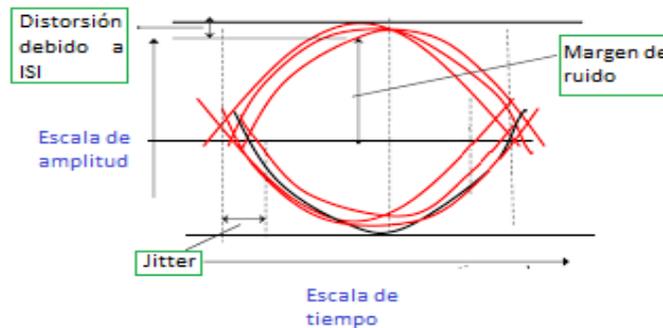


Figura 3.7. Diagrama del ojo con los fenómenos que afectan la calidad de la señal. Modificada de [128].

3.2.1.2. Factor de Calidad

El factor de Calidad o Factor Q proporciona una estimación del comportamiento del sistema al ser una medida de cuan ruidoso es un pulso, con el propósito de diagnóstico de la calidad del enlace. Se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrico (ESNR, *Electrical Signal To Noise Ratio*) en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital. En condiciones ideales el Factor Q es una función que depende de la media y la varianza (distribución de ruido Gaussiano) de las intensidades de corrientes en el receptor correspondiente a los “1” y los “0” lógicos, como se aprecia en la ecuación 3.1.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.1)$$

3.2.1.3. Tasa de Error de Bit

La medida más significativa en comunicaciones ópticas es la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Ratio*) que representa un criterio cuantitativo que evalúa la calidad de la información recibida, y se refiere a la relación entre el número de bits en error que se reciben y el número total de bits que se transmiten en determinado periodo de tiempo. Según el IEEE 802.3ah para GEPON, el valor usual de la BER se encuentra alrededor de 10^{-12} , que corresponde aprox. a un Factor Q de 17.03. Para el servicio de CATV Digital, el estándar no define un valor específico de BER, por lo que para este servicio se toma como referencia el valor considerado en [78] que corresponde a una BER de 10^{-4} . En la figura 3.8 se observa la distribución de ruido y el área correspondiente a las probabilidades de error de regeneración para cada nivel lógico.

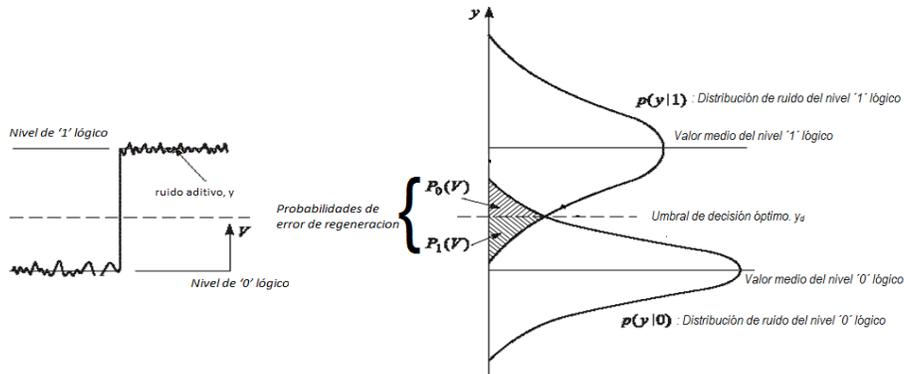


Figura 3.8. Parámetros que intervienen en el cálculo de la BER. Modificada de [122].

La tasa de error de bit está en función del factor Q, siempre y cuando las distribuciones en el receptor de las señales correspondientes a los '1' y '0' lógicos ostentan una forma Gaussiana. La relación entre estos dos parámetros se define en la ecuación 3.2, donde la función $erfc(x)$ es la función complementaria de error ($erfc$, *Complementary Error Function*).

$$BER = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.2)$$

3.2.1.4. Jitter

El *Jitter* se define como una desviación de fase respecto a la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal. Se calcula a partir de la desviación estándar del histograma que contiene las diferentes formas del pulso. El *Jitter* al no ser tratado adecuadamente puede ser un fenómeno indeseable para todo sistema de comunicaciones, debido a que degrada la calidad y desempeño del enlace. Por lo tanto, si no es controlado causa errores en la recepción de bits degradando el BER y puede introducir ISI entre los pulsos propagados en el sistema provocando que las señales que componen el pulso se desplacen y se mezclen o se traslapen, haciendo casi imposible el reconocimiento correcto de los niveles de la señal en el receptor.

En la figura 3.9 se observa gráficamente el efecto del *Jitter* en el diagrama del ojo, provocando que su abertura sea nula, esto es, un ojo completamente cerrado. Lo anterior implica que al receptor le sea imposible recobrar el sincronismo y por ende procesar correctamente la señal transmitida.

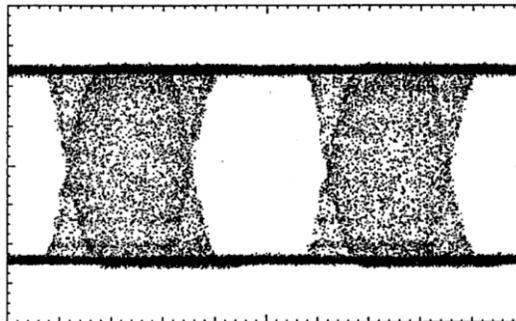


Figura 3.9. Efecto del Jitter en el diagrama del ojo. Tomado de [123].

3.2.2. Distorsiones de intermodulación

Cuando una señal pasa por un dispositivo no lineal como amplificadores, láser-diodo o fotodiodo, como es en el caso de una red FTTH-GEPON, se crean componentes de intermodulación. Dado que algunos de estos componentes interfieren con las señales principales, se consideran como una distorsión.

Los elementos no lineales pueden ser caracterizados por la siguiente función de transferencia.

$$e_o = Ae_i + Be_i^2 + Ce_i^3 \quad (3.3)$$

Dónde:

e_o : Señal de salida
 e_i : Señal de entrada
 A, B, C : Ganancias

En un sistema multicanal, la señal RF típica tiene aproximadamente 40 portadoras. En estos sistemas, las distorsiones pueden llegar a tener niveles elevados. Estas distorsiones en muchas ocasiones coincidirán con las frecuencias de los canales de la banda, adicionando potencias indeseadas, las cuales afectan el desempeño del sistema.

Se considera que el sistema de televisión emite una señal de entrada con forma de la ecuación 3.4.

$$e_i = E_i(\sin(w_1t) + \sin(w_2t) + \sin(w_3t)) \quad (3.4)$$

La señal de entrada es la suma de tres señales sinusoidales, cada señal representa una portadora RF de un respectivo plan de frecuencias. Por lo tanto, para observar claramente los efectos de distorsión solo es necesario considerar tres portadoras de RF.

Remplazando la ecuación 3.4 en la ecuación 3.3, se obtiene:

$$\begin{aligned} e_o = & AE_i(\sin w_1t + \sin w_2t + \sin w_3t) \\ & + BE_i^2(\sin w_1t + \sin w_2t + \sin w_3t)^2 \\ & + CE_i^3(\sin w_1t + \sin w_2t + \sin w_3t)^3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Luego, usando identidades trigonométricas:

$$\begin{aligned} I = & \frac{6BE_i^2}{4} \\ II = & \frac{4AE_i + 15CE_i^3}{4} [\sin(w_1t) + \sin(w_2t) + \sin(w_3t)] \\ III = & -\frac{2BE_i^2}{4} [\cos(2w_1t) + \cos(2w_2t) + \cos(2w_3t)] \\ IV = & \frac{4BE_i^2}{4} [\cos(w_1 - w_2)t - \cos(w_1 + w_2)t + \cos(w_1 - w_3)t - \cos(w_1 + w_3)t + \cos(w_2 - w_3)t - \cos(w_2 + w_3)t] \\ V = & -\frac{3CE_i^3}{4} [\sin(w_1 \pm 2w_2)t + \sin(w_1 \pm 2w_3)t + \sin(w_2 \pm 2w_1)t + \sin(w_2 \pm 2w_3)t + \sin(w_3 \pm 2w_1)t + \sin(w_3 \pm 2w_2)t] \end{aligned}$$

$$VI = \frac{6CE_i^3}{4} [\sin(w_1 - w_2 + w_3)t - \sin(w_1 - w_2 - w_3)t - \sin(w_1 + w_2 + w_3)t + \sin(w_1 + w_2 - w_3)t]$$

$$VII = -\frac{CE_i^3}{4} [\sin(3w_1t) + \sin(3w_2t) + \sin(3w_3t)]$$

$$e_0 = I + II + III + IV + V + VI + VII \quad (3.6)$$

El primer término es una componente de DC, el segundo término es la señal deseada, el tercer, cuarto, quinto, sexto y séptimo término son componentes de intermodulación. Normalmente se utilizaría un filtro pasa-bajo o pasa-alto para reducir los términos indeseados, pero esta opción no es válida para un sistema multicanal. En un sistema multicanal algunas frecuencias pueden incidir en la banda e interferir con otros canales, estos se conocen como distorsiones de intermodulación, entre las que generan un mayor impacto son las de segundo y tercer orden.

Las distorsiones de intermodulación de segundo orden son generadas por el término cuadrático, las de tercer orden son generadas por el término cúbico y así sucesivamente. Los términos de mayor orden no tienen un impacto considerable en el sistema debido a su bajo nivel de potencia, por lo que no se consideran en el estudio que realiza este trabajo de grado.

Los componentes de distorsión de segundo orden se ubican en las frecuencias $f_B \pm f_A$, $f_C \pm f_B$ y $f_C \pm f_A$, como se observa en la figura 3.10, y su potencia tiende a acumularse en lugares específicos de cada canal, a causa de la separación regular entre estos. Una medida de esta distorsión es la Composición¹⁸ de Segundo Orden o CSO.

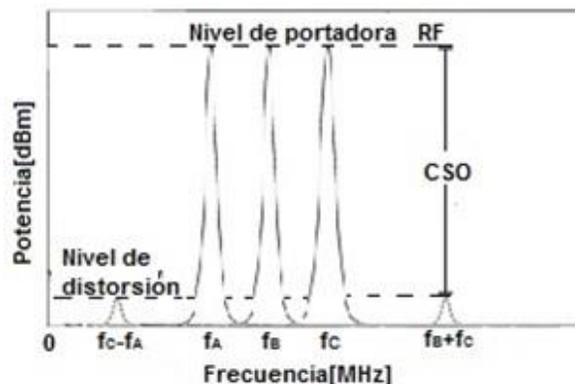


Figura 3.10. Locación en el espectro RF de las componentes de distorsión CSO en un canal de CATV. Adaptado de [129].

Los componentes de distorsión de tercer orden se sitúan en las frecuencias $f_A \pm f_B \pm f_C$ como se puede observar en la figura 3.11. A pesar que las distorsiones de tercer orden son normalmente más pequeñas en amplitud, hay gran cantidad de componentes de distorsión que inciden en la banda. Una medida de esta distorsión es la Composición de Triple Batido o CTB.

¹⁸ La composición es el efecto de distorsión de diferentes señales del sistema que inciden sobre una misma frecuencia.

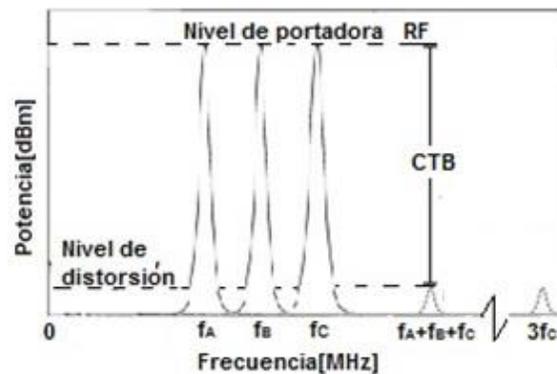


Figura 3.11. Locación en el espectro RF de las componentes de distorsión CTB en un canal de CATV. Adaptado de [129].

3.2.2.1. Composición de Segundo Orden

La composición de segundo orden se define como la relación entre la potencia de portadora y la potencia de la componente de distorsión de segundo orden en un canal determinado. La composición de segundo orden es usualmente expresado en dBc. Para sistemas CATV, la composición de segundo orden debe tener valores menores a -54 dBc para evitar cierto efecto de flujo de líneas diagonales en el video, como se observa en la figura 3.12.



Figura 3.12. Efecto de la composición de distorsión de segundo orden en la señal de video. Tomado de [132].

Para calcular teóricamente la composición de segundo orden se utiliza la ecuación 3.7:

$$CSO(dBc) = (IM_2 - C)(dB) \quad (3.7)$$

Dónde:

C: Amplitud de portadora en dB.

IM_2 : Amplitud de intermodulación de segundo orden.

En un sistema como FTTH GEPON donde la transmisión de CATV opera a 1550 nm, la dispersión de la fibra combinada con el *chirp* del láser, dan lugar a distorsiones de composición de segundo orden. El *chirp* es una modulación de frecuencia indeseada en la

señal de salida del láser. La dispersión cromática causa ensanchamiento de la señal óptica, originando que diferentes longitudes de onda lleguen al fotodiodo en tiempos diferentes. La intensidad de modulación del láser va a cambiar ligeramente la longitud de onda de salida del diodo láser, causando variaciones en la longitud de onda (*chirp*). Estas variaciones de longitud de onda ligeras, junto con la dispersión cromática, presentará diferencias de fase en la señal óptica. Las diferencias de fase se traducirán en distorsiones no lineales, principalmente la composición de segundo orden.

En el caso de la modulación directa a 1550 nm, el *chirp* del láser se convertirá en el factor limitante. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado al diseñar un módulo de láser directamente modulado de 1550 nm. En este caso, el *chirp* del láser limita severamente la sección de fibra.

Sin embargo, en el caso de modulación externa, la composición de segundo orden inducido por la dispersión tendrá unos niveles intolerables sólo cuando el segmento de fibra va más allá de unos 10 km de fibra monomodo, como por ejemplo, SMF-28. La composición de segundo orden inducido por la dispersión puede ser contrarrestada mediante el uso de fibra de dispersión desplazada.

3.2.2.2. Composición de Triple Batido

La Composición de Triple Batido se define como la relación entre la potencia de portadora y la potencia de la componente de distorsión de tercer orden en un canal determinado. La composición de Triple Batido es usualmente expresado en dBc. Para sistemas CATV, este parámetro debe tener valores menores de - 54 dBc para evitar el efecto de líneas horizontales en la señal de video, como se ilustra en la figura 3.13.



Figura 3.13. Efecto de la composición de distorsión de tercer orden en la señal de video. Tomado de [133].

Para calcular teóricamente la composición de Triple Batido se utiliza ecuación 3.8:

$$CTB(dBc) = (IM_3 - C)(dB) \quad (3.8)$$

Dónde:

C: Amplitud de portadora en dB.

IM_3 : Amplitud de intermodulación de tercer orden.

3.2.2.3. Relación Portadora a Ruido

Aparte de los mencionados anteriormente, otro de los parámetros más importantes de cualquier sistema de comunicación es la relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) para señales banda base o su equivalente, la relación portadora a ruido (CNR, *Carrier to Noise Ratio*) para señales moduladas, como se ilustra en la figura 3.14. Estas relaciones son usadas como medidas cualitativas de un sistema y pueden ser usadas para comparar fácilmente el desempeño de diferentes sistemas. En una transmisión multicanal de CATV analógico, la CNR consiste en la contribución de ruidos, tales como, ruido impulsivo (N_s), ruido térmico (N_t), ruido de corte (N_c), ruido de amplificador óptico (N_a) y ruido de intensidad relativa (N_{RIN}). El CNR total del sistema es la relación de la potencia de portadora y la suma de cada una de las contribuciones de ruido, como se observa en la ecuación 3.9.

$$cnr = \frac{c}{n} \quad (3.9)$$

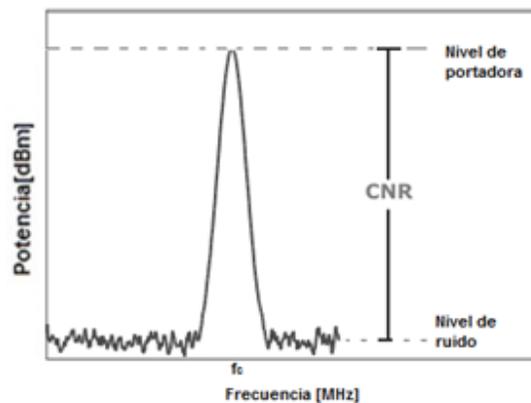


Figura 3.14. Espectro RF para la medición de CNR en un canal de CATV. Adaptado de [129].

Como resultado del análisis efectuado en este trabajo de grado, se han identificado las características más importantes de las topologías que se utilizan para la implementación de las redes FTTH-GEPON, las cuales se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características principales de las topologías FTTH-GEPON. Por los autores.

Características	Topologías de red FTTH-GEPON		
	Árbol	Bus	Anillo
Cobertura	Alta	Media	Media
Escalabilidad	Alta	Media	Baja
Network Survivability	Media	Media	Baja
Dificultad de implementación	Baja	Baja	Alta

Por otra parte, se han identificado los parámetros que permiten la evaluación del desempeño de servicios Triple Play a nivel físico en redes FTTH-GEPON, de acuerdo con los tipos de servicios que se proporcionan al usuario, ya sean digitales o analógicos, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros para la evaluación del desempeño en redes FTTH-GEPON. Por los autores.

Tipos de Servicios	Parámetros de desempeño
Servicios Digitales	<ul style="list-style-type: none">• Diagrama del ojo• Tasa de Error de Bit o BER• Factor Q• Jitter
Servicios Analógicos	<ul style="list-style-type: none">• Composición de Segundo Orden o CSO• Composición de Triple Batido o CTB• Relación Señal a Ruido o CNR

En el presente capítulo se han abordado aspectos que permiten identificar las características principales de las topologías de una red GEPON con arquitectura FTTH, además de los parámetros que permiten evaluar el desempeño de los servicios que se implementaron en las simulaciones llevadas a cabo en el capítulo cuatro. De esta manera, lo realizado en el presente capítulo permite cumplir el objetivo específico número uno: **“Identificar las principales características de las topologías de red FTTH-GEPON en árbol, anillo y bus”**; y el objetivo específico número dos: **“Identificar los parámetros que permitan evaluar el desempeño de servicios Triple Play en redes FTTH-GEPON”**.

Ahora bien, para observar y analizar el impacto de la topología física de una red GEPON con arquitectura FTTH en el desempeño de servicios Triple Play, se evaluaron mediante simulación los parámetros de desempeño descritos previamente con cada una de las topologías expuestas a lo largo del capítulo. En el capítulo siguiente se describe la metodología que permitió llevar a cabo la simulación, las pruebas y el análisis de sus resultados.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La simulación es un procedimiento que permite sustituir las situaciones reales por otras creadas artificialmente como abstracciones del sistema real, con el fin de alcanzar una mejor comprensión de conceptos de una situación estudiada. La simulación permite controlar muchas variables del sistema, con el objetivo de obtener una diversidad de resultados que sean interpretados y analizados.

Una gran parte de la ciencia, hoy en día, basa sus éxitos cada vez más en el paradigma de la simulación, más que en la experimentación en sí. Debido a que, la simulación brinda la información del proceso a realizar y permite obtener y aprender acciones y habilidades necesarias para que, al realizar la experimentación, se pueda transferir con igual efectividad. La simulación mediante software en el campo de redes de telecomunicaciones es actualmente una herramienta muy útil para empresas y universidades del sector a la hora de recrear el comportamiento de un sistema en cual se estén ejecutando diferentes servicios definidos por el usuario. Existen multitudes de simuladores, la elección depende de varios factores tales como, los protocolos soportados, cantidad de eventos que puede simular, la facilidad de uso y la flexibilidad.

En este capítulo se desarrolla el procedimiento llevado a cabo para evaluar y analizar el desempeño de servicios Triple Play en una red GEPON con arquitectura FTTH al variar su topología física de red, con base en los lineamientos de una metodología de simulación. En primer lugar, se describe la herramienta seleccionada para llevar a cabo la implementación de las topologías de red y su simulación. En segundo lugar, se detalla la metodología de simulación en la que se basó el trabajo de grado para evaluar el desempeño de los servicios anteriormente mencionados en cada una de las topologías de red, definiendo cada una de sus fases y las actividades que se llevaron a cabo en cada una de estas. Finalmente, se muestra el análisis comparativo llevado a cabo con base en los resultados de la simulación para observar el impacto de la topología de red en los parámetros de desempeño evaluados.

4.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN OPTSIM®

OptSim® es un software de la compañía *Synopsis, Inc*, que proporciona un paquete de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas como WDM, TDM, CATV, PON y otros sistemas ópticos para múltiples aplicaciones, además permite diseñar y simular sistemas ópticos para evaluar su desempeño de acuerdo a varios parámetros determinados [134].

Esta herramienta representa un sistema óptico de comunicaciones como un conjunto de bloques interconectados, donde cada bloque representa un componente en el sistema de comunicación. Al igual que en un sistema óptico real, la señal de datos es transportada entre los componentes que hacen parte de la simulación en OptSim®. Cada bloque o componente es simulado de manera independiente con base en los parámetros especificados por el usuario para cada uno de ellos y la señal transmitida a estos desde otros bloques. En la herramienta, los bloques están representados gráficamente como iconos e internamente como estructuras de datos y algoritmos numéricos sofisticados [134].

OptSim® proporciona una extensa librería con los componentes más comúnmente utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas y se organizan en varias categorías como: Generadores de señal, transmisores, Fibras Ópticas, Filtros (ópticos y eléctricos), multiplexores y demultiplexores, amplificadores (ópticos y eléctricos), receptores, entre otras. Además, cuenta con la capacidad de análisis de desempeño con base en parámetros como BER, Factor Q, espectro de potencia, analizador de señal, diagrama del ojo con una selección completa de herramientas de medida como *jitter*, abertura del ojo, espectro electro/óptico, fase/frecuencia óptica instantánea, potencia, entre otras. Además, para la utilización de todas sus funcionalidades, esta herramienta proporciona un entorno de trabajo conformado por una GUI que permite una interacción más sencilla con el usuario, facilitando el diseño de los sistemas ópticos y el análisis de los resultados que se producen a partir de su simulación [134]. Una característica de gran importancia que tiene la herramienta de simulación es que, por una parte, cuenta con una extensa librería de componentes para el diseño y modelamiento de aplicaciones como CATV analógico y CATV Digital (con base en modulaciones PSK, M-QAM, etc.); por otra parte, incluye dos redes básicas FTTH-PON con soporte de servicios de datos, VoIP y video ya diseñadas con sus respectivos nodos o módulos como lo es el ONT y el OLT, que permiten ser una referencia para la implementación de las topologías de red que proporcionen estos servicios y así evaluar el desempeño óptico.

Las características expuestas anteriormente son adecuadas para el desarrollo de este trabajo de grado, además la Facultad de Ingeniería electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca facilita esta herramienta de simulación ya que cuenta con la licencia para su utilización, por tal razón, esta herramienta ha sido seleccionada.

Por otra parte, la interacción con la herramienta de simulación se puede representar utilizando el estándar UML 2.0, como se ilustra en la figura 4.1, mediante un diagrama de casos de uso del simulador. Este diagrama de comportamiento se basa en los requerimientos de sistema y muestra los eventos generados por la interacción entre el sistema y entidades externas al sistema.

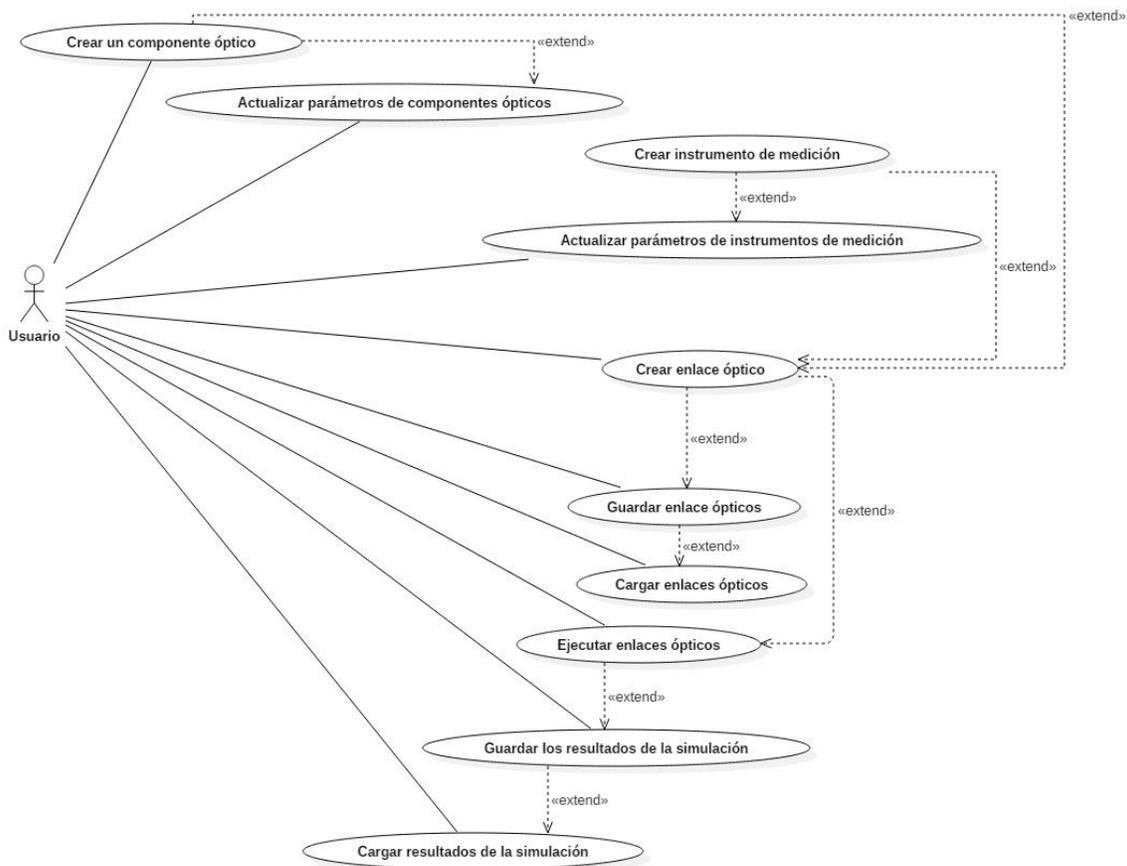


Figura 4.1. Diagrama de casos de uso del simulador. Por los autores.

Un aspecto importante que caracteriza a OptSim® es la utilización de una doble máquina de simulación, definiendo dos modos de simulación [134]:

- **Modo Bloque.** En este modo se realizan simulaciones en las que la señal de datos pasada entre los componentes representa el tiempo total simulado en un bloque de datos. Dicho de otra manera, en este modo un único componente puede pasar datos únicamente a otro componente una vez durante el curso de la simulación, cubriendo el tiempo simulado en un solo bloque de datos. La figura 4.2 muestra un ejemplo proporcionado por la herramienta en el que se puede visualizar el entorno de trabajo en este modo.

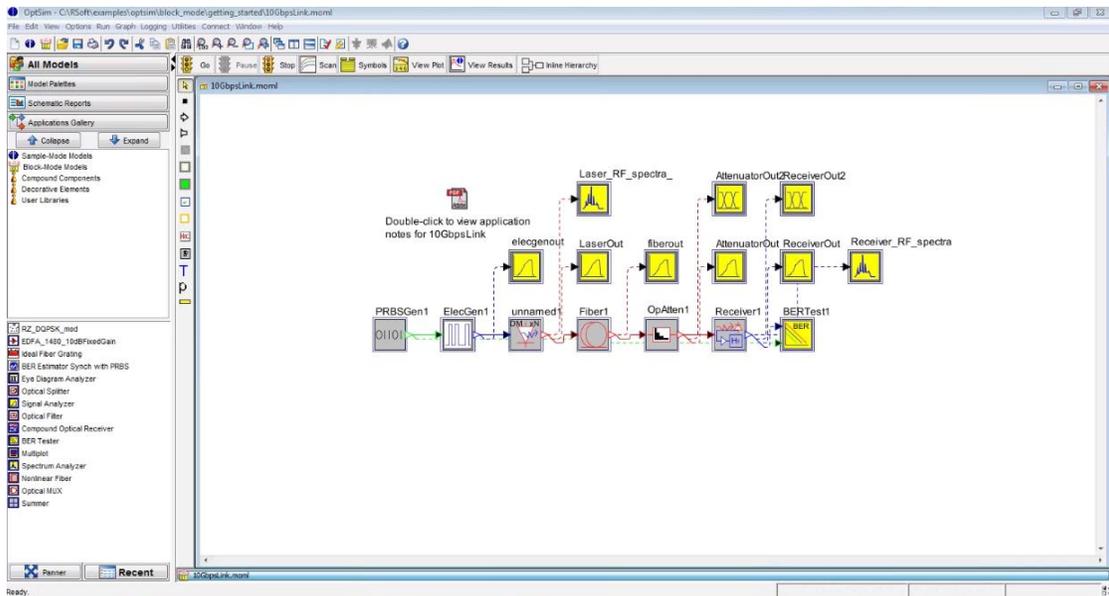


Figura 4.2. Entorno del área de trabajo del modo bloque (Nombre del archivo: 10 Gbps Link).

- Modo Muestra. En este modo se realizan las simulaciones de tal manera que la señal de datos pasada entre los componentes representa una única muestra en cada instante de tiempo. A diferencia del modo bloque, en este modo un componente pasará nuevas muestras de datos a otro componente a cada paso de tiempo en la simulación, además la simulación puede ejecutarse sobre una cantidad ilimitada de tiempo. La figura 4.3 muestra un ejemplo proporcionado por la herramienta en el que se puede visualizar el entorno de trabajo en este modo.

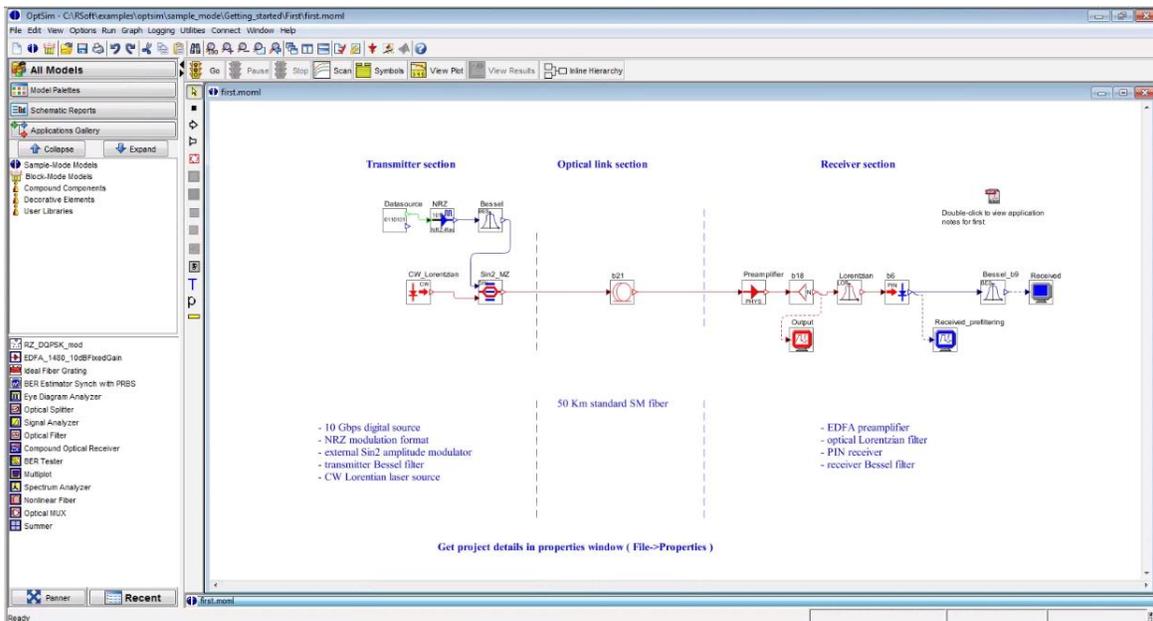


Figura 4.3. Entorno del área de trabajo del modo muestra (Nombre del archivo: First).

Adicionalmente, el modo muestra presenta dos tipos de simulación:

- La técnica de simulación de ancho de banda variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*) que define un entorno donde las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable y permite determinar el comportamiento de la señal en recepción. Además, presenta diferentes opciones de simulación: “VBS Loss Only Fiber”, que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra, “VBS Linear Fiber”, que solo considera los efectos lineales y “Full VBS”, caracterizada por ser la opción más completa para realizar la simulación ya que tiene en cuenta todos los efectos de la fibra, por consiguiente, implica que los resultados de la simulación tengan un nivel más cercano a la realidad.
- La técnica de propagación espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*) que se realiza en el dominio de la frecuencia, donde las señales se propagan en la red como espectros de potencia, tomando en cuenta las pérdidas y el ruido de los componentes. De esta manera, el espectro y los niveles de potencia pueden evaluarse en cualquier punto de la red.

Además, la herramienta se compone de un modo de análisis donde se puede observar el comportamiento del sistema a partir de gráficas analíticas. Como se mencionó en el apartado anterior se tienen dos máquinas o motores de simulación, por lo tanto, se tienen dos modos de análisis. El modo de análisis del modo bloque se ilustra en la figura 4.4 y el modo de análisis del modo muestra se ilustra en la figura 4.5.

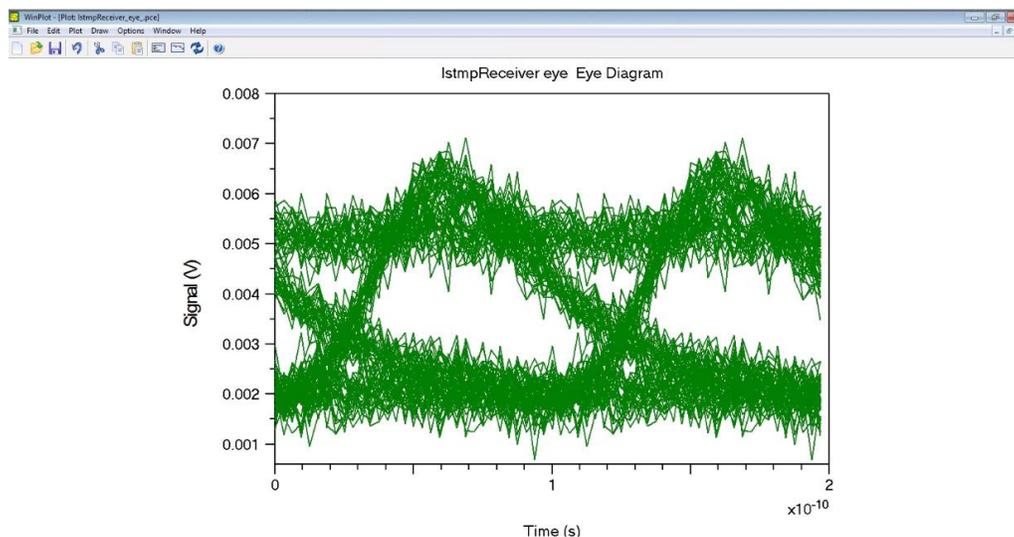


Figura 4.4. Diagrama del ojo en el receptor del ejemplo 10 Gbps Link del modo bloque.

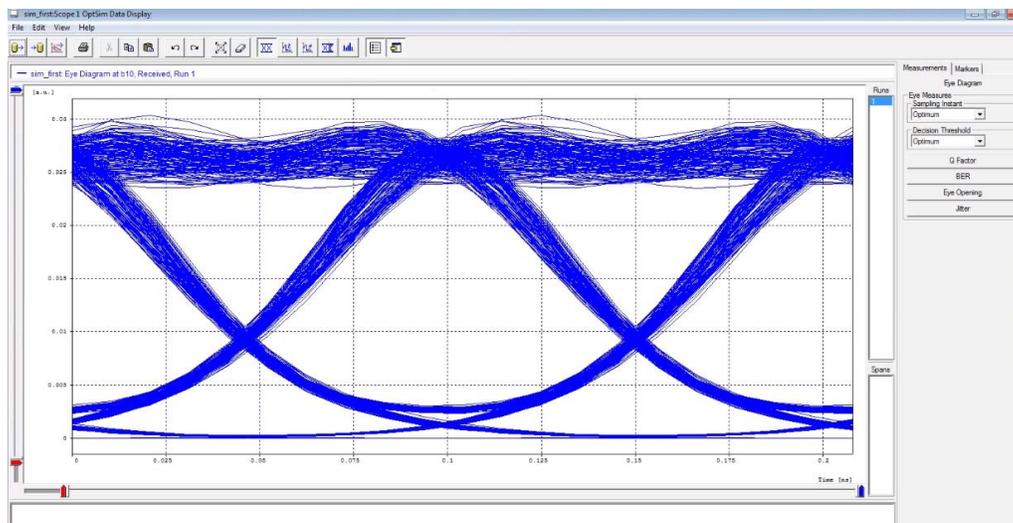


Figura 4.5. Diagrama del ojo en el receptor del ejemplo First del modo muestra.

Para el desarrollo del trabajo de grado, se adoptó los dos modos de simulación, ya que cada uno provee una red de referencia FTTH-PON con soporte de servicios Triple Play, con parámetros establecidos por defecto por parte de la herramienta. El modo muestra provee una red con soporte de Internet, VoIP y CATV Digital que por medio de sus componentes de medida y análisis, permite estudiar los parámetros que determinan el desempeño en estos servicios de carácter digital. Por su parte el Modo Bloque proporciona los mismos servicios con la diferencia que el servicio CATV se basa en transmisión analógica, permitiendo estudiar con mayor claridad los parámetros de desempeño propios en este tipo de servicio, tales como CSO, CTB y CNR.

4.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para analizar el impacto de la topología de red GEPON con arquitectura FTTH en el desempeño de servicios Triple Play, se sigue una metodología basada en [135] [136] que define el seguimiento de una serie de pasos o fases, lo cual permite cumplir el objetivo específico número tres propuesto en el anteproyecto de manera ordenada. Las fases o pasos a seguir se muestran a continuación:

- ✓ Fase 1. Definición del escenario de simulación.
- ✓ Fase 2. Definición de las características y parámetros técnicos de simulación.
- ✓ Fase 3. Ejecución de las simulaciones.
- ✓ Fase 4. Evaluación y Análisis de resultados.

4.2.1. Fase 1: Definición del escenario de simulación

La definición del escenario condiciona el desarrollo del tema que se está estudiando. El estudio del escenario se inicia con la definición de los espacios del escenario, posteriormente se especifica el caso de estudio en el que se desarrolla el escenario y

finalmente se especifican las variables que permiten que el escenario cambie. A continuación, se define el escenario para este trabajo de grado:

- El espacio del escenario es la topología de red, debido a que, almacena todos los elementos del escenario y se encarga de conectar nodos y establecer las asociaciones entre los elementos. De acuerdo con los objetivos planteados del trabajo de grado, lo que se requiere es analizar el impacto de la topología física de red GEPON con arquitectura FTTH en el desempeño de Servicios Triple Play, para esto, se consideraron tres diferentes espacios del escenario, estos son: la topología de red en árbol, la topología de red en bus y la topología de red en anillo.

Básicamente, cada espacio del escenario está conformado por un elemento transmisor (OLT), la topología de red y los receptores (ONT). Las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 ilustran los espacios del escenario de simulación establecido.

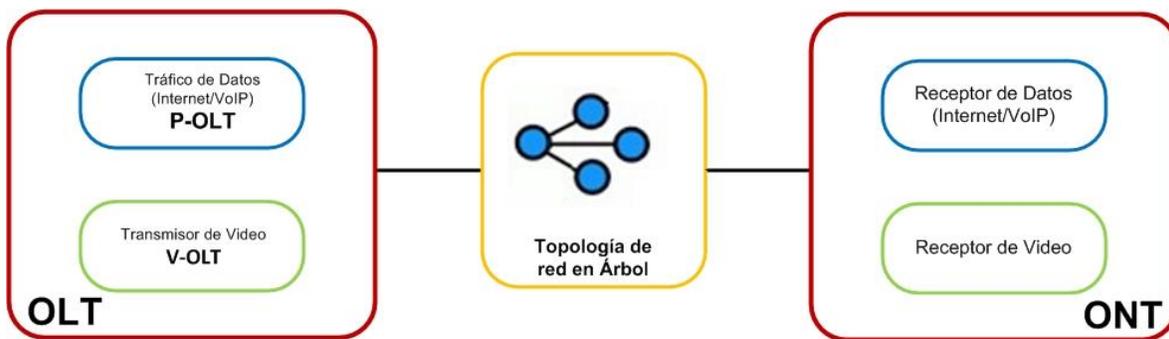


Figura 4.6. Espacio número uno del escenario de simulación, topología de red en árbol. Por los autores.

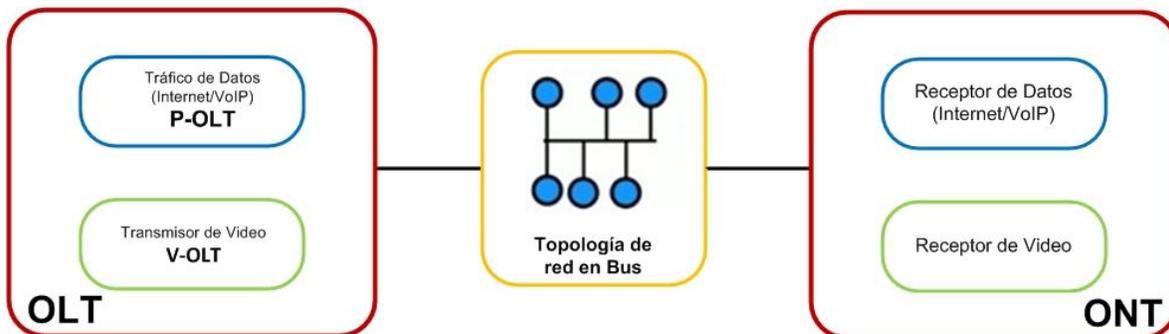


Figura 4.7. Espacio número dos del escenario de simulación, topología de red en bus. Por los autores.

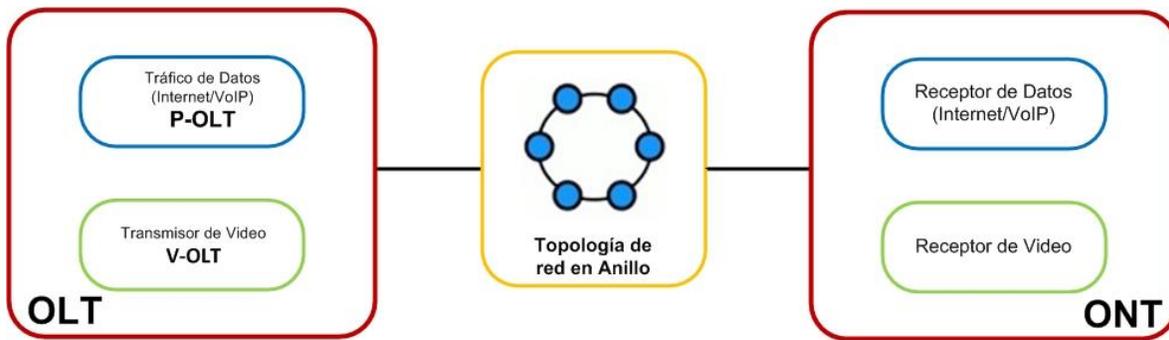


Figura 4.8. Espacio número tres del Escenario de simulación, topología de red en anillo. Por los autores.

- El caso de estudio en el escenario es el servicio Triple Play. Como se trató en el capítulo 2, el servicio Triple Play puede estar conformado por tres tipos de transmisión de televisión, estos son: IPTV, CATV Digital y CATV Analógico. En este trabajo de grado se seleccionaron dos casos de estudio. El primero es la prestación de servicio Triple Play con CATV digital. El segundo es la prestación de servicio Triple Play con CATV analógico.

Se optó por tomar dos casos de estudio, el de la transmisión de CATV Digital y CATV Analógico ya que, como se expuso en el capítulo 2, el servicio de IPTV se envía conjuntamente con los servicios de Internet y VoIP en la misma longitud de onda (1490 nm) y no puede ser discriminado de los otros servicios para su posterior análisis. Mientras que el servicio de televisión enviado en la longitud de onda definida para su transmisión (1550 nm) ya sea CATV Digital o CATV analógico, permite su análisis de manera diferenciada al servicio de datos constituido por Internet y VoIP, por ende permite ser analizado de manera independiente. Además, el proporcionar el servicio de IPTV exige un estudio más profundo teniendo en cuenta que el contenido que ve el usuario es personalizado, es decir, la información es enviada en modo *Unicast* y por ende cobra gran importancia un cuidadoso dimensionamiento de la red de acceso, lo cual queda por fuera del alcance del presente trabajo de grado, tal como se planteó en el respectivo anteproyecto.

A continuación se describe cada uno de los casos de estudio seleccionados.

- **Caso de Estudio No.1. Transmisión de Internet/VoIP y CATV Digital**

En este caso, el servicio Triple Play es proporcionado como una combinación de señales de Internet, VoIP y CATV Digital. El componente de Internet y VoIP se trabajan de manera conjunta a una velocidad de 1.25 Gbps (velocidad máxima para un enlace GEPON) y se transmiten en la longitud de onda de 1490 nm. Por su parte, el componente de video es representado como un sistema SCM Digital 16 QAM que se transmite en una longitud de onda de 1550 nm. La figura 4.9 muestra la configuración utilizada para el primer caso de estudio.

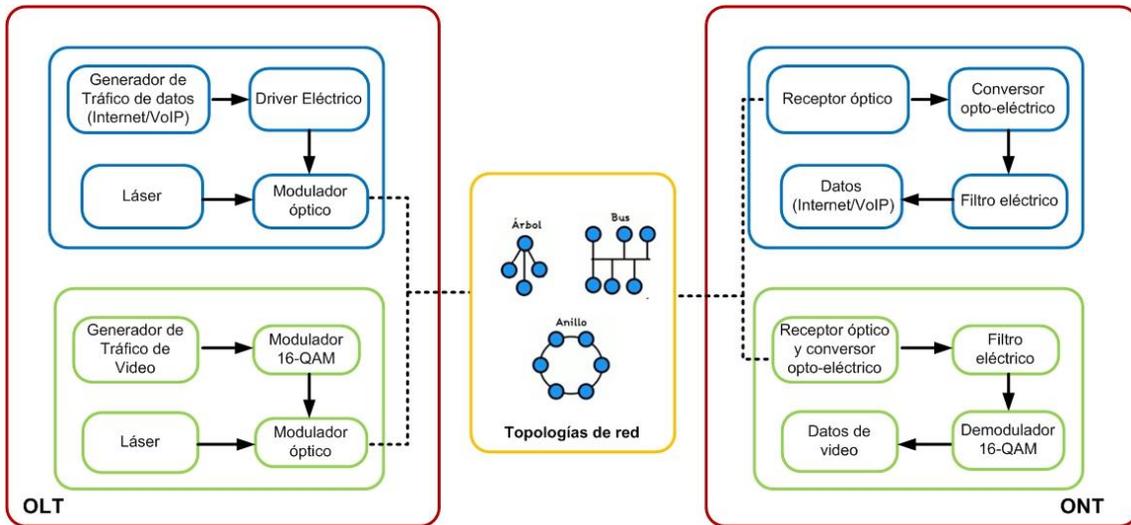


Figura 4.9. Configuración caso de estudio número uno, transmisión de Internet/VoIP y CATV Digital. Por los autores.

- **Caso de Estudio No.2. Transmisión de Internet/VoIP y CATV analógico**

En este caso, el servicio Triple Play es proporcionado como una combinación de señales de Internet, VoIP y CATV analógico. El componente de Internet y VoIP se trabajan al igual que en el caso No.1. El servicio de televisión se proporciona mediante la transmisión de CATV analógico o también denominado video *overlay*, en el que se envían canales analógicos a través de la red óptica en una longitud de onda de 1550 nm. La figura 4.10 muestra la configuración utilizada para el caso de estudio No. 2.

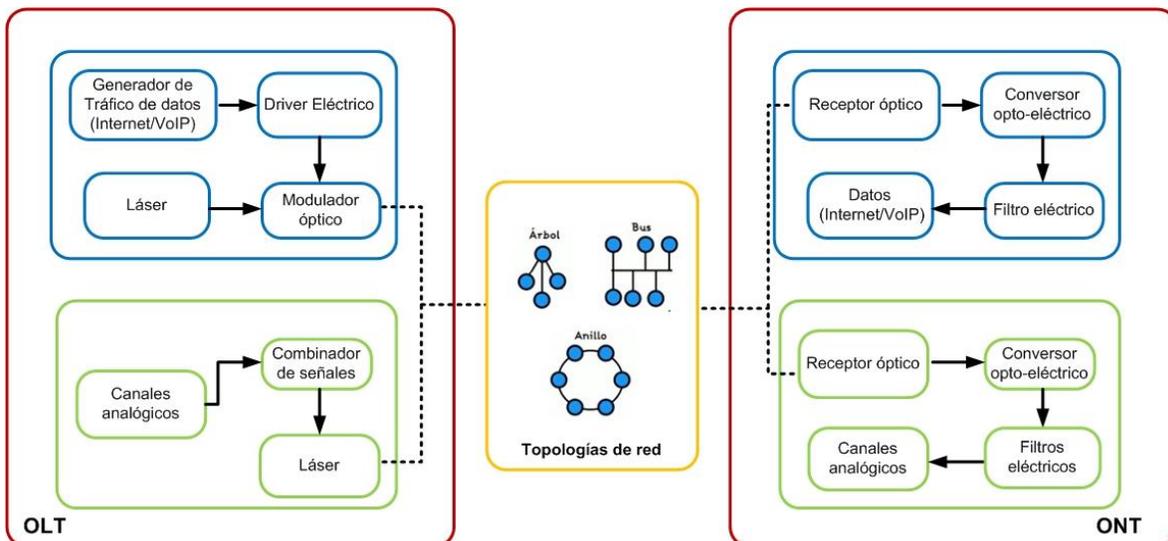


Figura 4.10. Configuración caso de estudio número dos, transmisión de Internet/VoIP y CATV analógico. Por los autores.

- Las variables del escenario son las encargadas de cambiar el comportamiento del sistema. En este trabajo de grado la variable es la cobertura. La cobertura, en caso de las redes PON, es la distancia entre la OLT y la ONT. Para lo anterior se realiza la variación de la longitud de las fibras de distribución¹⁹, que varían hasta 5 Km, dejando fija la longitud de fibra troncal de 15 Km como lo establece la herramienta por defecto, de tal manera que la distancia entre el OLT y cada ONT no sobrepase los 20 Km.

Los valores mencionados anteriormente, tanto de fibra troncal como de fibras de distribución, se tienen en cuenta para todos los espacios del escenario, ya que, el estudio realizado en este trabajo de grado contempla un análisis comparativo de acuerdo al impacto en los parámetros de desempeño evaluados en cada topología de red, para lo cual estas deben estar bajo las mismas condiciones.

En la figura 4.11 se ilustra la definición del escenario general de simulación establecido.

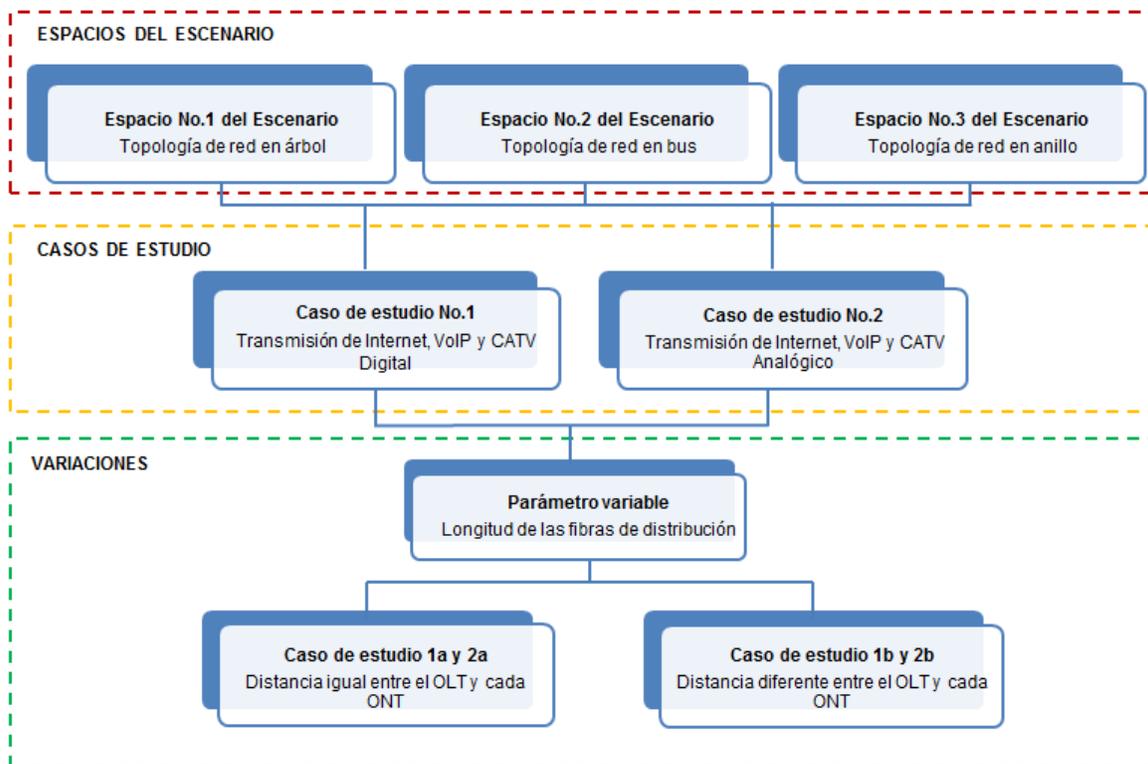


Figura 4.11. Definición del escenario general de simulación. Por los autores.

➤ Configuración de los espacios del escenario de simulación

En esta sección se describe la configuración realizada para cada topología con la cual se llevó a cabo el proceso de simulación. Como se aprecia más adelante, la cantidad de nodos ONT y de distancias diferentes fueron escogidas con base en la literatura consultada, con base en [98] [113] [119] [137-144], teniendo en cuenta la cantidad de terminales con las que se puede llevar a cabo un estudio en este tipo de tecnología y la

¹⁹ Las fibras de distribución son los tramos de fibra que interconectan el OLT con el ONT, desde el *Splitter* siguiente a la fibra troncal.

relación de *splitter* que GEPON permite y que comercialmente son utilizadas. Se encontró que la cantidad mínima de nodos ONT con las que se puede llevar a cabo oscila entre cuatro y seis terminales, en el caso de las topologías en bus y anillo, pero como el estudio que se plantea en este trabajo de grado contempla adicionalmente a las anteriores, la topología de red en árbol (por lo cual deben tener la misma cantidad de terminales) y que las relaciones mínimas de *splitter* que se permite para estas redes es de 1:2 y 1:4, se optó por utilizar cuatro terminales. El conjunto de distancias utilizadas se determinó a partir de los trabajos relacionados en los que se consideran estudios sobre topologías de red, por lo tanto, se tomaron cuatro valores de distancias válidas para llevar a cabo el estudio. Las distancias seleccionadas cumplen con los márgenes de atenuación establecidas por el estándar IEEE 802.3ah, como se muestra al realizar el cálculo de atenuación en el enlace, cuyo procedimiento matemático se muestra en el anexo C.

- **Topología de Red en Árbol**

El proceso de configuración de la topología en árbol, se realiza con la variable cobertura, la cual está en función de la longitud de la fibra troncal y la fibra que se despliega desde el *splitter* hasta la ONT. La figura 4.12 ilustra la configuración utilizada para la topología de red en árbol, en la cual se observa el nombre designado a cada tramo de fibra que en apartados posteriores servirán de referencia en la ecuación 4.1 y 4.2.

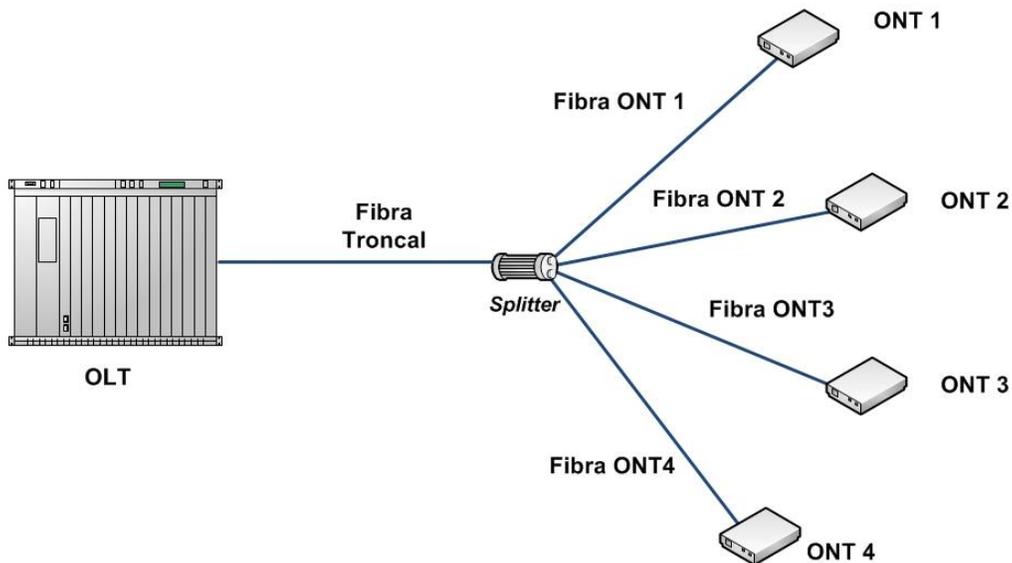


Figura 4.12. Configuración base de la topología de red en árbol a simular. Por los Autores.

$$\text{Distancia entre } ONT_i \text{ y OLT [km]} = \text{Longitud de Fibra Troncal [km]} + \text{Longitud de Fibra } ONT_i \text{ [km]} \quad (4.1)$$

$$\text{Distancia entre } ONT_i \text{ y OLT [km]} = 15 + \text{Longitud de Fibra } ONT_i \text{ [km]} \quad (4.2)$$

Dónde: $i = 1,2,3,4$

- **Topología de Red en Bus**

La configuración de la topología en bus se ilustra en la figura 4.13. El proceso de configuración de la topología en bus, se realiza con la variable cobertura, la cual está en función de la longitud de la fibra troncal, las fibras entre cada *splitter* y las fibras que se despliegan desde el *splitter* hasta la ONT, y se representa matemáticamente mediante la ecuación 4.3.

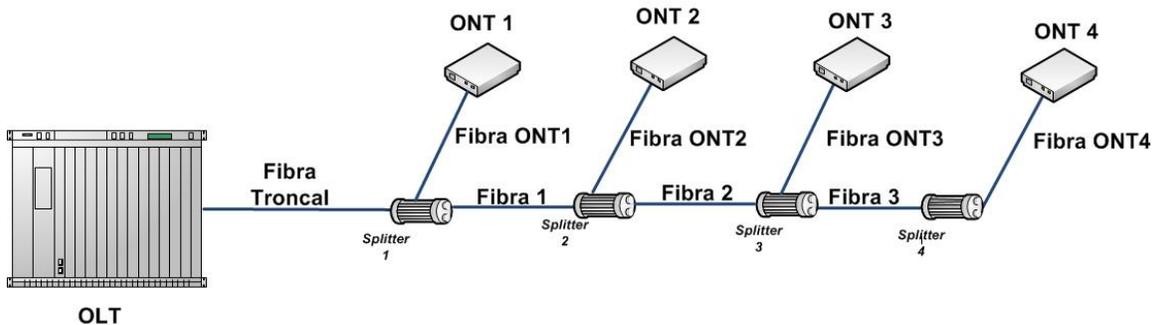


Figura 4.13. Configuración base de la topología de red en bus a simular. Por los Autores.

$$\begin{matrix} \text{Distancia} & \text{Long.} \\ \text{entre } ONT_i \text{ [km]} & \text{de Fibra [km]} \\ \text{y OLT} & \text{Troncal} \end{matrix} = \sum_{n=0}^{i-1} \text{Long. de Fibra}_n \text{ [km]} |_{\text{Long. de Fibra}_0=0} + \text{Long. de Fibra}_{ONT_i} \text{ [km]} \quad (4.3)$$

$$\begin{matrix} \text{Distancia} \\ \text{entre } ONT_i \text{ [km]} \\ \text{y OLT} \end{matrix} = 15 + \sum_{n=0}^{i-1} \text{Long. de Fibra}_n \text{ [km]} |_{\text{Long. de Fibra}_0=0} + \text{Long. de Fibra}_{ONT_i} \text{ [km]} \quad (4.4)$$

Dónde: $i = 1,2,3,4$

- **Topología de Red en Anillo**

La configuración de la topología en anillo se ilustra en la figura 4.14. El proceso de configuración de la topología en bus, se realiza con la variable cobertura, la cual está en función de la longitud de la fibra troncal, las fibras entre cada *splitter* y las fibras que se despliegan desde el *splitter* hasta la ONT, y se representa matemáticamente mediante la ecuación 4.5

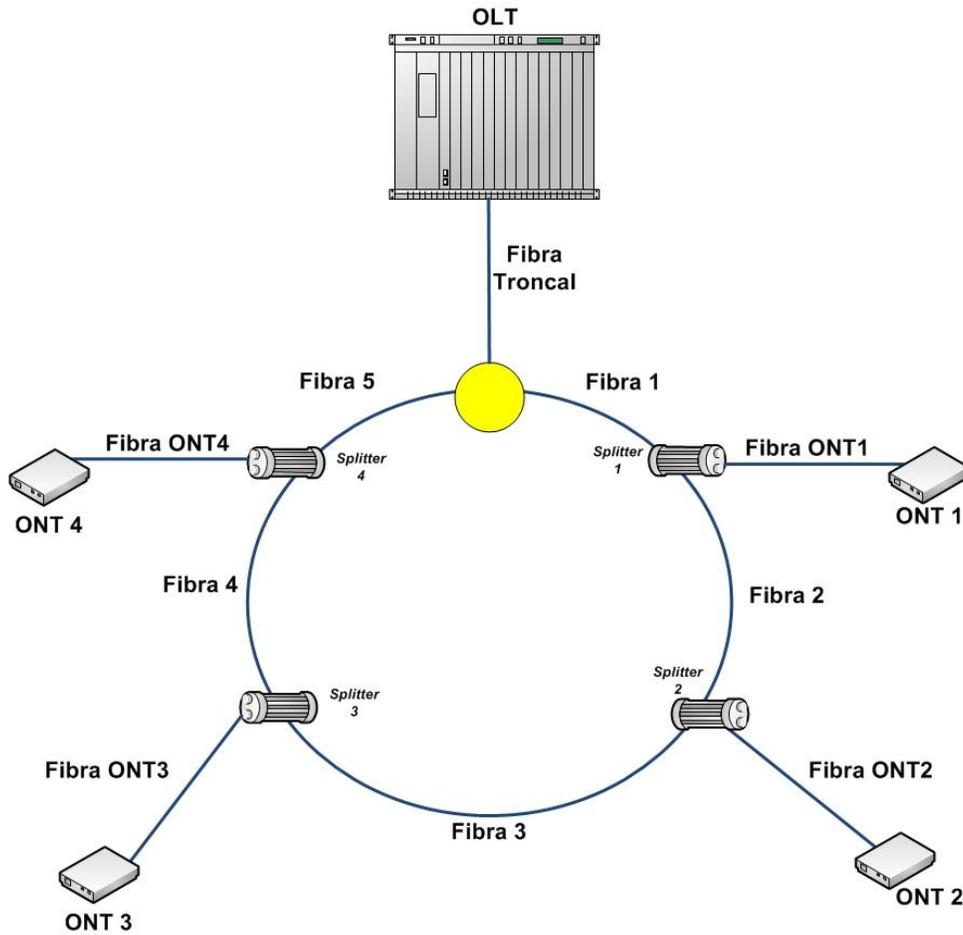


Figura 4.14. Configuración base de la topología de red en anillo a simular. Por los Autores.

$$\text{Distancia entre } ONT_i \text{ y OLT [km]} = \frac{\text{Long. de Fibra Troncal}}{\text{Long. de Fibra Troncal}} + \sum_{n=1}^i \text{Long. de Fibra}_n \text{ [km]} + \text{Long. de Fibra } ONT_i \text{ [km]} \quad (4.5)$$

$$\text{Distancia entre } ONT_i \text{ y OLT [km]} = 15 + \sum_{n=1}^i \text{Long. de Fibra}_n \text{ [km]} + \text{Long. de Fibra } ONT_i \text{ [km]} \quad (4.6)$$

Dónde: $i = 1,2,3,4$

Los parámetros que determinan la cobertura de una red PON son las longitudes de las diferentes fibras que interconectan el sistema y cuyos distintos valores dan lugar a diferentes casos de estudio en un problema, por consiguiente, para observar el impacto que tienen estos parámetros, se determinaron los siguientes casos:

➤ **Modelado del Caso de estudio 1a y 2a**

En el caso de estudio 1a y 2a, se consideró una distancia igual entre la OLT y cada ONT. En la tabla 4.1 se muestran los valores que se configuraron para esta variable.

Tabla 4.1. Distancia entre OLT y cada ONT para el caso 1a y 2a. Por los autores.

	Topología Árbol, Anillo y Bus			
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Distancia [km] entre OLT y ONT _i con $i = 1,2,3,4$	16.5	18.0	19.5	20.0

- **Topología de red en Árbol:**

Remplazando los valores de la tabla 4.1 en la ecuación 4.2 se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre el *Splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT _i con $i = 1,2,3,4$	1.5	3.0	4.5	5.0

- **Topología de red en Bus:**

Considerando que las longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters* tienen el mismo valor, como se observa en la tabla 4.3 y remplazando estos valores junto con los de la tabla 4.1, en la ecuación 4.4, se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre *splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.4.

Tabla 4.3. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra, con $i = 1,2,3$	0.375	0.75	1.125	1.25

Tabla 4.4. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT ₁	1.5	3.0	4.5	5.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₂	1.125	2.25	3.375	3.75
Longitud [km] de Fibra ONT ₃	0.75	1.5	2.25	2.5
Longitud [km] de Fibra ONT ₄	0.375	0.75	1.125	1.25

- Topología de red en Anillo:

Considerando que las longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters*, y entre *Splitter* y circulador, tienen el mismo valor, como se observa en la tabla 4.5 y remplazando estos valores junto con los de la tabla 4.1, en la ecuación 4.6, se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre *splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.6.

Tabla 4.5. Longitudes de las fibras localizadas entre Splitters (con $i=2,3$ y 4) y fibras localizadas entre Splitter y circulador (con $i = 1$ y 5). Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra _i con $i=1,2,3,4,5$	0.3	0.6	0.9	1.0

Tabla 4.6. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT ₁	1.2	2.4	3.6	4.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₂	0.9	1.8	2.7	3.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₃	0.6	1.2	1.8	2.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₄	0.3	0.6	0.9	1.0

➤ **Modelado del Caso de estudio 1b y 2b**

En el caso de estudio 1b y 2b, se consideró una distancia diferente entre el OLT y cada ONT. En la tabla 4.7 se muestran los valores que se configuraron para esta variable.

Tabla 4.7. Distancia entre OLT y cada ONT. Por los autores.

	Topología Árbol, Anillo y Bus			
	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Distancia [km] entre OLT y ONT ₁	16.5	18.0	19.5	20.0
Distancia [km] entre OLT y ONT ₂	18.0	16.5	20.0	19.5
Distancia [km] entre OLT y ONT ₃	19.5	20	16.5	18.5
Distancia [km] entre OLT y ONT ₄	20.0	19.5	18.5	16.5

- Topología de red en Árbol:

Remplazando los valores de la tabla 4.7 en la ecuación 4.2 se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre el *Splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT ₁	1.5	3.0	4.5	5.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₂	3.0	1.5	5.0	4.5
Longitud [km] de Fibra ONT ₃	4.5	5.0	1.5	3.0
Longitud [km] de Fibra ONT ₄	5.0	4.5	3.0	1.5

- **Topología de red en Bus:**

Considerando que las longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters* tienen el mismo valor, como se observa en la tabla 4.9 y reemplazando estos valores junto con los de la tabla 4.7, en la ecuación 4.4, se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre *splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.10.

Tabla 4.9. Longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters*. Por los autores.

	Configuración i con i =1,2,3,4
Longitud [km] de Fibra_i con i=1,2,3	0.375

Tabla 4.10. Longitudes de las fibras localizadas entre el *Splitter* y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT₁	1.5	3.0	4.5	5.0
Longitud [km] de Fibra ONT₂	2.625	1.125	4.625	4.125
Longitud [km] de Fibra ONT₃	3.75	4.25	0.75	2.25
Longitud [km] de Fibra ONT₄	3.875	3.375	1.875	0.375

- **Topología de red en Anillo:**

Considerando que las longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters* y entre *Splitter* y circulador tienen el mismo valor, como se observa en la tabla 4.11 y reemplazando estos valores junto con los de la tabla 4.7, en la ecuación 4.6, se obtienen los valores de las longitudes de las fibras localizadas entre *splitter* y cada ONT, como se observa en la tabla 4.12.

Tabla 4.11. Longitudes de las fibras localizadas entre *Splitters* (con i=2,3 y 4) y fibras localizadas entre *Splitter* y circulador (con i = 1 y 5). Por los autores.

	Configuración i con i=1,2,3,4
Longitud [km] de Fibra_i con i 1,2,3,4,5	0.3

Tabla 4.12. Longitudes de las fibras localizadas entre el Splitter y cada ONT. Por los autores.

	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3	Configuración 4
Longitud [km] de Fibra ONT ₁	1.2	2.7	4.2	4.7
Longitud [km] de Fibra ONT ₂	2.4	0.9	4.4	3.9
Longitud [km] de Fibra ONT ₃	3.6	4.1	0.6	2.1
Longitud [km] de Fibra ONT ₄	3.8	3.3	1.8	0.3

4.2.2. Fase 2: Definición de las características y parámetros técnicos de simulación

Como se mencionó anteriormente, para el análisis del desempeño de servicios Triple Play en las topologías de red se tuvieron en cuenta dos casos de estudio, para los cuales la mayoría de las características y parámetros técnicos están definidos por defecto en la herramienta de simulación OptSim®. Sin embargo, se recurrió a la información establecida en la literatura consultada, donde se destacan [78] [145], con el fin de comprobar la existencia de una concordancia entre los valores utilizados actualmente y los configurados por la herramienta.

Por otra parte, se tuvo en cuenta la información suministrada en la tabla 2.3 del capítulo 2 que muestra los parámetros más importantes del estándar IEEE 802.3ah, este especifica la utilización de dos tipos de PMD, estos son PMD 1000BASEPX-10-U/D y PMD 1000BASE-PX20-U/D, las cuales establecen los parámetros que debe cumplir el transmisor y los receptores que componen la red GEPON, así como el tipo de fibra óptica. Para este trabajo de grado se utiliza la PMD 1000BASE-PX20-D, ya que es la que define una mayor distancia entre OLT y ONT (20 Km). Se puede notar que el tipo de PMD escogido corresponde al sentido descendente, razón adicional por la cual se escogió, teniendo en cuenta que el análisis que se realiza es únicamente en este sentido.

En la tabla 4.13 se detallan los parámetros de transmisión definidos en la PMD 1000BASE-PX20-D:

Tabla 4.13. Parámetros de transmisión en PMD 1000BASE-PX20-D. Adaptado de [64]

Parámetro	1000BASE-PX20-D	Unidad
Tipo de Transmisor	Láser	
Velocidad máxima	1.25	Gbps
Longitud de Onda	1490	nm
Potencia máxima de Tx	+7	dBm
Potencia mínima de Tx	+2	dBm
Tipo de Fibra óptica	Monomodo	

En la tabla 4.14 se detallan los parámetros de recepción definidos en PMD 1000BASE-PX20-D:

Tabla 4.14. Parámetros de recepción en PMD 1000BASE-PX20-D. Adaptado de [64]

Parámetro	1000BASE-PX20-D	Unidad
Velocidad máxima	1.25	Gbps
Longitud de Onda	1310	nm
Potencia máxima de recepción promedio	-6	dBm
Sensibilidad máxima del receptor	-27	dBm
Umbral de detección de señal mínimo	-45	dBm

Teniendo en cuenta que para los servicios Internet/VoIP el estándar define los parámetros expuestos en las tablas 4.13 y 4.14, para los servicios de CATV Digital y CATV Analógico se tuvieron en cuenta los parámetros técnicos definidos en la tabla 4.15, los cuales fueron establecidos con base en trabajos recientes consultados en el estado del arte, parámetros de fabricantes de dispositivos para este tipo de redes y los parámetros que la herramienta de simulación define por defecto.

En resumen, la tabla 4.15 muestra los parámetros técnicos establecidos para las simulaciones de las topologías de red FTTH-GEPON.

Tabla 4.15. Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación. Por los autores.

PARÁMETROS TÉCNICOS	
SERVICIO DE INTERNET/VOIP	
Velocidad de transmisión	1.25 Gbps
Longitud de Onda	1490 nm (Banda S)
Potencia de Transmisión	+7 dBm
Tipo de modulación óptica	Externa
Sensibilidad de Recepción	-27 dBm
SERVICIO DE CATV DIGITAL	
Formato de modulación multinivel	16-QAM
Velocidad de transmisión	0.8 Gbps ²⁰
Portadora	1000 MHz
Tipo de modulación óptica	Externa
Potencia de transmisión	8 dBm
Longitud de Onda	1550 nm (Banda C)
Sensibilidad de Recepción	-16.3 dBm

²⁰ Velocidad de transmisión de 0.8 Gbps, definida por defecto en la herramienta de simulación. Esta velocidad resulta de la utilización del formato MPEG-2 para la transmisión de televisión digital con modulación 16-QAM, cuya velocidad por usuario es de 0.025 Gbps [90]; teniendo en cuenta que la cantidad máxima en una red FTTH-GEPON es de 32 usuarios, la velocidad sugerida es de 0.8 Gbps.

SERVICIO DE CATV ANALÓGICO	
Canales	247.25 MHz, 253.25 MHz, 259.25 MHz
Tipo de modulación óptica	Directa
Potencia de transmisión	9.86 dBm
Longitud de Onda	1550 (Banda C)
Sensibilidad de Recepción	-16.3 dBm
PARÁMETROS GENERALES	
Tipo de Fibra óptica	Monomodo Estándar (Corning SMF28)
Mecanismos de Protección	Ninguno
Distancia máxima entre OLT y ONT	20 Km

Para llevar a cabo el proceso de simulación y evaluar el desempeño, se tienen en cuenta los siguientes parámetros de desempeño: BER, Factor Q, Jitter, CSO, CNR, Potencia en recepción. Es preciso mencionar, que el desempeño se evaluó únicamente en sentido descendente o *Downstream*, por lo que para el sentido ascendente o *Upstream* no se realiza ningún análisis. La razón principal reside en el hecho de que en la herramienta OptSim® no es posible implementar el Protocolo de Control del Medio Compartido MPCP, por lo que se restringe la conexión de varios ONT para la evaluación del desempeño en sentido ascendente.

4.2.3. Fase 3: Ejecución de la simulación

Antes de realizar la simulación de los casos de estudio descritos en la fase 1, resultó de gran importancia verificar que las señales que se inyectan en el sistema sean similares a una señal teórica de referencia. Para lo anterior se adoptó, en primera instancia, la implementación de un modelo de simulación Back-To-Back²¹ para comprobar que la señal generada por el transmisor, la cual va ser inyectada a la red, tenga similitud a la señal teórica. De esta manera, se verificó la señal transmitida mediante una comparación del diagrama del ojo teórico con el obtenido en la simulación Back-To-Back, tanto para el servicio Triple Play con CATV digital como para el servicio Triple Play con CATV analógico.

➤ Simulación Back-To-Back para Internet/VoIP y CATV Digital.

En la figura 4.15 se muestra el transmisor y receptor para el caso del servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Digital implementados en el modo muestra de la herramienta OptSim®. Para su simulación, no se consideran efectos propios de la fibra óptica, como pérdidas o distorsiones.

²¹ Los elementos utilizados para la implementación del modelo Back to Back se describen en el anexo B.

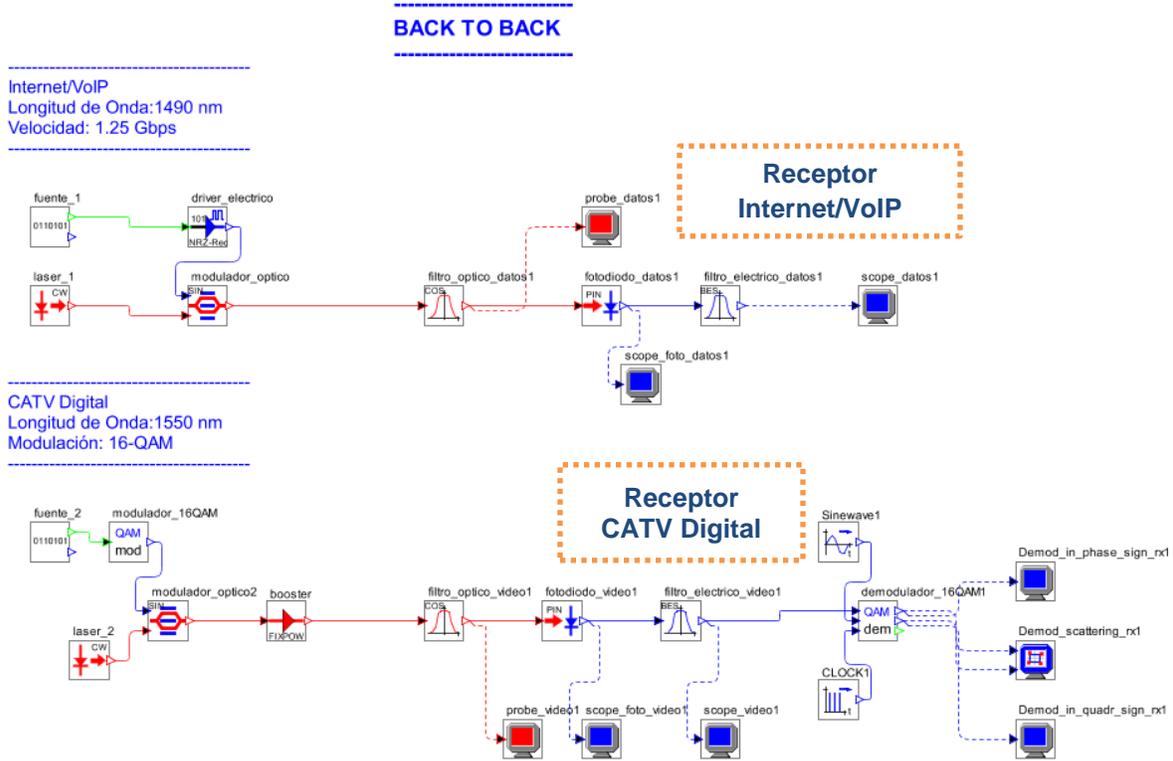


Figura 4.15. Sistema Back-To-Back para servicio Triple Play con CATV Digital.

En la figura 4.16 se muestra el diagrama del ojo a la salida del sistema Back-To-Back y el diagrama del ojo teórico para el servicio de Internet/VoIP.

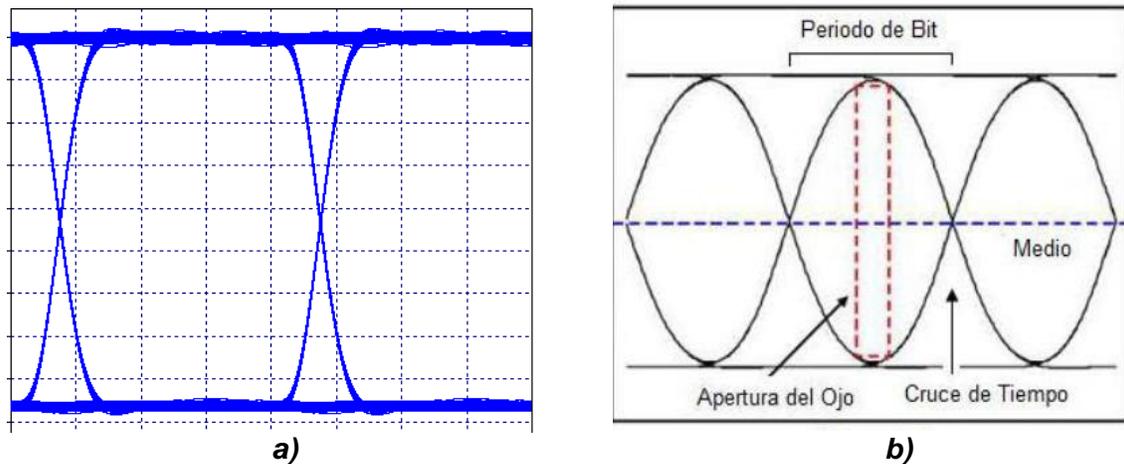


Figura 4.16. Diagrama del ojo para el servicio de Internet/VoIP: a) Back-to-Back, b) Teórico [106].

En la figura 4.17 se muestra el diagrama del ojo a la salida del sistema Back-To-Back y el diagrama del ojo teórico para el servicio de CATV digital que utiliza modulación 16-QAM²².

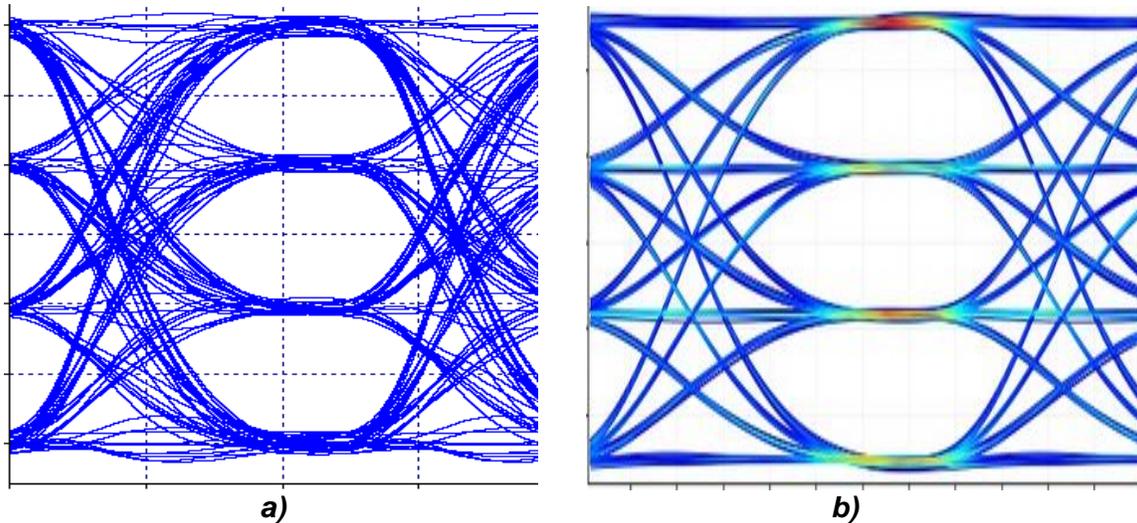


Figura 4.17. Diagrama del ojo para el servicio de CATV Digital con modulación 16-QAM: a) Back-to-Back, b) Teórico [146].

En la figura 4.18 se muestra el diagrama de constelación a la salida del sistema Back-To-Back y el diagrama de constelación teórico para un sistema con modulación 16-QAM.

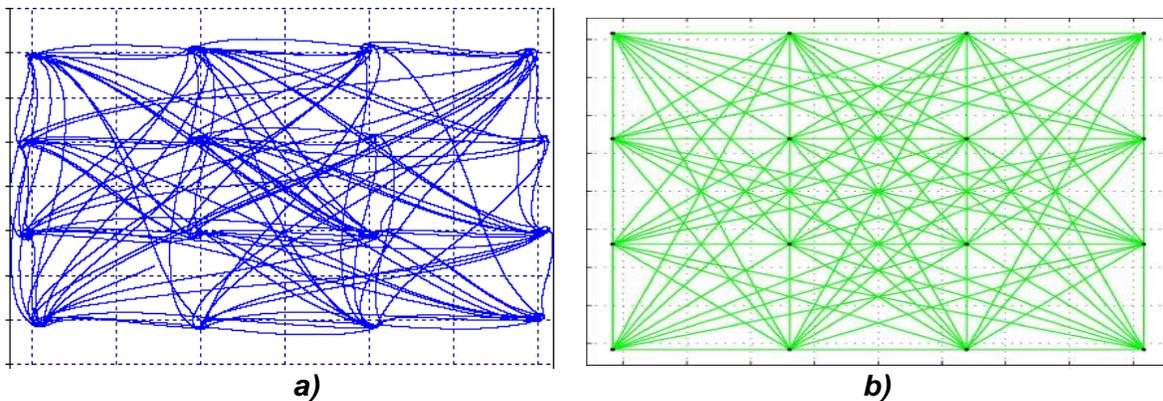


Figura 4.18. Diagrama de constelación para el servicio de CATV Digital con modulación 16QAM: a) Back-To-Back, b) Teórico [147].

Como se puede observar en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18, los diagramas respectivos para cada servicio son similares a los diagramas teóricos tomados como referencia, por lo cual se da garantía de que la señal generada en el transmisor es una señal válida para ser transmitida.

²² La descripción del esquema de modulación 16 QAM se realiza brevemente en el anexo B.

Por su parte, el diagrama de constelación fue utilizado como un referente para realizar el cálculo del BER particularmente para la modulación 16-QAM a partir del valor aproximado de la Magnitud del Vector de Error (EVM, *Error Vector Magnitude*) obtenido mediante la comparación entre la posición de un símbolo en el diagrama de constelación Back-To-Back y la posición del mismo símbolo en el diagrama de constelación adquirido en cada ONT, con base en el estudio planteado en [148]. El procedimiento matemático utilizado para dicho cálculo se muestra en el anexo C.

➤ **Simulación Back-To-Back para Internet/VoIP y CATV Analógico.**

En primer lugar se llevó a cabo la selección de las frecuencias correspondientes a las portadoras del servicio CATV analógico, para ello se consideró el plan de frecuencias NTSC y una configuración de red como se visualiza en la figura 4.19. Posteriormente se realizó un barrido con ternas de frecuencias separadas por 6 MHz, con el fin de determinar cuál terna genera el mayor nivel de intermodulación de segundo orden o el peor caso en cuestión de desempeño, con respecto al resto de ternas evaluadas en la frecuencia 506.5 MHz; esta frecuencia pertenece al conjunto de componentes de intermodulación de segundo orden y permite determinar el parámetro CSO, debido a que tiene el nivel más grande de intermodulación. En la tabla 4.16, se observa el conjunto de ternas con su respectivo nivel de intermodulación.

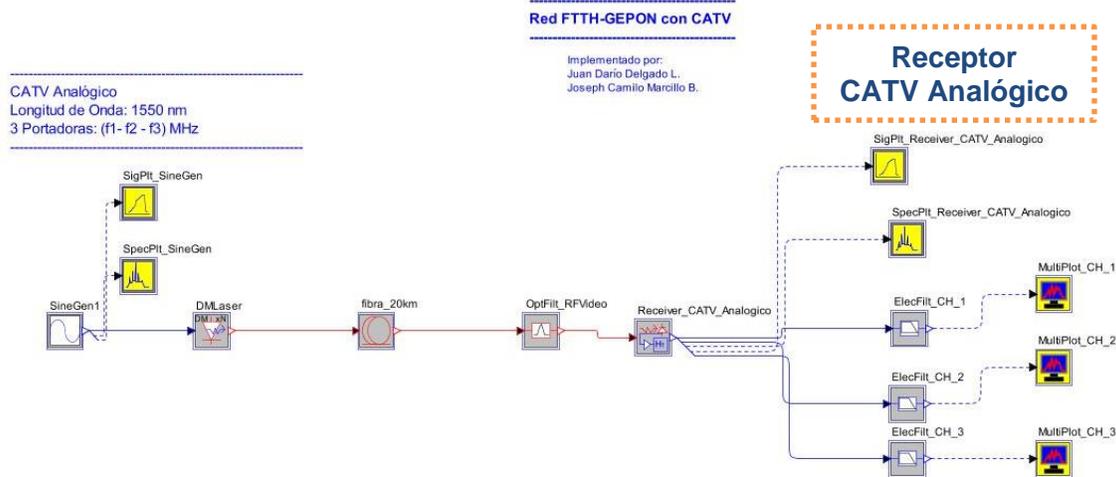


Figura 4.19. Configuración para selección de portadoras.

Tabla 4.16. Niveles de intermodulación de segundo orden. Por los autores.

Frecuencias [MHz]	IM2[dB]
55.25, 61.25 y 67.25	-
91.25, 97.25 y 103.25	-33.5
103.25, 109.25 y 115.25	-29.10
115.25, 121.25 y 127.25	-34.01
127.25, 133.25 y 139.25	-40
139.25, 145.25 y 151.25	-37.92
151.25, 157.25 y 163.25	-38.76

163.25, 169.25 y 175.25	-32.97
175.25, 181.25 y 187.25	-29.35
187.25, 193.25 y 199.25	-34.06
199.25, 205.25 y 211.25	-36.22
211.25, 217.25 y 223.25	-34.71
223.25, 229.25 y 235.25	-36.35
235.25, 241.25 y 247.25	-31.25
247.25, 253.25 y 259.25	-28.57
259.25, 265.25 y 271.25	-33.38
271.25, 277.25 y 283.25	-33.44
283.25, 289.25 y 295.25	-32.63
295.25, 301.25 y 307.25	-34.51

En la tabla 4.16 se observa que la terna con mayor nivel de intermodulación de segundo orden corresponde a las frecuencias 247.25, 253.25 y 259.25 MHz, por lo tanto, es la terna que se seleccionó para realizar el estudio del parámetro CSO en las diferentes topologías. En la figura 4.20 se observan los niveles de potencias de las portadoras seleccionadas en espectro eléctrico.

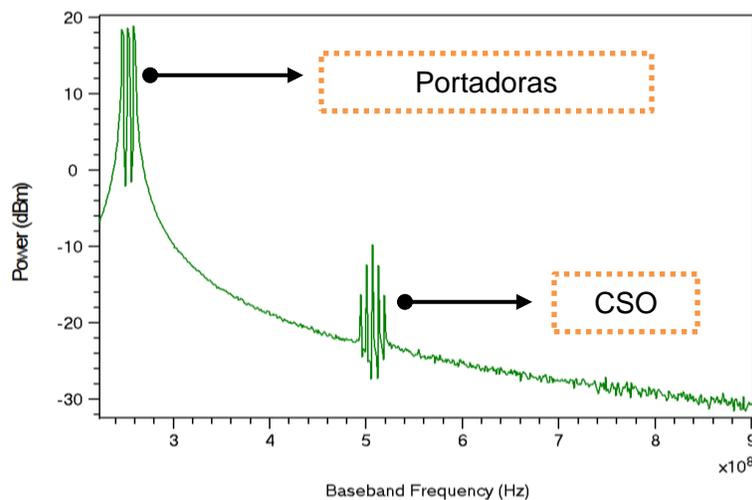


Figura 4.20. Componentes de intermodulación de segundo orden.

En este estudio no se consideró la componente de intermodulación de tercer orden debido a que se posicionaba por fuera del plan de frecuencias, y no tenía caso estudiarlo porque no afectaba a ningún canal del plan de frecuencias NTSC. En la figura 4.21 se tiene un caso particular en el que se observan las componentes de intermodulación de segundo y tercer orden generadas por las frecuencias 577.25, 583.25 y 589.25 MHz.

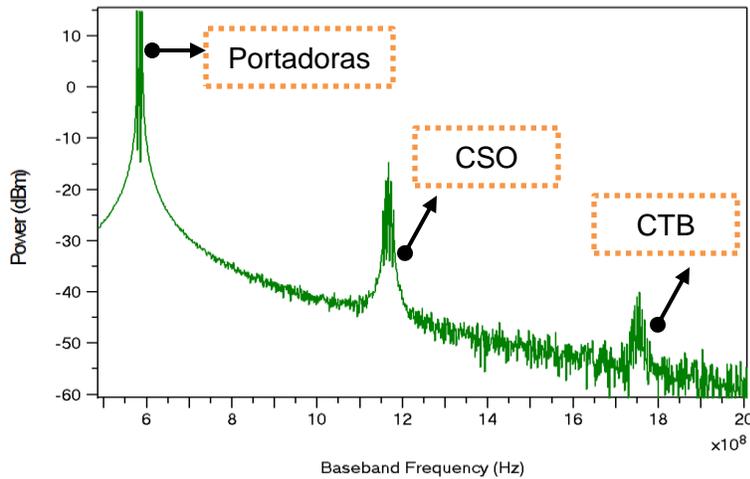


Figura 4.21. Componentes de intermodulación de segundo y tercer orden.

En la figura 4.22 se muestra el transmisor y receptor para el caso del servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Analógico implementados en el modo bloque de la herramienta OptSim®. Para su simulación, no se consideran efectos propios de la fibra óptica, como pérdidas o distorsiones.

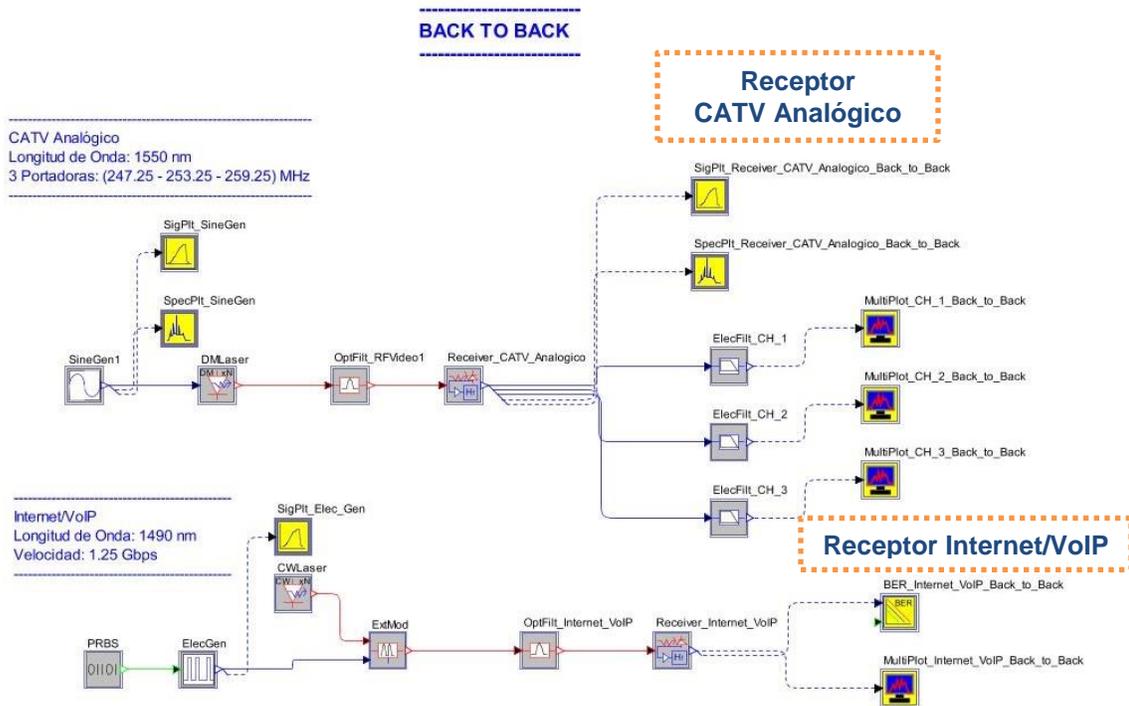


Figura 4.22. Sistema Back-To-Back para servicio Triple Play con CATV Digital.

En la figura 4.23 se muestra el diagrama del ojo a la salida del sistema Back-To-Back y el diagrama del ojo teórico para el servicio de Internet/VoIP.

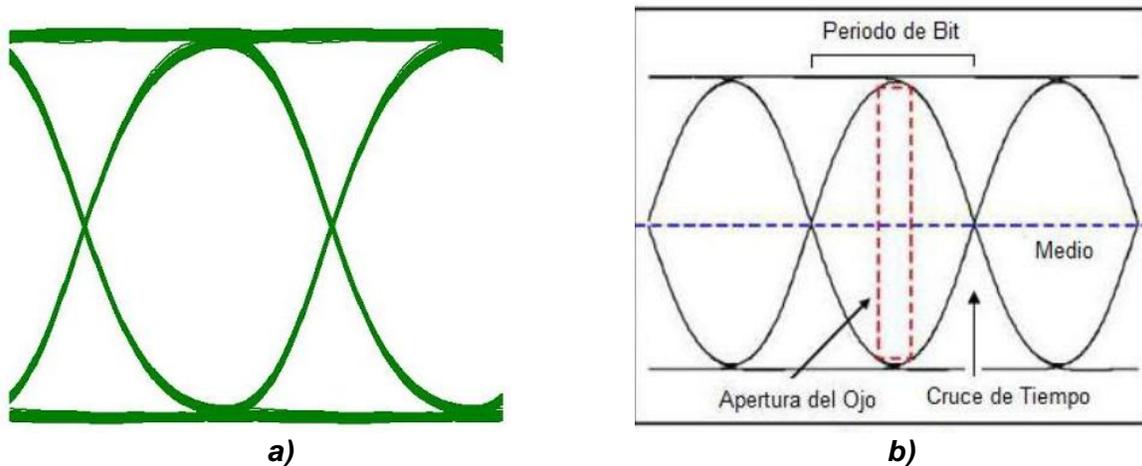


Figura 4.23. Diagrama del ojo para el servicio de Internet/VoIP:
a) Back-to-Back, b) Teórico [106].

En la figura 4.24 se muestran las portadoras a la salida del sistema Back-To-Back para el servicio de CATV Analógico, sin ningún tipo de distorsión por intermodulación.

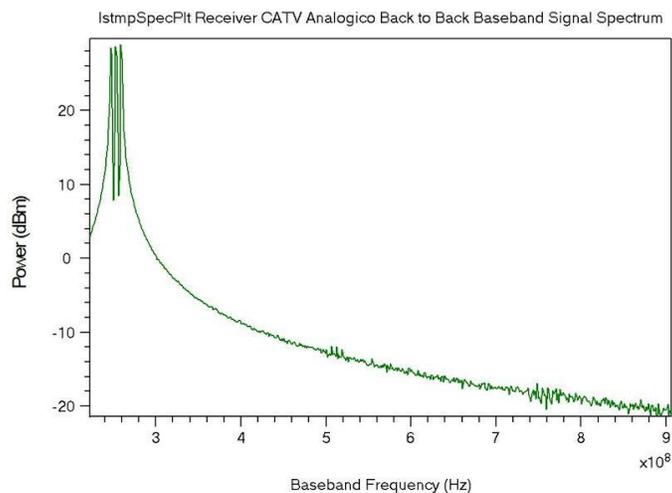


Figura 4.24. Portadoras para la transmisión del servicio CATV Analógico.

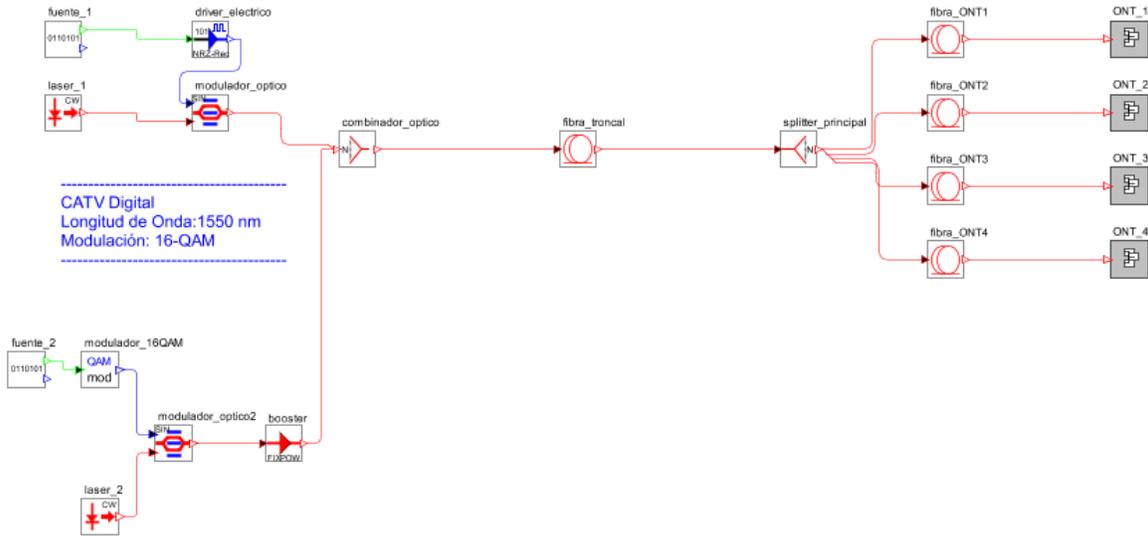
Ahora bien, teniendo en cuenta la validez de las señales que van a ser transmitidas por la red, se procedió a implementar cada una de las topologías en la herramienta OptSim® en sus dos modos de simulación, cuyos elementos utilizados se describen en el anexo B. Las topologías implementadas en cada modo de simulación se muestran en las figuras 4.25, 4.26 y 4.27. Cabe resaltar que los dispositivos que componen el receptor (ONT), fueron encapsulados dentro de un solo elemento utilizando el modelo de jerarquías de OptSim® con el fin de simplificar el esquema de red.

**Red FTTH-GEPON con Triple Play
Topología en Árbol**

Implementado por:
Juan Darío Delgado L.
Joseph Camilo Marcillo B.

Internet/VoIP
Longitud de Onda: 1490 nm
Velocidad: 1.25 Gbps

CATV Digital
Longitud de Onda: 1550 nm
Modulación: 16-QAM

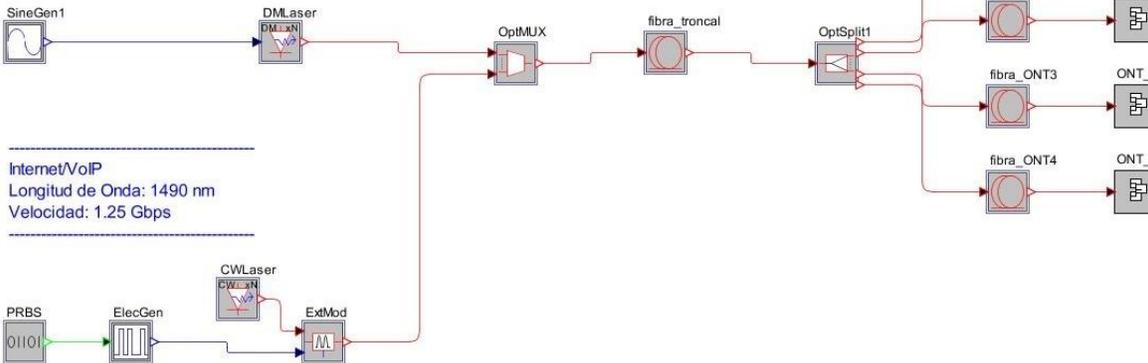


a)

**Red FTTH-GEPON con Triple Play
Topología en Árbol**

Implementado por:
Juan Darío Delgado L.
Joseph Camilo Marcillo B.

CATV Analógico
Longitud de Onda: 1550 nm
3 Portadoras: (247.25 - 253.25 - 259.25) MHz



b)

Figura 4.25. Topología de red en Árbol: a) Implementada en el modo muestra, b) Implementada en el modo bloque.

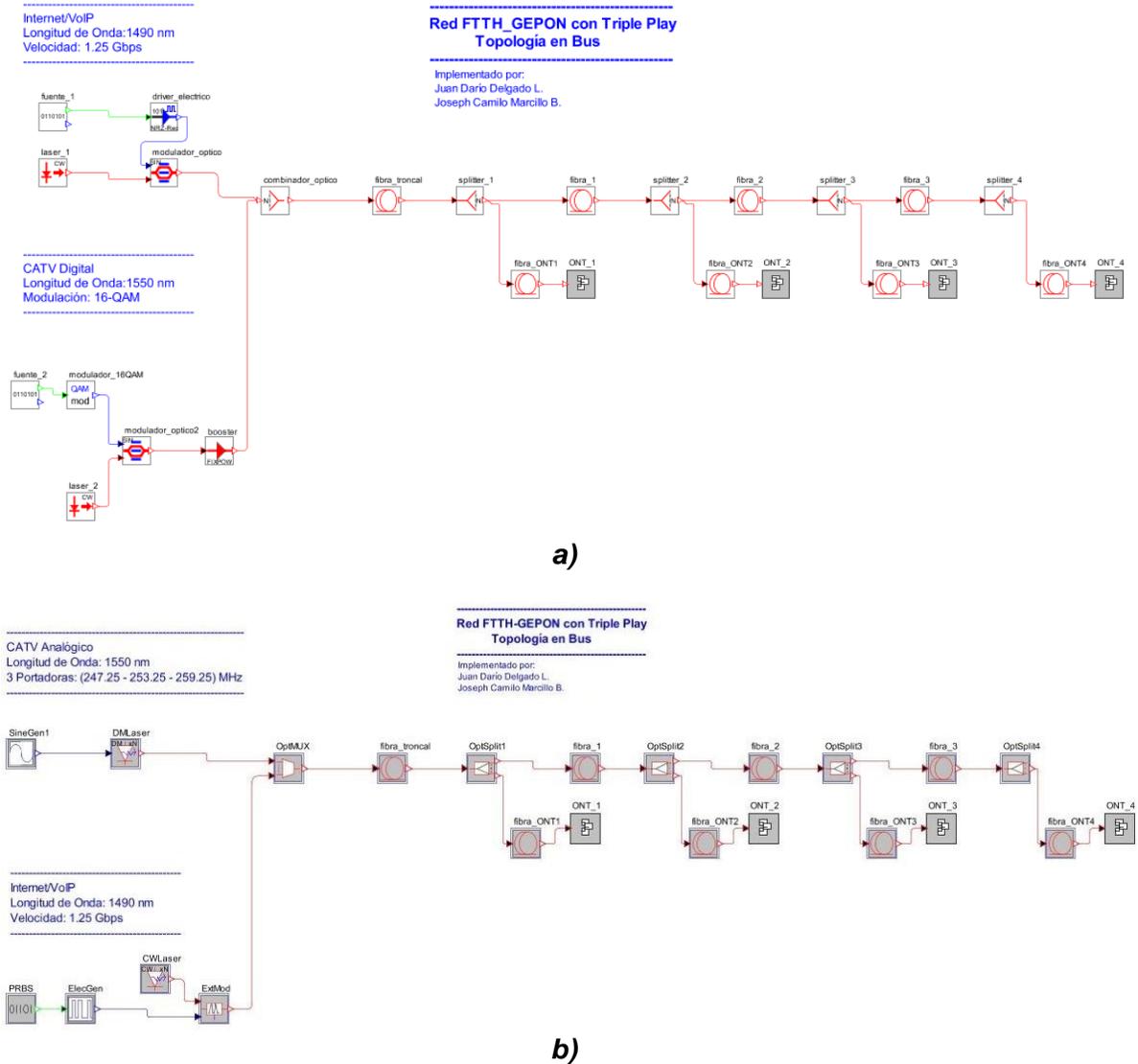
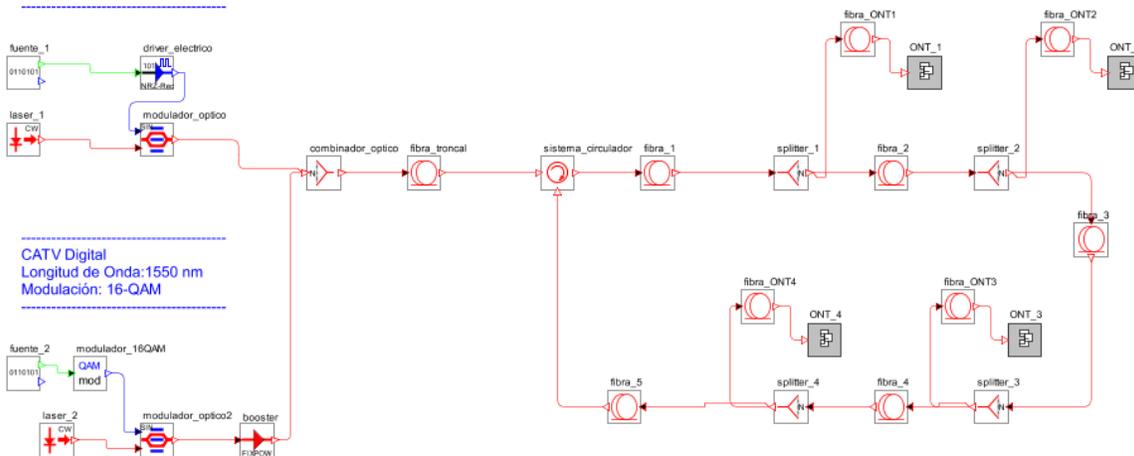


Figura 4.26. Topología de red en Bus: a) Implementada en el modo muestra, b) Implementada en el modo bloque.

**Red FTTH_GEPON con Triple Play
Topología en Anillo**

Implementado por:
Juan Darío Delgado L.
Joseph Camilo Marcillo B.

Internet/VoIP
Longitud de Onda: 1490 nm
Velocidad: 1.25 Gbps

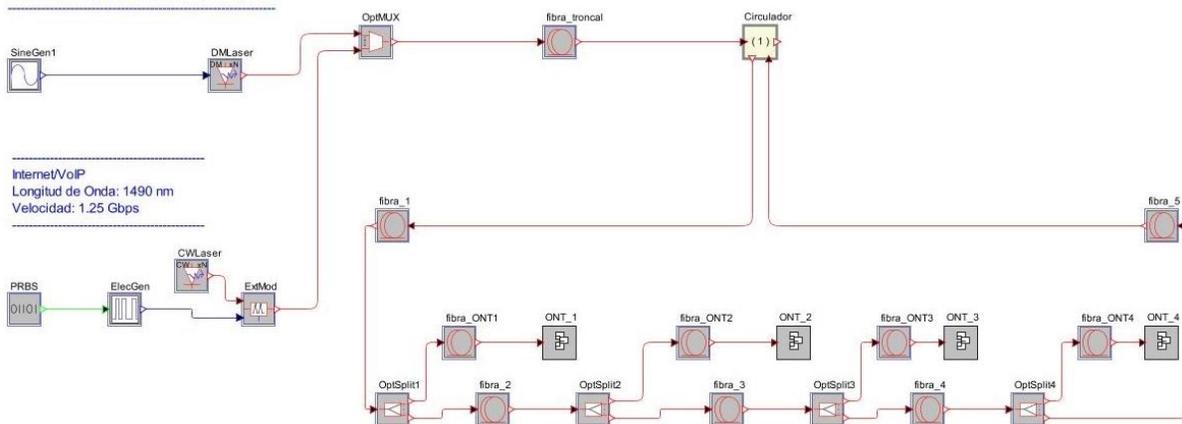


a)

**Red FTTH-GEPON con Triple Play
Topología en Anillo**

Implementado por:
Juan Darío Delgado L.
Joseph Camilo Marcillo B.

CATV Analógico
Longitud de Onda: 1550 nm
3 Portadoras: (247.25 - 253.25 - 259.25) MHz



b)

Figura 4.27. Topología de red en Anillo: a) Implementada en el modo muestra, b) Implementada en el modo bloque.

Posteriormente, se realizaron las configuraciones de los casos de estudio mencionados en la fase 1 y se procedió a ejecutar las simulaciones. En el caso del modo muestra, se configuró un tiempo de simulación de 512 ns. Como se puede apreciar, el tiempo de

simulación es mayor que el utilizado convencionalmente, puesto que para este trabajo de grado, se requiere trabajar con dos bandas diferentes (Banda S y Banda C) para lo cual el simulador automáticamente configura el valor de muestras por bit, siendo este un valor muy alto que necesita una cantidad de tiempo considerable para que el simulador pueda procesar la información y mostrar resultados confiables.

4.2.4. Fase 4: Evaluación y Análisis de los resultados de la simulación

A continuación se muestran las gráficas²³ que ilustran los resultados obtenidos en cada caso descrito. Al finalizar cada conjunto de gráficas correspondientes a cada servicio, se realiza la interpretación y análisis para luego determinar la topología con mejor comportamiento con base en los lineamientos que se establecen a continuación:

- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el parámetro BER, en el servicio Internet/VoIP y CATV digital, se determina a partir de sus niveles más bajos en una topología (o topologías) con relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más bajos de error de transmisión en el enlace.
- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el factor Q, en el servicio Internet/VoIP y CATV digital, se determina a partir de sus niveles más altos en una topología (o topologías) en relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación en el factor Q, identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más altos de calidad en el enlace.
- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el parámetro *jitter*, en el servicio Internet/VoIP y CATV digital, se determina a partir de sus niveles más bajos en una topología (o topologías) con relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación en el *jitter*, identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más bajos de ruido de fase en el enlace.
- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el parámetro de potencia óptica de recepción, en el servicio Internet/VoIP, CATV digital y CATV analógico, se determina a partir de sus niveles más altos en una topología (o topologías) con relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación en el parámetro de potencia óptica de recepción, identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más bajos de atenuación en el enlace.
- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el parámetro CNR, en el servicio CATV analógico, se determina a partir de sus niveles más altos en una topología (o topologías) con relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación en el parámetro de Relación Portadora a Ruido, identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más bajos de ruido en el enlace.
- La topología (o topologías) con mejor desempeño en el parámetro CSO, en el servicio CATV analógico, se determina a partir de sus niveles más bajos en una topología (o topologías) con relación a las otras topologías (o topología). Este tipo de evaluación

²³ Las gráficas que ilustran los resultados fueron obtenidas con ayuda del software Matlab®.

en el parámetro CSO, identifica que topología (o topologías) resalta con los niveles más bajos de distorsión por intermodulación en el enlace.

En el caso cuando todas las topologías presentaran niveles similares en cualquiera de los parámetros anteriormente mencionados, se determinó que todas se ajustan al comportamiento deseado en el sistema, según los niveles definidos en el capítulo tres.

4.2.4.1. Caso de Estudio No. 1. Servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Digital

Se llevó a cabo la simulación del caso de estudio No. 1 en el que se proporciona un servicio Triple Play con formado por Internet/VoIP y CATV Digital con sus respectivos casos de estudio, en el cual se obtuvieron resultados de los parámetros de desempeño descritos anteriormente, los cuales se depositan en el anexo D.

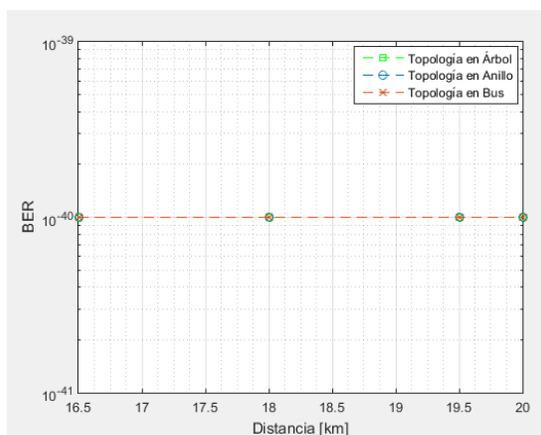
4.2.4.1.1. Caso de Estudio No.1a. Distancias iguales entre el OLT y cada ONT.

En este caso, todos los ONT se encuentran a la misma distancia con relación al OLT, en cada topología de red.

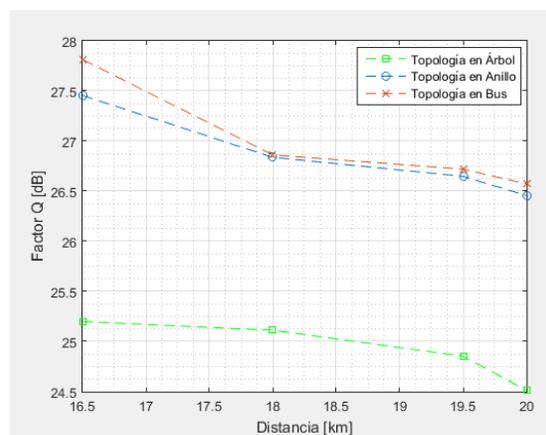
- **Servicio de Internet/VoIP.** A continuación se ilustra el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio de Internet/VoIP con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No.1a.

- **ONT 1**

La figura 4.28 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.



a)



b)

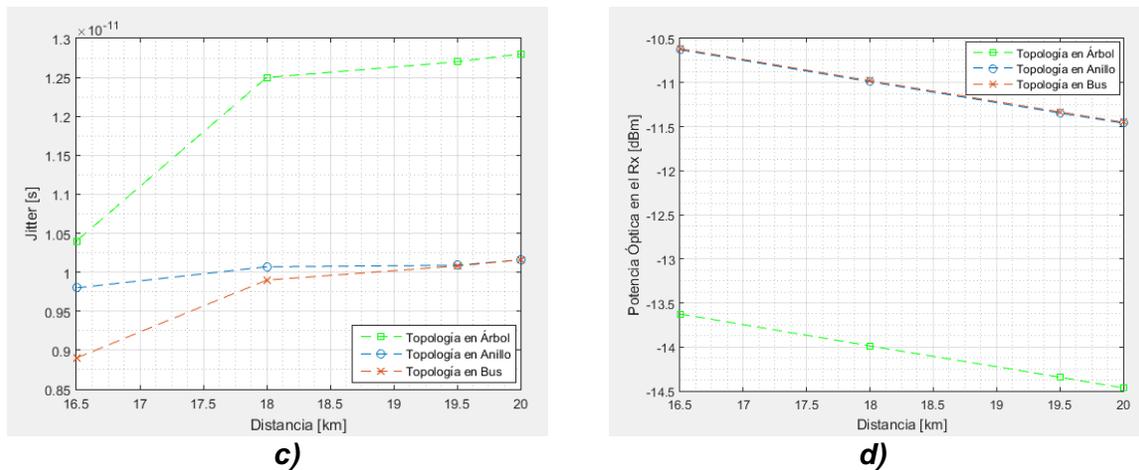
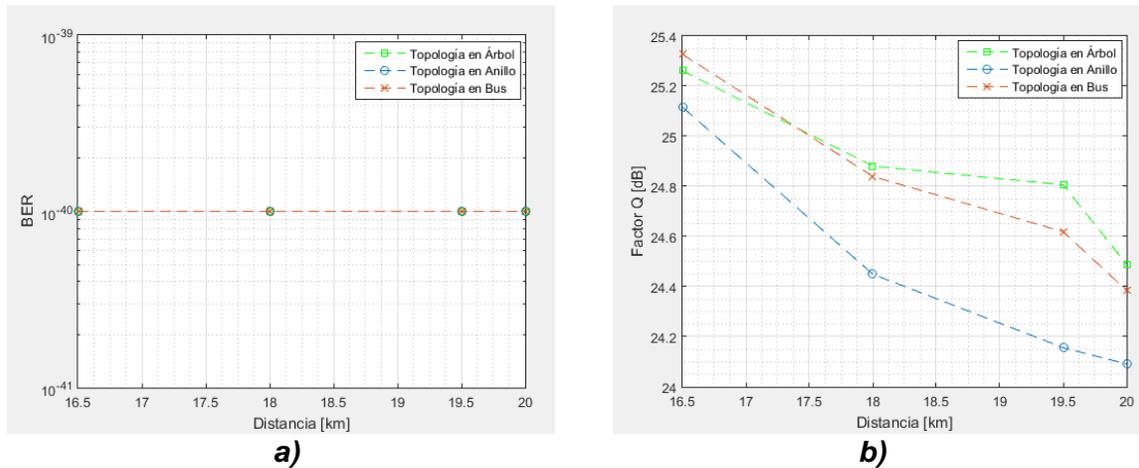


Figura 4.28. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT 2

La figura 4.29 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.



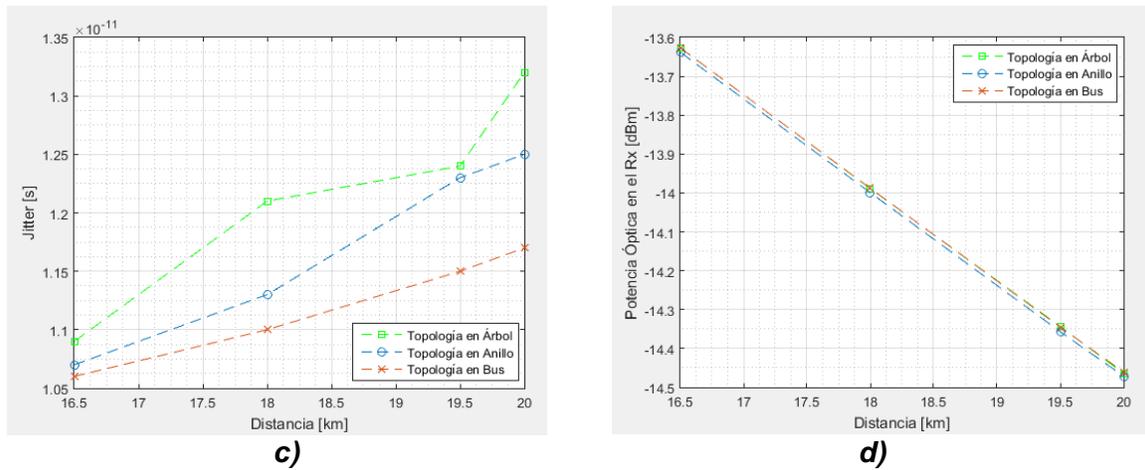
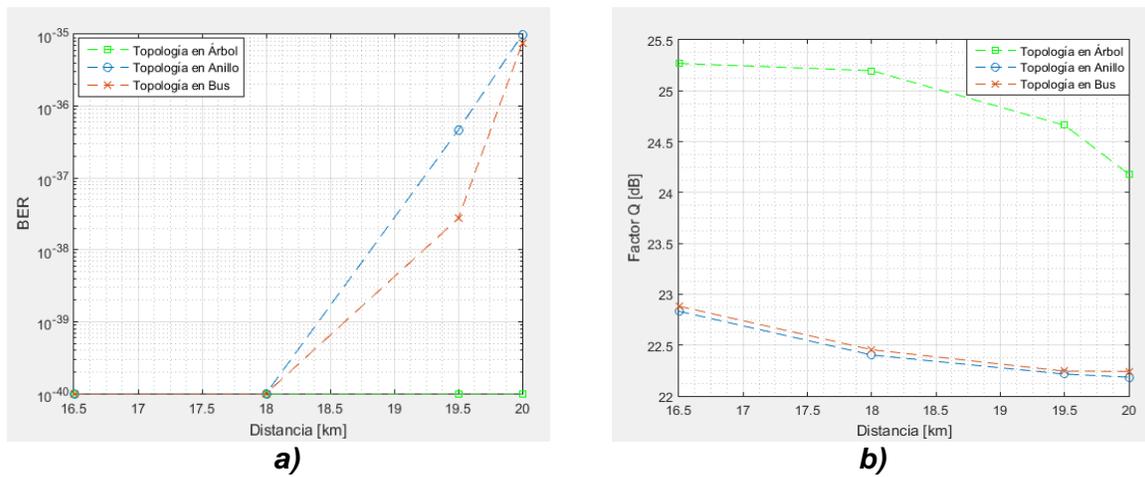
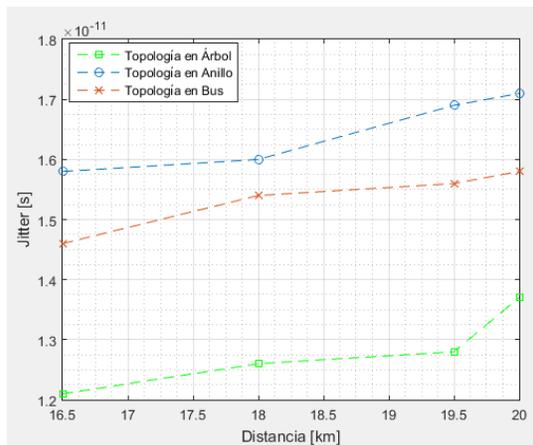


Figura 4.29. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

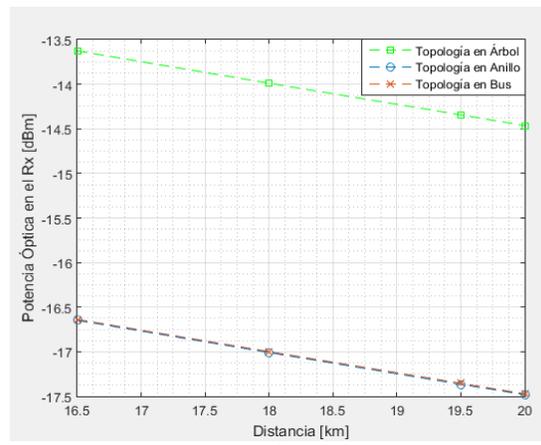
- ONT 3

La figura 4.30 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.





c)

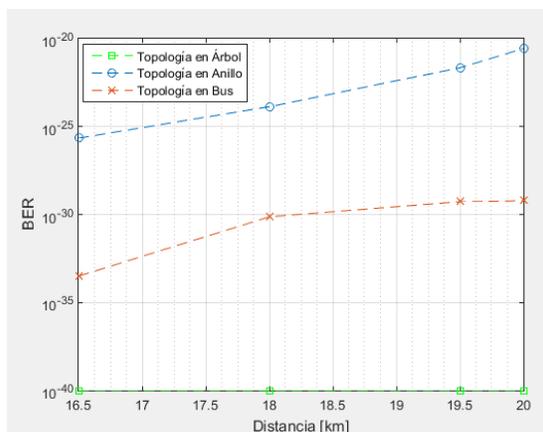


d)

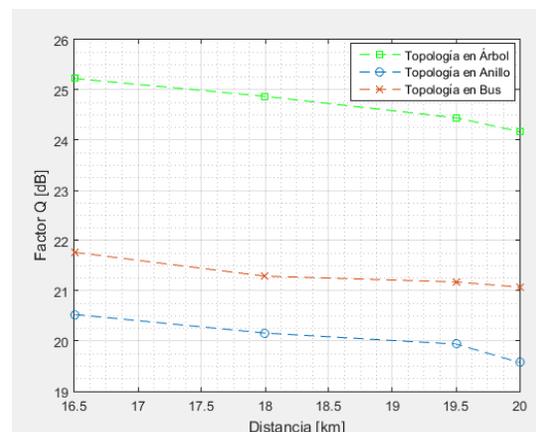
Figura 4.30. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT 4

La figura 4.31 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.



a)



b)

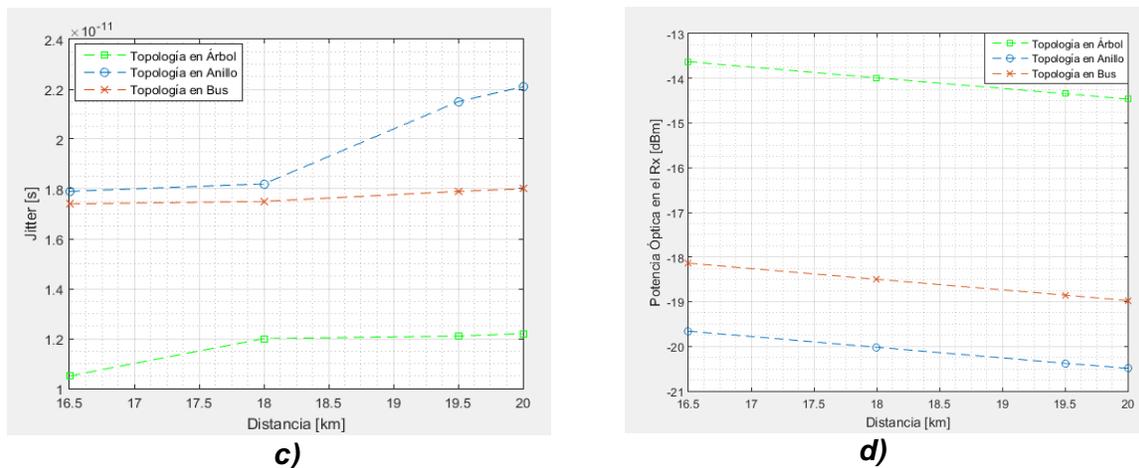


Figura 4.31. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1a – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- Del anterior grupo de gráficos que representan los resultados obtenidos en las simulaciones, se puede observar que los parámetros de desempeño del servicio Internet/VoIP evaluados mantienen una dependencia de la distancia existente entre el OLT y cada ONT que compone la red y se ven afectados por la topología mediante la cual esta se encuentre configurada. Además, se puede observar que los resultados de la tasa de error de bit y del Jitter se ven directamente relacionados con la distancia, esto es, al incrementar la separación entre el OLT y el ONT, sus valores aumentan. Por el contrario, los resultados de los parámetros Factor Q y potencia en recepción se ven inversamente relacionados con la distancia.
- En las figuras 4.28a y 4.29a se observa que los resultados para el parámetro BER en las tres topologías de red no sufre ningún cambio, permaneciendo en un valor constante de 10^{-40} a medida que aumenta la distancia. Como se sabe, el BER y el Factor Q están relacionados matemáticamente, lo que supondría que al observar el comportamiento de este último, el valor del BER tendría que también mostrar una variación. Este comportamiento del parámetro BER se debe a la manera de mostrar los resultados de la herramienta de simulación en modo muestra, puesto que cuando los valores de este parámetro son bastante pequeños (inferiores a 10^{-40}), la herramienta mostrará el valor de 10^{-40} .
- En las figuras 4.28b, 4.28c y 4.28d se puede apreciar que la red con topología en bus y anillo presenta un mejor desempeño respecto a la topología de red en árbol, la razón por la cual esto ocurre es porque el ONT 1 en las topologías en bus y anillo está conectado mediante un *splitter* con relación 1:2, mientras que en la topología de árbol, está conectado a un *splitter* de relación 1:4. Un *splitter* de relación 1:2 introducirá menos atenuación en comparación con uno de relación 1:4, por esto la justificación de dicho comportamiento.

- Como se observa en los resultados del ONT 2 mostrados por la figura 4.29, se tiene una similitud en el comportamiento de las tres topologías, lo que hace que si bien las topologías de red son distintas, las condiciones de atenuación y pérdidas son más cercanas. Sin embargo, se puede observar que el parámetro Factor Q, con la topología en anillo presenta niveles más bajos respecto a las otras topologías. Estos resultados obedecen a que la señal óptica experimenta los efectos propios de un tramo de fibra óptica adicional (entre el circulador y el primer *splitter*) en el caso de la topología en anillo, afectando su desempeño.
- En la figura 4.30 se puede observar que los parámetros de desempeño se ven afectados por el cambio de topología de red, en donde las topologías en bus y anillo tienen un impacto mayor y a la vez un efecto negativo, pues los valores de los parámetros de desempeño se ven drásticamente afectados, mostrando un aumento en los resultados del parámetro BER y Jitter, y una disminución en los parámetros Factor Q y Potencia recibida, a medida que la distancia hacia el OLT aumenta. Por otra parte, se observa que con la red con topología en árbol se presenta un mejor desempeño respecto a las otras, estos resultados responden a la cantidad de tramos de fibra óptica y *splitters* que la señal óptica atraviesa, pues para las topologías en anillo y bus hay más cantidad de elementos con relación a la topología en árbol, por ende experimenta mayor atenuación, mayores pérdidas y efectos propios del medio de transmisión. Teniendo en cuenta lo anterior, se observa como los mejores resultados de los parámetros de desempeño se obtienen cuando se utiliza la topología red en árbol, así como también la similitud en el comportamiento de las topologías en anillo y bus, debido a su semejante configuración física de red, en donde la diferencia entre ellas se presenta en el tramo adicional de fibra óptica que la topología en anillo presenta después del circulador, en comparación con la topología en bus. En gran parte, por esta razón se presenta un comportamiento levemente mejor en cuanto al desempeño en la topología de red en bus.
- En la figura 4.31 se puede observar como los parámetros de desempeño se ven claramente impactados por la topología de red, donde los resultados se ven afectados en mayor magnitud con relación a la figura 4.30. De igual manera, se evidencia que la topología de red en árbol sigue siendo la red con mejor comportamiento, puesto que presenta mejores resultados con relación a las demás. Por su parte, con la topología de red en anillo se presentan niveles más altos de BER, lo que indica la presencia de más bits errados. Así mismo, los niveles de calidad y de potencia recibida presentan una disminución en sus niveles a medida que aumenta la distancia. Estos resultados se deben a la cantidad de tramos de fibra y de *splitters* por los que la señal debe atravesar para llegar a su destino, en este caso el ONT 4, experimentando más atenuación, pérdidas y otros efectos que caracterizan a la fibra óptica. Así pues, se obtiene un mejor desempeño con la topología de red en árbol.
- A partir de la interpretación realizada anteriormente se puede concluir que la topología de red presenta un impacto en los parámetros de desempeño del servicio de Internet/VoIP, lo cual era el comportamiento que se esperaba visualizar y que motivó el planteamiento de los objetivos del trabajo de grado. Si bien se

pudo notar que el desempeño se vio afectado negativamente en los nodos ONT 3 y ONT 4 con la topología en anillo, los valores correspondientes a cada parámetro de desempeño se encuentran dentro del margen establecido. Por otra parte, considerando la minuciosa lectura y consulta de los trabajos relacionados que hicieron parte del estado del arte en los cuales el común denominador del comportamiento del desempeño reside en el hecho de que a medida que la distancia desde el OLT al ONT aumenta, los valores de sus parámetros desmejoran, observándose el mismo comportamiento en los resultados obtenidos en este trabajo de grado, tal como se observó en las figuras previamente exhibidas. En otras palabras, el comportamiento obtenido es acorde a lo observado en la literatura consultada.

A manera de síntesis, a partir del análisis realizado y tomando en cuenta las figura 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 y las condiciones que se establecieron previamente para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) que presentan un mejor desempeño en cada ONT, como se observa en la tabla 4.17.

Tabla 4.17. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No.1a. Por los autores.

	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus Topología en anillo			
ONT 2	Topología en árbol Topología en bus Topología en anillo	Topología en árbol Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo Topología en árbol	Topología en bus Topología en anillo Topología en árbol
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

En la tabla 4.17 se puede observar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, es la topología en árbol en la mayoría de nodos ONT. Por lo tanto se puede establecer que la topología en árbol es la que mejor se ajusta a las condiciones determinadas en el comienzo de esta sección.

- **Servicio de CATV Digital.** A continuación se muestra el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio CATV Digital con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No. 1a.

- **ONT 1**

La figura 4.32 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.

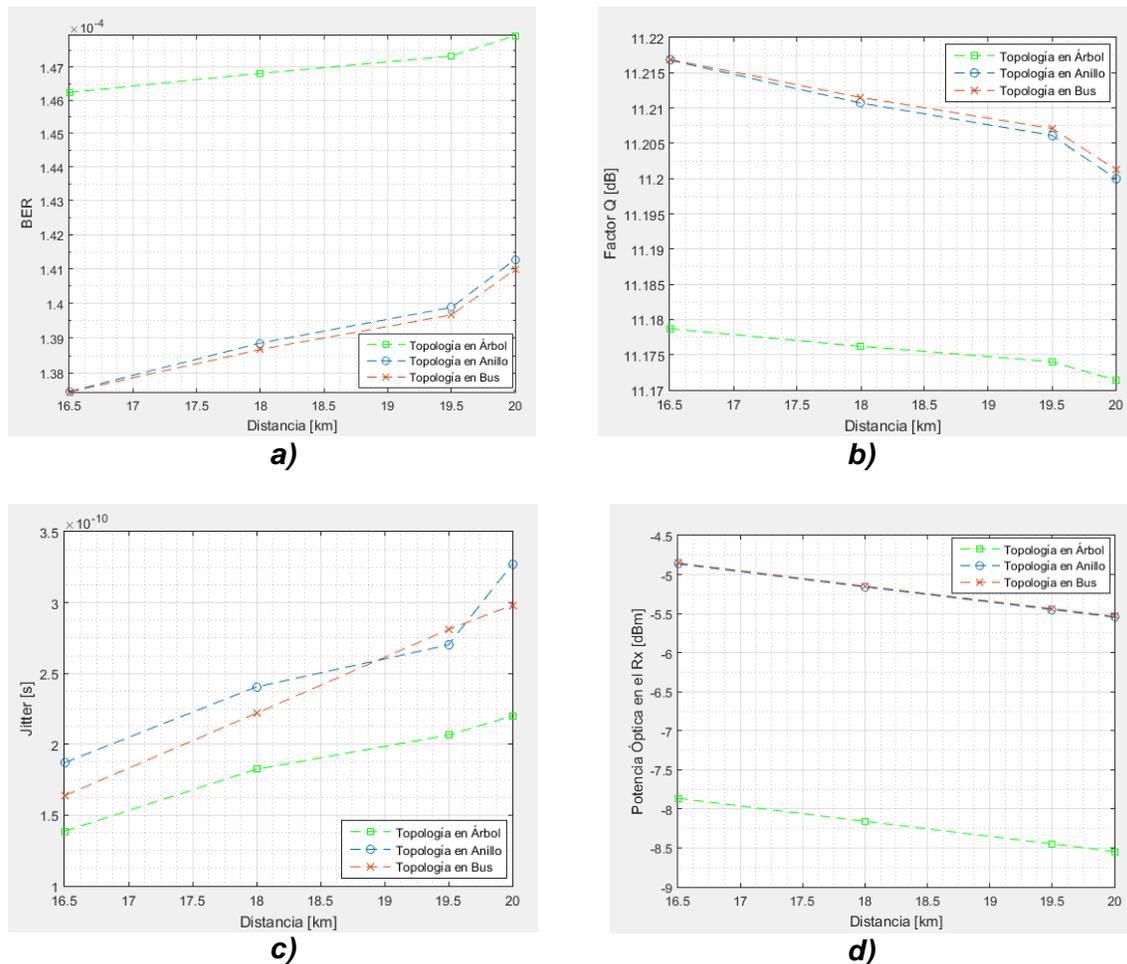


Figura 4.32. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 2**

La figura 4.33 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.

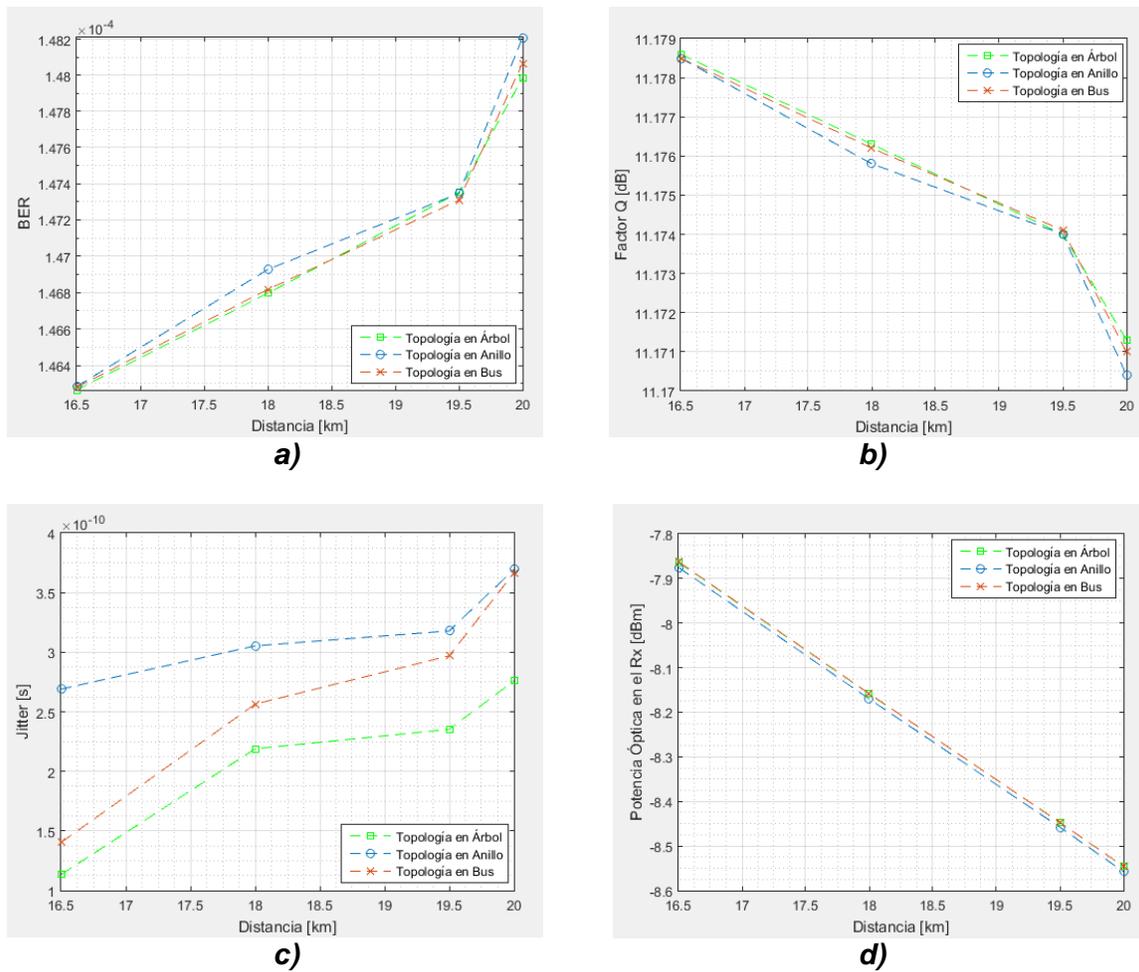


Figura 4.33. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 3**

La figura 4.34 ilustra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.

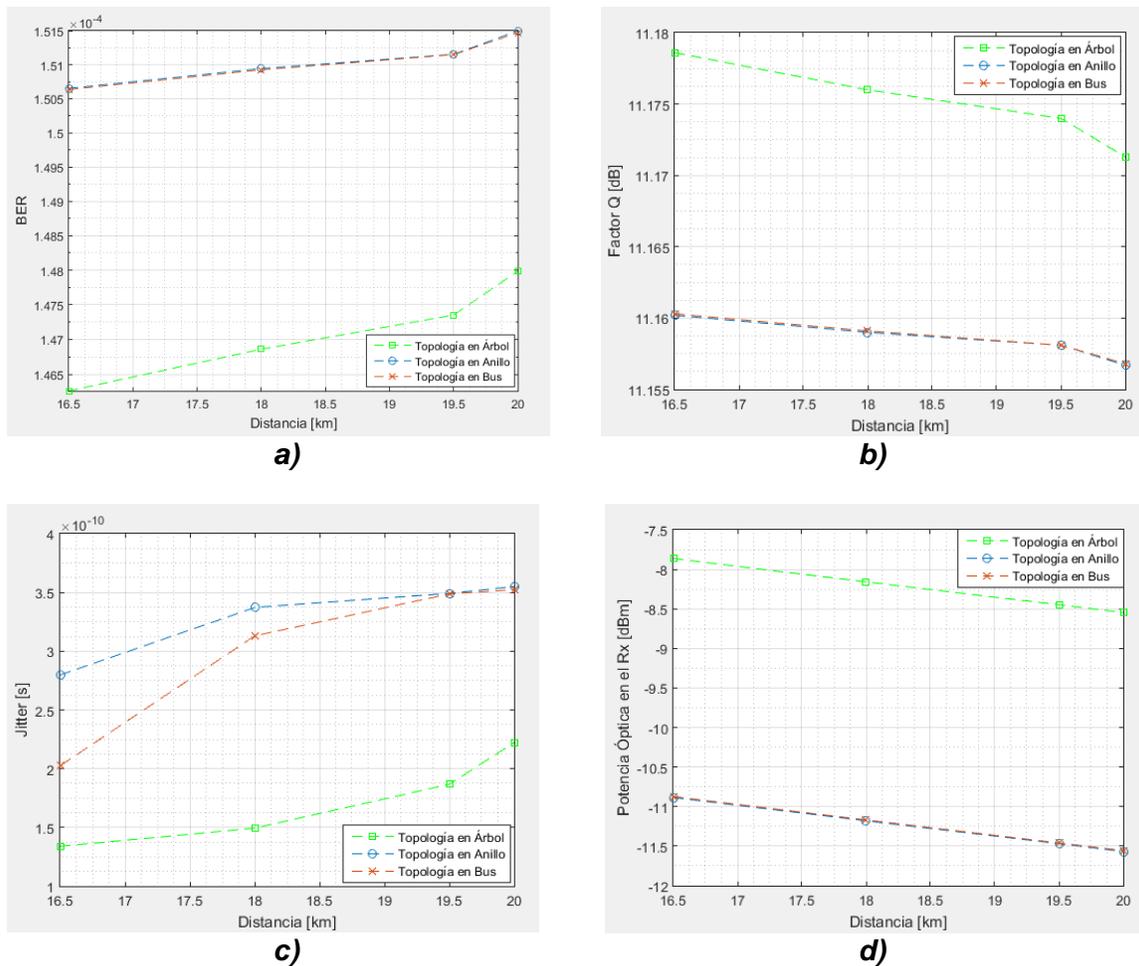


Figura 4.34. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 4**

La figura 4.35 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.

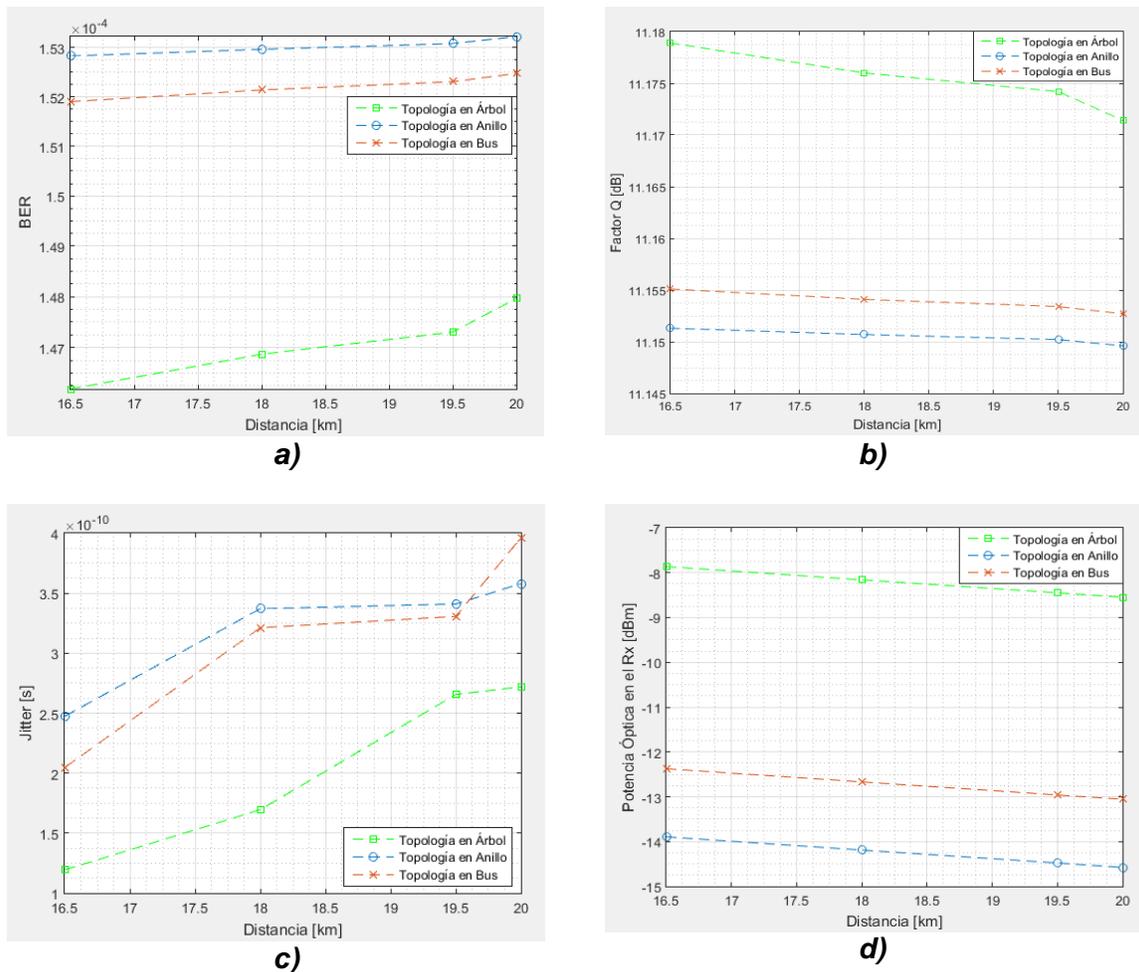


Figura 4.35. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1a – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- Del grupo de gráficos que constituyen los resultados obtenidos en las simulaciones para el servicio CATV Digital, se puede observar que los parámetros de desempeño evaluados se ven afectados por la distancia entre el OLT y cada ONT. Además, se observa que con cada topología de red, los resultados para cada parámetro de desempeño se comportan de manera diferente. Se observa que los resultados de la tasa de error de bit y del Jitter se ven directamente relacionados con la distancia, es decir, sus valores aumentan al incrementar la distancia que separa el OLT con cada ONT. En cambio, los resultados de los parámetros Factor Q y potencia en recepción se ven inversamente relacionados con la distancia. De aquí se puede concluir que este servicio tiene un comportamiento similar al servicio Internet/VoIP.
- En la figura 4.32 se observa que se obtiene un mejor desempeño con las topologías de red en bus y anillo, en contraste con la topología de red en árbol.

Este comportamiento se debe a la utilización de un *splitter* con relación 1:2 para conectar el ONT 1 en estas dos topologías, de la misma manera que se concluyó para el servicio de Internet/VoIP. Además, se observa una gran similitud en el desempeño obtenido con las topologías en bus y anillo, presentando un mejor comportamiento de los parámetros BER y Factor Q en la topología en bus. Esto se debe a que la topología en anillo presenta un tramo de fibra óptica antes del primer *splitter*, a diferencia de la topología en bus, lo que supone que la señal experimenta pérdidas y efectos propios causados por este tramo de fibra óptica.

- En la figura 4.33 se observa que para el ONT 2 el comportamiento de los parámetros de desempeño es similar con las tres topologías. Como se mencionó anteriormente, estos resultados se deben a que las condiciones de atenuación y pérdidas es similar en las tres topologías para este nodo. Sin embargo, se observa que se obtiene mejores niveles de BER y Factor Q con las topologías en árbol y bus, en comparación con la red en anillo, aunque la diferencia no es excesiva.
- En la figura 4.34 se observa como los parámetros de desempeño se ven afectados por el cambio de topología de red, presentándose un mejor desempeño con la topología de red en árbol. Además se puede apreciar que las topologías de red en bus y anillo presentan valores muy similares en cada parámetro de desempeño. Si bien las topologías en bus y anillo presentan valores más altos de BER respecto a la red en árbol, dichos valores se mantienen aproximados al valor tomado como referencia que están en el orden de 10^{-4} . De igual manera sucede con el Factor Q, cuyos resultados están representados por la figura 4.34b, en donde se aprecia que la diferencia entre los valores de este parámetro con la red en árbol y las otras dista de aproximadamente 0.02 dB. Sin embargo existe una brecha un poco más amplia en los valores de potencia recibida en el ONT 3, cuyos valores se representan en la figura 4.34d, en donde este parámetro tiene una diferencia de -3dB entre la topología en árbol y las demás.
- En la figura 4.35 se puede observar que la topología de red tiene un impacto más notorio en los parámetros de desempeño, evidenciando que el desempeño para el ONT 4 se ve drásticamente afectado por la topología, obteniéndose con la topología en árbol un mejor desempeño respecto a las demás. Se puede notar que con la topología en anillo se presentan los niveles más altos de BER y Jitter y los niveles más bajos de Factor Q y Potencia recibida en contraste con la topología en árbol. Estos resultados se deben a que el ONT 4 es el último nodo, por ende, para una red en anillo, la señal recibida por este terminal se ve afectada por más tramos de fibra óptica y elementos pasivos, con relación a la red en árbol, haciendo que la señal óptica experimente altos niveles de atenuación causados por los elementos de red y efectos propios de la fibra óptica que alteran el desempeño.
- Partiendo de la interpretación realizada, se puede concluir que los resultados para el servicio CATV Digital se presenta un comportamiento similar al que presentan los resultados de los parámetros de desempeño del servicio Internet/VoIP en las tres topologías de red estudiadas. Sin embargo, para el servicio CATV Digital los resultados para parámetros BER y Factor Q no presentan cambios abruptos en

sus valores en comparación con los del servicio de Internet/VoIP, a medida que la distancia aumenta, mostrando una leve diferencia entre el valor obtenido en la distancia de 16.5 Km y la distancia de 20 Km al OLT. Esto se debe en gran parte, a la utilización de un dispositivo amplificador EDFA, propio de la cabecera CATV del OLT, puesto que este elemento estabiliza el sistema, además la utilización de un esquema de modulación de menor nivel, como lo es 16 QAM, con relación a otros esquemas como 64-QAM y 256-QAM, presenta menos susceptibilidad a efectos como el ruido, puesto que si se observa su diagrama de constelación, los símbolos mapeados están más distanciados, en otras palabras, el esquema 16 QAM es la que mayor dispersión de los puntos en la constelación tolera cuando la señal atraviesa una red en la que experimenta efectos como ruido excesivo, porque la distancia entre los símbolos mapeados como puntos en la constelación es mayor en comparación con 64 y 256 QAM.

A manera de síntesis, con base en el análisis realizado, el comportamiento observado en la figura 4.32, 4.33, 4.34, 4.35 y las condiciones de análisis determinadas previamente para cada parámetro de desempeño, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se observa en la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1a. Por los autores.

	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo	Topología en árbol	Topología en bus Topología en anillo
ONT 2	Topología en bus Topología en árbol Topología en anillo	Topología en bus Topología en árbol Topología en anillo	Topología en árbol	Topología en bus Topología en árbol
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

De la tabla 4.18 se puede apreciar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, en la mayoría de nodos ONT, es la topología de red en árbol. Por lo tanto, esta topología es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas al inicio de la presente sección.

4.2.4.1.2. Caso de Estudio No.1b. Distancia diferente entre el OLT y cada ONT

Para este caso, la distancia entre cada ONT y el OLT son diferentes, con el fin de analizar el comportamiento del desempeño en cada topología de red cuando los ONT no son equidistantes con respecto al OLT.

- **Servicio de Internet/VoIP.** A continuación se expone el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio de Internet/VoIP con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No.1b.

- **ONT 1**

La figura 4.36 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.

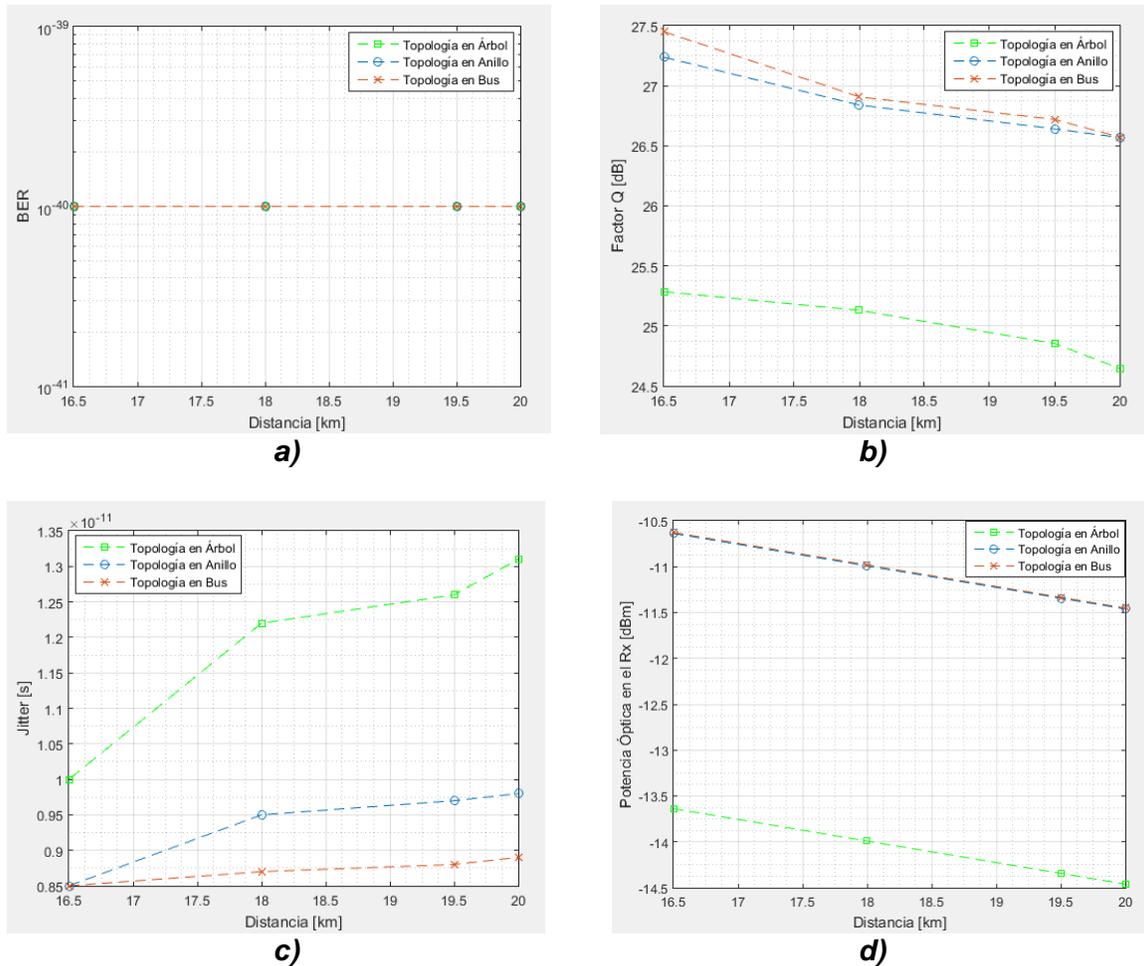


Figura 4.36. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 2**

La figura 4.37 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.

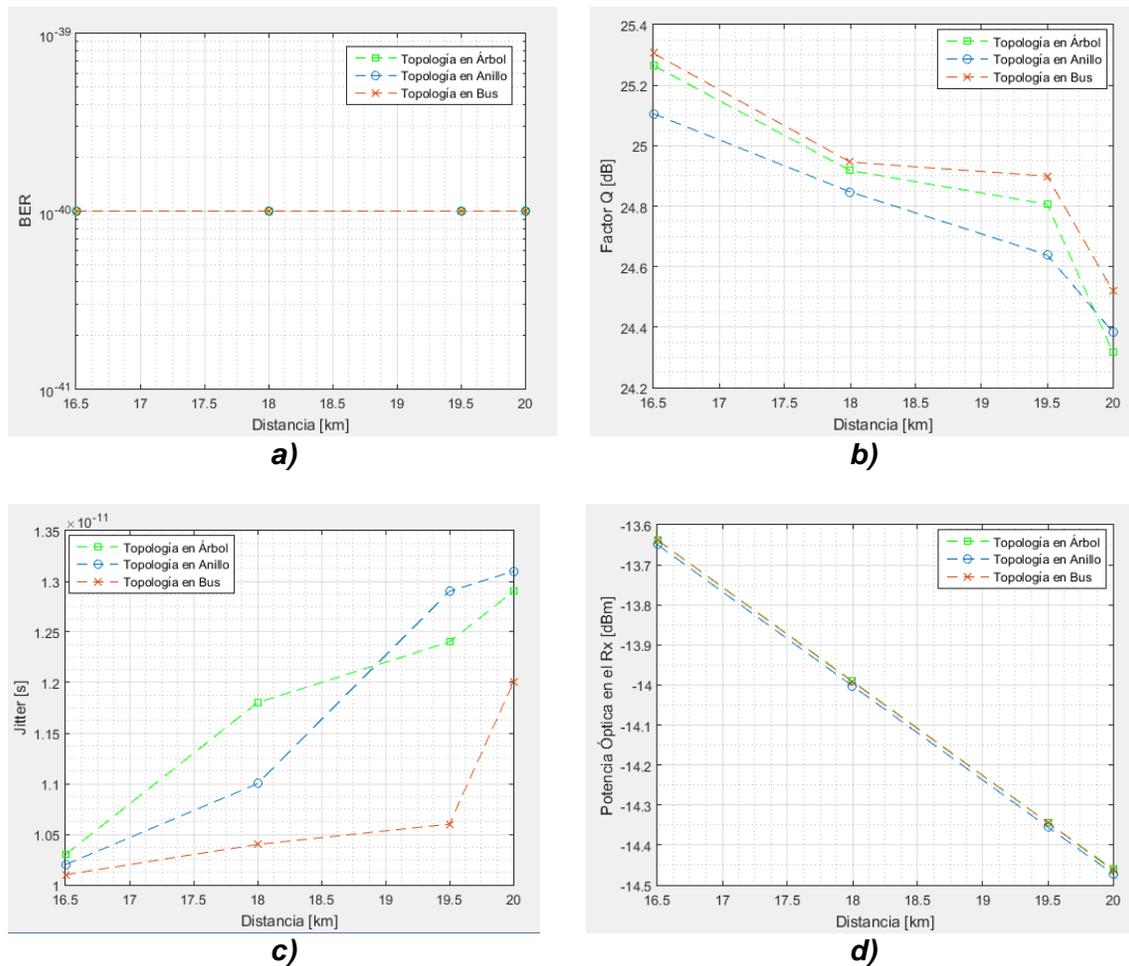


Figura 4.37. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 3**

La figura 4.38 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.

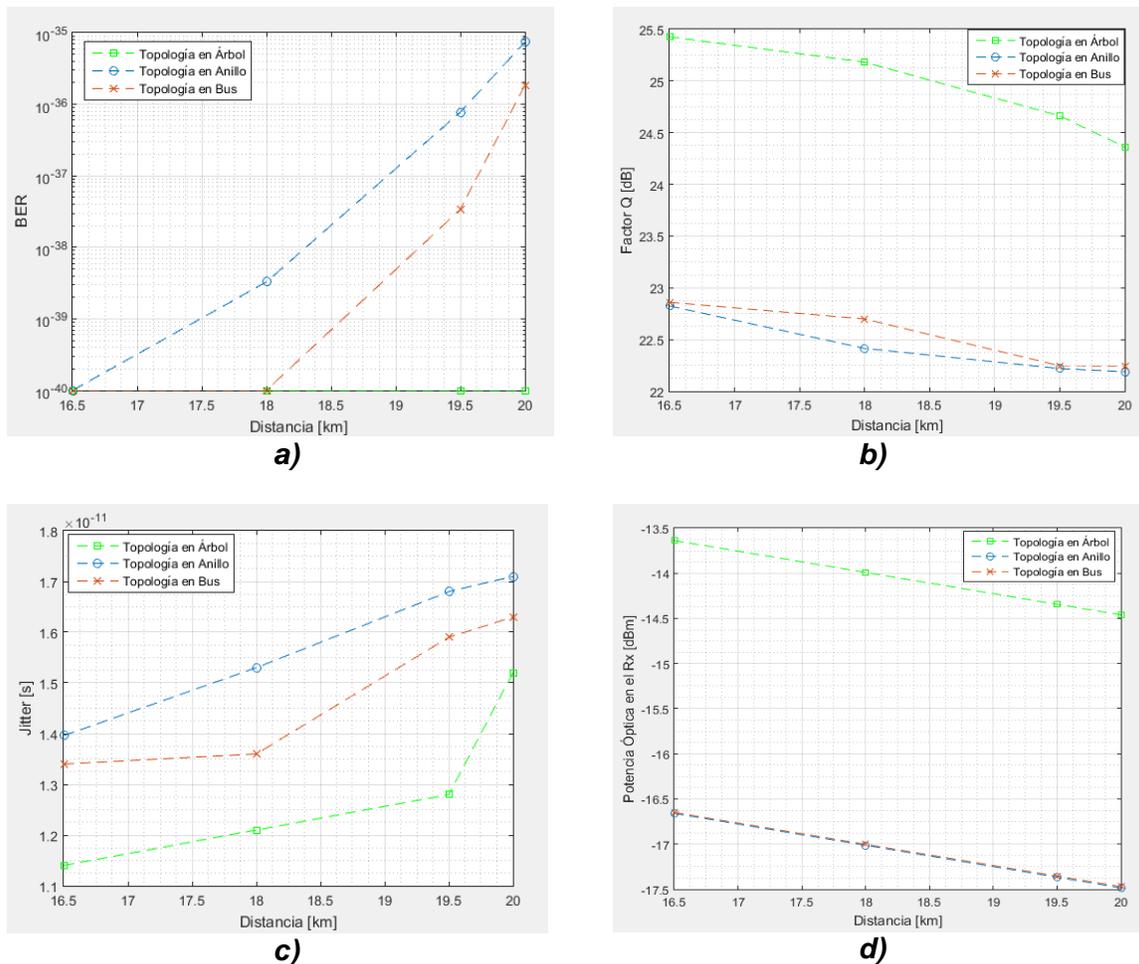


Figura 4.38. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 4**

La figura 4.39 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.

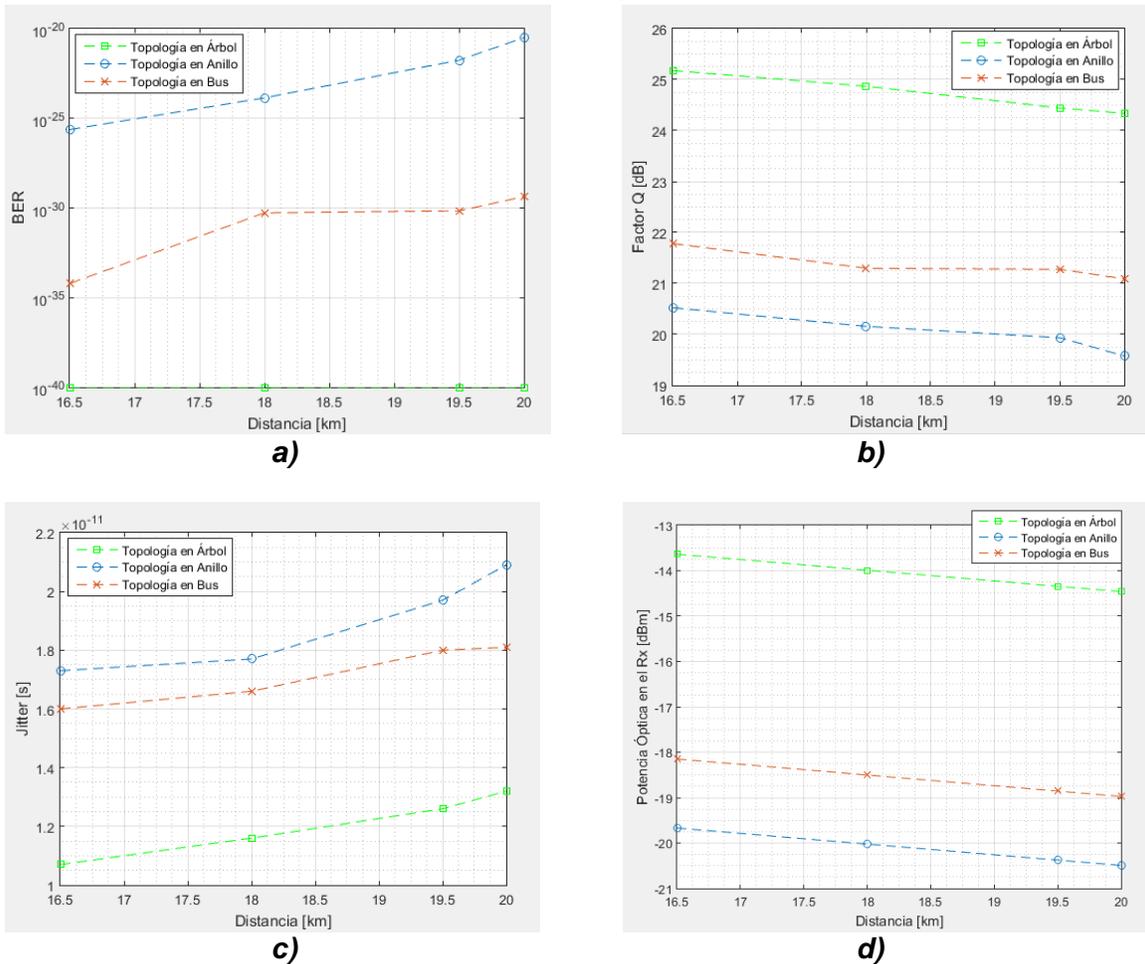


Figura 4.39. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 1b – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- Partiendo de la observación del conjunto de gráficos que ilustran los resultados obtenidos en el servicio Internet/VoIP para los terminales que componen cada topología de red, al igual que en el caso 1a, se puede observar que los parámetros de desempeño evaluados mantienen una dependencia de la distancia existente entre el OLT y cada ONT que compone la red y se ven afectados por la topología mediante la cual esta se encuentra configurada. Se aprecia que los resultados de BER y Jitter se ven directamente relacionados con la distancia, es decir, al ampliar la separación entre el OLT y el ONT, sus valores aumentan. En cambio, los resultados de los parámetros Factor Q y potencia en recepción se ven inversamente relacionados con la distancia, ya que cuando esta se incrementa los valores de los parámetros disminuyen.
- En las figuras 4.36a y 4.37a se observa que los resultados para el parámetro BER en las tres topologías de red no sufre ningún cambio, permaneciendo en un valor constante de 10^{-40} a medida que aumenta la distancia. Este comportamiento

corresponde al observado en el caso 1a y responde a la misma razón ya previamente explicada.

- En las figuras 4.36b, 4.36c y 4.36d se puede apreciar que con la red con topología en bus y anillo se obtiene un mejor desempeño contrastando con la red en árbol, cuyos resultados se deben al *splitter* que se utiliza para conectar el ONT 1 a las topologías en bus y anillo el cual posee una relación 1:2, produciendo menores pérdidas que el *splitter* mediante el cual se conecta a la topología en árbol, el cual posee una relación 1:4. Además se puede observar que se obtienen resultados similares en el parámetro Factor Q con las redes en bus y anillo, existiendo un ligero mejor resultado con la topología en bus. Esto puede deberse a que la señal óptica experimenta los efectos propios de un tramo de fibra óptica adicional (entre el circulador y el primer *splitter*) para llegar al ONT 1 en el caso de la topología en anillo, lo cual afecta su desempeño. Sin embargo en el caso de la potencia recibida, estas dos topologías presentan condiciones de atenuación muy cercanas.
- En la figura 4.37, que representa los resultados para el ONT 2, se puede apreciar una similitud en el comportamiento de los parámetros obtenidos con las tres topologías, indicando que si bien las topologías de red difieren, las condiciones de atenuación y pérdidas son más cercanas, evidenciándose en la potencia recibida. Sin embargo, se puede observar que el parámetro Factor Q presenta niveles más bajos con la topología en anillo, en relación con las otras topologías. Estos resultados obedecen a que la señal óptica experimenta los efectos propios de un tramo de fibra óptica adicional (entre el circulador y el primer *splitter*) en el caso de la topología en anillo, lo que cual se refleja en su desempeño.
- En la figura 4.38 se aprecia que los resultados para cada parámetro de desempeño se ven afectados al cambiar la red a una topología diferente, evidenciándose un aumento en los valores de la tasa de error de bit y del Jitter, y un decrecimiento en los valores de Factor Q y Potencia en el receptor con las topologías de red en bus y anillo lo que indica un impacto de dichas topologías en los parámetros de desempeño. Si se compara el desempeño para el ONT 3 con los demás, se puede observar que el impacto en el desempeño es mayor y a su vez se afecta negativamente. Se observa que con la topología en árbol se obtiene un mejor desempeño si se contrastan los resultados obtenidos en ella frente a las demás, ya que para llegar al ONT 3 en esta topología la señal recorre menos tramos de fibra y menos cantidad de *splitters* en comparación con las topologías en bus y anillo, por lo que experimentará menos pérdidas y solamente se verá afectada por los efectos propios de un solo tramo de fibra óptica. Por otra parte, si bien los resultados obtenidos con las otras topologías es similar, se presenta un desempeño más bajo con la topología en anillo. Sin embargo, en el caso de la potencia recibida, la topología en bus y anillo resultados muy cercanos, debido a la semejanza en cuanto la disposición de sus elementos de red.
- En la figura 4.39 se nota que los parámetros de desempeño se ven drásticamente afectados por la topología de red, en donde las topologías en bus y anillo tienen un impacto mayor y a la vez un efecto negativo, puesto que los resultados en cuanto a BER y Jitter son más altos, y en lo que respecta a Factor Q y Potencia recibida

son más bajos con relación a los obtenidos en el ONT 3. Por otra parte, se observa que con la red con topología en árbol se presenta un mejor desempeño respecto a las otras, estos resultados responden a la cantidad de tramos de fibra óptica y *splitters* que la señal óptica atraviesa para llegar al ONT 4, pues para las topologías en anillo y bus hay más cantidad de elementos con relación a la topología en árbol, por ende experimenta mayor atenuación, mayores pérdidas y efectos propios del medio de transmisión. Se puede observar también que, aunque las topologías en bus y anillo presentan una similitud en su estructura física, los resultados de los parámetros de desempeño entre estas dos topologías, ya no presentan una similitud como en el caso de la figura 4.38, sino que existe una brecha más amplia entre sus valores. Por su parte, con la topología en anillo se obtiene un desempeño más bajo. Si se compara esta topología con la topología en árbol, la diferencia entre los resultados obtenidos en ellas es muy amplia.

- Comparando los resultados que se ilustran en las figuras 4.36 y 4.39, para el ONT 1 y para el ONT 4, respectivamente, se demuestra que el desempeño no solamente se ve afectado por la distancia hacia el OLT sino que la topología de red presenta un impacto en el parámetro de desempeño, ya que se aprecia que cuando el ONT 1 se encuentra a 20 Km del OLT se obtienen mejores resultados de BER y Factor Q que para el ONT 4 cuando este se encuentra más cercano al OLT, esto es, a una distancia de 16.5 Km, este comportamiento se observa en el caso de las topologías de red en bus y anillo. En este caso, si se parte de un juicio *a priori*, se esperaría que en el ONT 4 siendo el más cercano al OLT se presenten mejores resultados que en el ONT 1, siendo éste el más alejado, sin embargo, con la experimentación realizada en las simulaciones, los resultados demuestran lo contrario para las topologías en bus y anillo. En cambio, en la red con topología en árbol sí se presenta dicho comportamiento. Como se mencionó anteriormente, esto indica el impacto que tiene la topología de red en los parámetros de desempeño. De igual manera, se observa el mismo comportamiento para el servicio CATV Digital.
- Partiendo de la interpretación realizada anteriormente se puede concluir, en primer lugar que en el caso 1b, el comportamiento de los resultados obtenidos para el servicio de Internet/ VoIP se asemejan a los del caso 1a, dando lugar a la misma apreciación que se contempla al finalizar el análisis de cada gráfico de dicho caso, que se puede resumir en tres premisas. La primera es que igualmente se evidencia un impacto en los parámetros de desempeño al cambiar la topología de red FTTH-GEPON. La segunda, aunque se notó que el desempeño se vio afectado negativamente para los nodos ONT 3 y ONT 4 con la topología en anillo, los resultados correspondientes a cada parámetro de desempeño se encuentran dentro del margen establecido; y la tercera es que el comportamiento obtenido es acorde a lo observado en la literatura consultada, con relación al comportamiento de los parámetros de desempeño al aumentar la distancia entre el OLT y cada ONT.

A partir del análisis realizado, con base en el comportamiento evidenciado en la figura 4.36, 4.37, 4.38, 4.39 y las condiciones de análisis establecidos previamente para cada

parámetro, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se representa en la tabla 4.19.

Tabla 4.19. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1b. Por los autores.

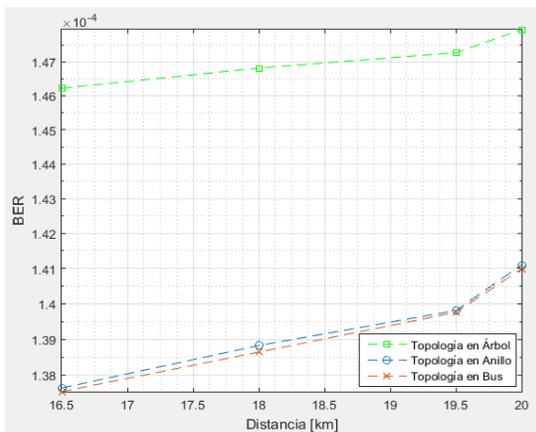
	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo
ONT 2	Topología en bus Topología en árbol Topología en anillo	Topología en bus Topología en árbol Topología en anillo	Topología en bus	Topología en bus Topología en árbol Topología en anillo
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

Como se observa en la tabla 4.19 con la topología que se presenta los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, para la mayoría de nodos ONT, es la topología de red en árbol. Por lo cual, esta topología es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas en la descripción de la fase 5.

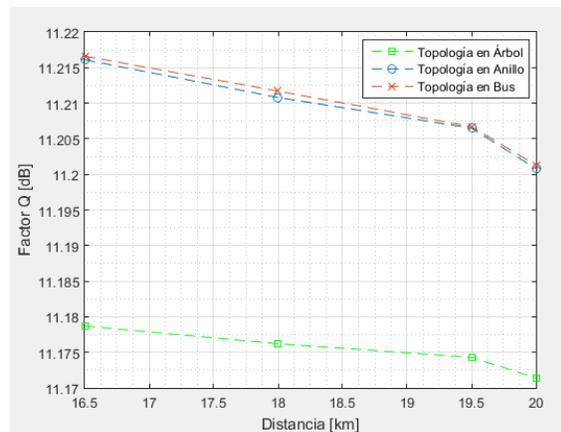
- **Servicio de CATV Digital.** A continuación se muestra el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio CATV Digital con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No.1b.

- **ONT1**

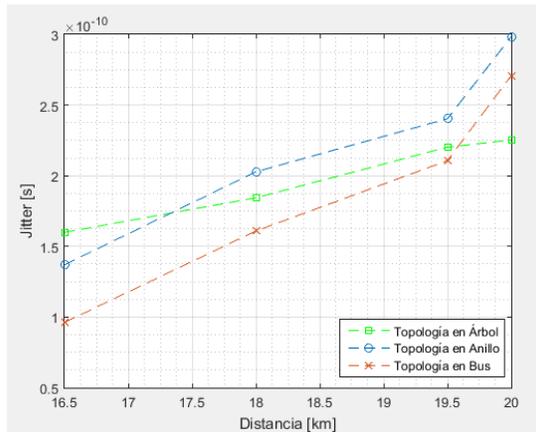
La figura 4.40 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.



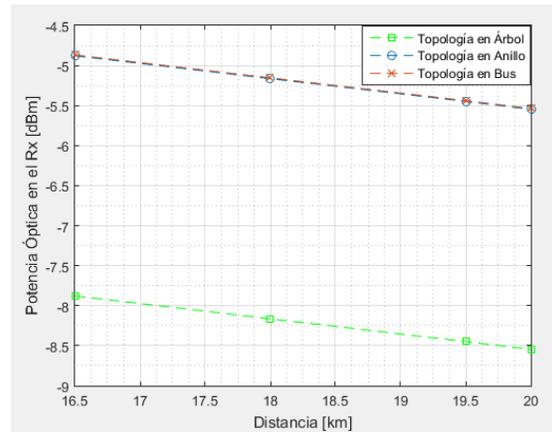
a)



b)



c)

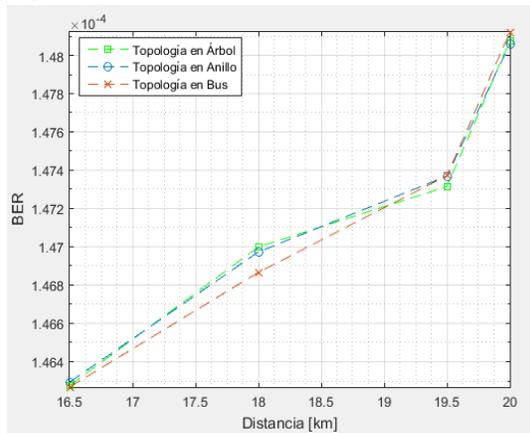


d)

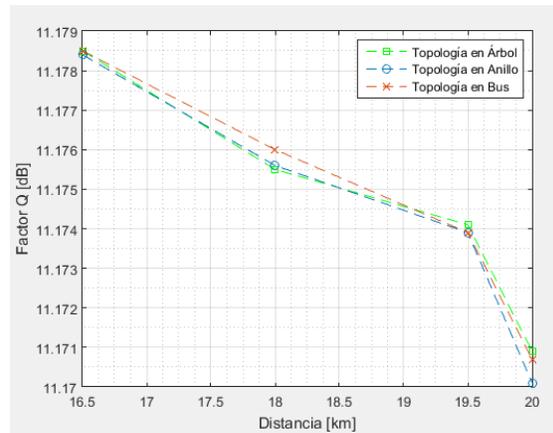
Figura 4.40. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT2

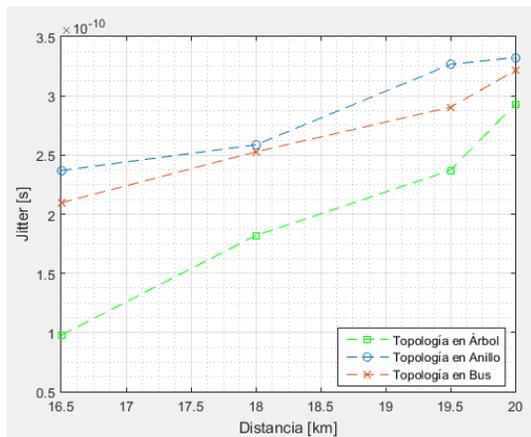
La figura 4.41 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.



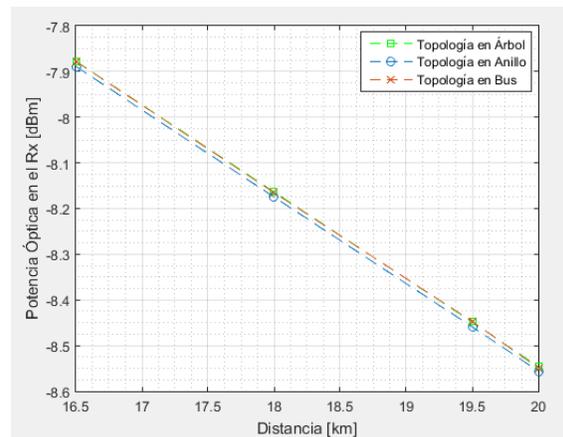
a)



b)



c)

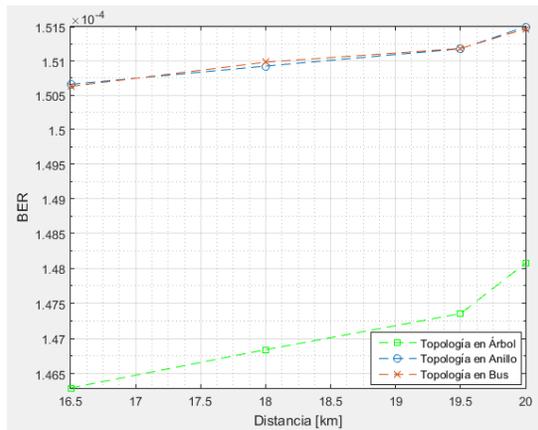


d)

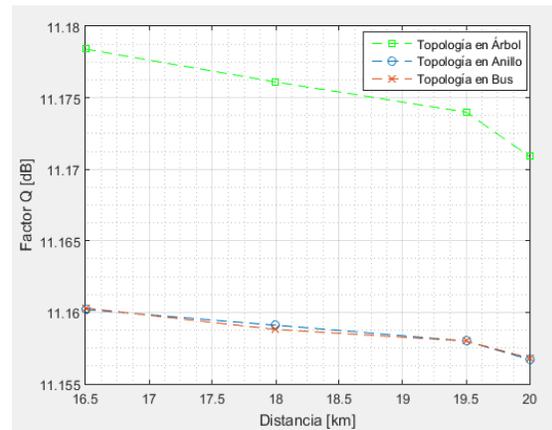
Figura 4.41. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT3

La figura 4.42 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.



a)



b)

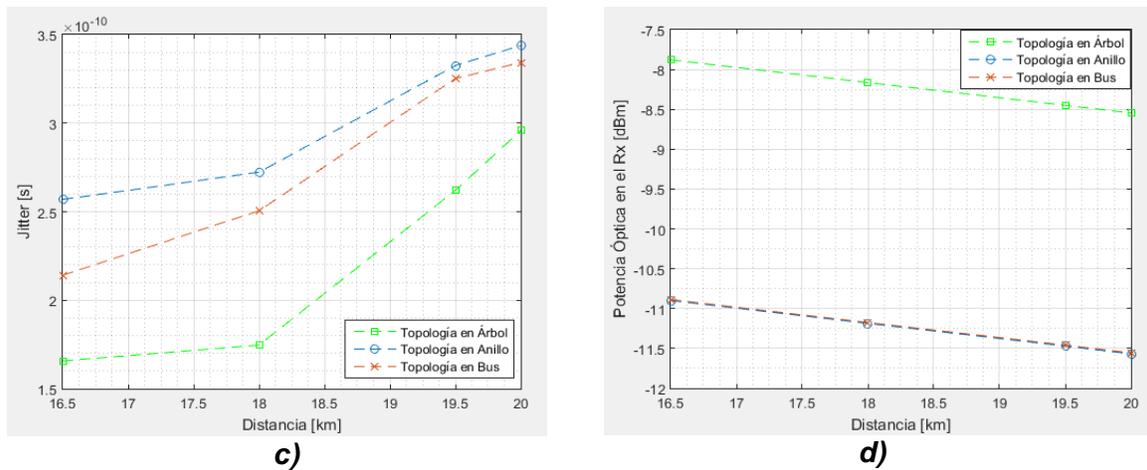
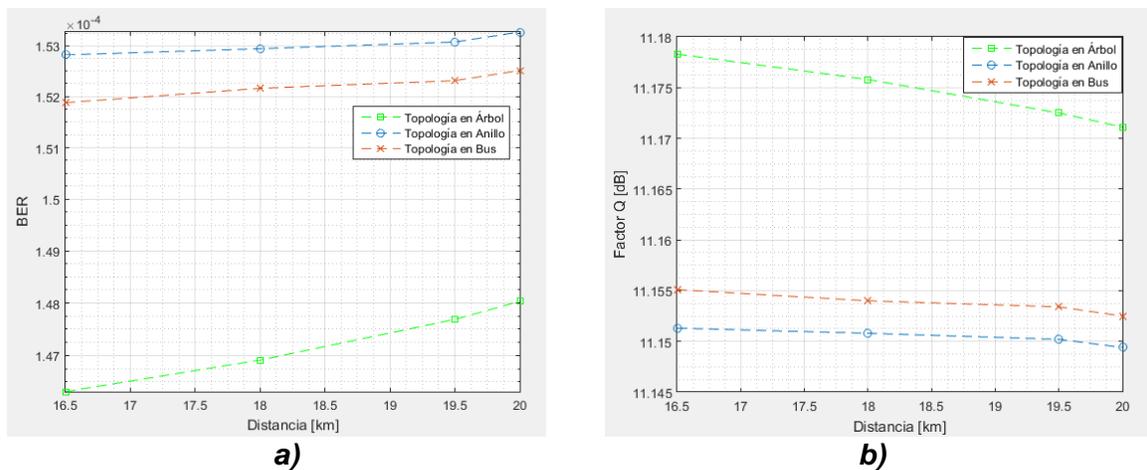


Figura 4.42. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

• ONT4

La figura 4.43 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1



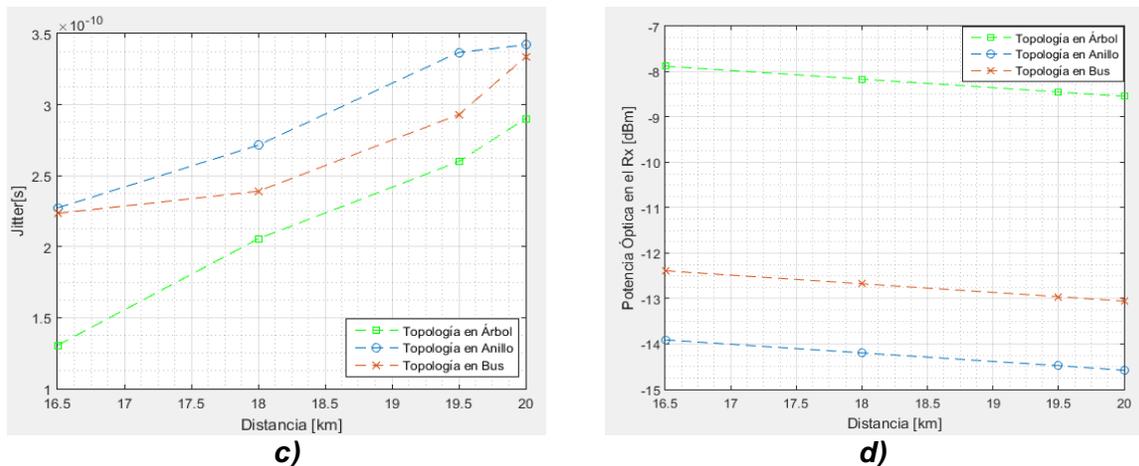


Figura 4.43. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV Digital en el Caso de estudio No. 1b – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- Del anterior conjunto de graficas que ilustran los resultados obtenidos en las simulaciones para el servicio CATV Digital, se puede observar un comportamiento similar con relación a los mostrados en el caso 1a, esto es, los parámetros de desempeño evaluados se ven afectados a medida que aumenta la distancia desde el OLT a cada ONT. De igual manera, se observa que con cada topología de red, los resultados para cada parámetro de desempeño se comportan de manera diferente. Por un lado, los valores de BER y Jitter se encuentran directamente relacionados con la distancia, puesto que sus niveles aumentan al incrementar la distancia. Por su parte, los resultados de los parámetros Factor Q y potencia en el receptor se encuentran inversamente relacionados con la distancia.
- De la figura 4.40 se puede observar que se obtiene un mejor desempeño con las topologías de red en bus y anillo, si se comparan los resultados obtenidos con la red en topología de árbol. Estos resultados se obtienen a causa de la utilización de un *splitter* con relación 1:2 para conectar el ONT 1 en estas dos topologías, como se explicó en el caso 1a para este mismo ONT. Por otra parte, se logra notar una similitud en el desempeño obtenido con las topologías en bus y anillo, presentando un mejor comportamiento de los parámetros BER y Factor Q con la topología de red en bus. La razón por la cual se obtienen estos valores responde a que la topología en anillo posee un tramo adicional de fibra óptica, a diferencia de la topología en bus, el cual se ubica antes del primer *splitter* y el circulador, lo que causa que la señal óptica experimente los efectos propios causados por este tramo de fibra óptica afectando su desempeño.
- En la figura 4.41 se aprecia que el comportamiento de los parámetros de desempeño para el ONT 2 es similar con las tres topologías de red. Tal como se argumentó en previas interpretaciones, esto se debe a las condiciones de atenuación y pérdidas es similar en las tres topologías para este nodo. Sin embargo, se observa que se obtiene mejores niveles de BER y Factor Q con la topología en bus, aunque la diferencia es muy leve.

- En la figura 4.42 se observa la afectación de los parámetros de desempeño de acuerdo a la topología de red, en donde se aprecia un mejor desempeño con la topología de red en árbol. Por otra parte, se puede apreciar una gran similitud en los resultados de cada parámetro de desempeño. Aunque con la red con topología en árbol se presenten valores más bajos de BER respecto a las topologías en bus y anillo, los valores obtenidos con estas últimas se encuentran cercanos al valor sugerido con el que se proporciona este servicio (10^{-4}). Por su parte, los resultados para el parámetro Factor Q indican que la diferencia con la red en árbol y las otras dista en sus valores aproximadamente 0.02 dB. Por su parte, los valores de potencia recibida en el ONT 3 presentan una diferencia de -3dB entre la topología en árbol y las otras topologías.
- En la figura 4.43 se puede observar que la topología de red tiene un impacto más notorio en los parámetros de desempeño, cuyos resultados indican que el desempeño para el ONT 4 se ve drásticamente afectado por la topología de red, evidenciando que la red con la que se obtiene mejor desempeño es la topología en árbol en comparación a las demás. Se puede notar que con la topología en anillo se obtiene un bajo desempeño, cuyos resultados se deben a que el ONT 4 es el último nodo, por lo que para esta topología, la señal recibida en este nodo se ve afectada por más tramos de fibra óptica y más elementos pasivos, con relación a la red en árbol, provocando que la señal óptica experimente altos niveles de atenuación a causa de los elementos de red y efectos propios de la fibra óptica que afectan el desempeño.
- Con base en la interpretación y análisis realizado, se puede concluir que los resultados para el servicio CATV Digital en este caso presenta un comportamiento similar que en el caso 1a. De igual manera se observa que los resultados para parámetros BER y Factor Q no presentan cambios abruptos en sus valores en comparación con los del servicio de Internet/VoIP, a medida que la distancia aumenta, mostrando una leve diferencia entre el valor obtenido en la distancia de 16.5 Km y la distancia de 20 Km al OLT. Este comportamiento se debe a la utilización del dispositivo amplificador EDFA y al esquema de modulación utilizado, tal como se argumentó en el caso 1a.

Considerando la interpretación realizada, el comportamiento que ilustra la figura 4.40, 4.41, 4.42, 4.43 y las condiciones de análisis que previamente fueron establecidas para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se muestra en la tabla 4.20.

Tabla 4.20. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 1b. Por los autores.

	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus	Topología en bus Topología en anillo
ONT 2	Topología en bus Topología en árbol	Topología en bus Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en bus Topología en árbol

	Topología en anillo	Topología en anillo		Topología en anillo
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

De la tabla 4.20 se puede apreciar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, es la topología en árbol para la mayoría de nodos ONT. Por lo cual se puede establecer que la topología en árbol es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas al inicio de la presente sección para cada parámetro de desempeño.

4.2.4.2. Caso de Estudio No. 2. Servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Analógico

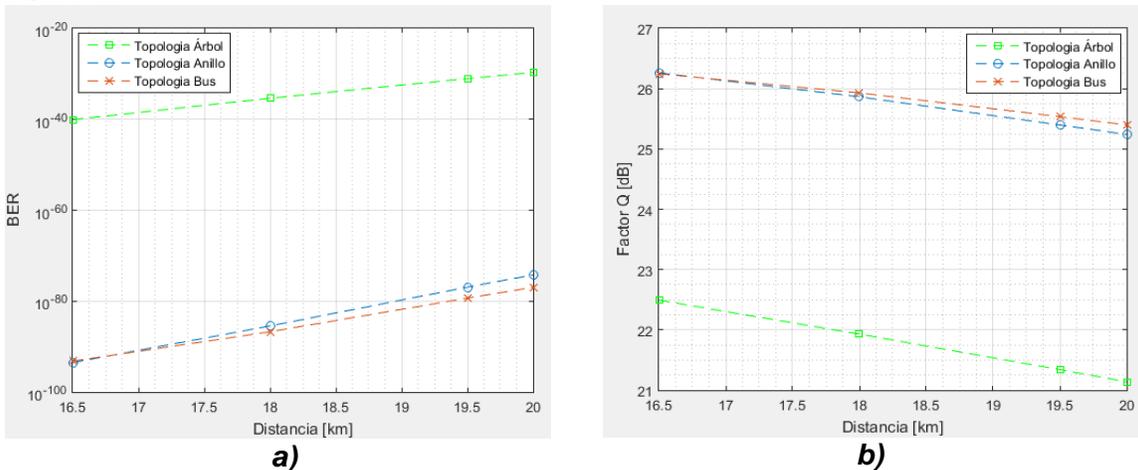
Se llevó a cabo la simulación del caso de estudio No. 2 en el que se proporciona un servicio Triple Play conformado por Internet/VoIP y CATV Analógico con sus respectivos casos de estudio, en el cual se obtuvieron resultados de los parámetros de desempeño descritos anteriormente propios para su evaluación, los cuales se depositan en el anexo D. A continuación, se presenta un conjunto de gráficos que muestran el comportamiento de los parámetros de desempeño en los servicios Internet/VoIP y CATV analógico, frente a la variación de la distancia entre la OLT y cada ONT. Al final de todas gráficas se expone un análisis de cada una de las figuras.

4.2.4.2.1. Caso de Estudio 2a. Distancias iguales entre el OLT y cada ONT.

- **Servicio Internet / VoIP.** A continuación se expone el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio de Internet/VoIP con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No.2a.

- **ONT 1**

La figura 4.44 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.



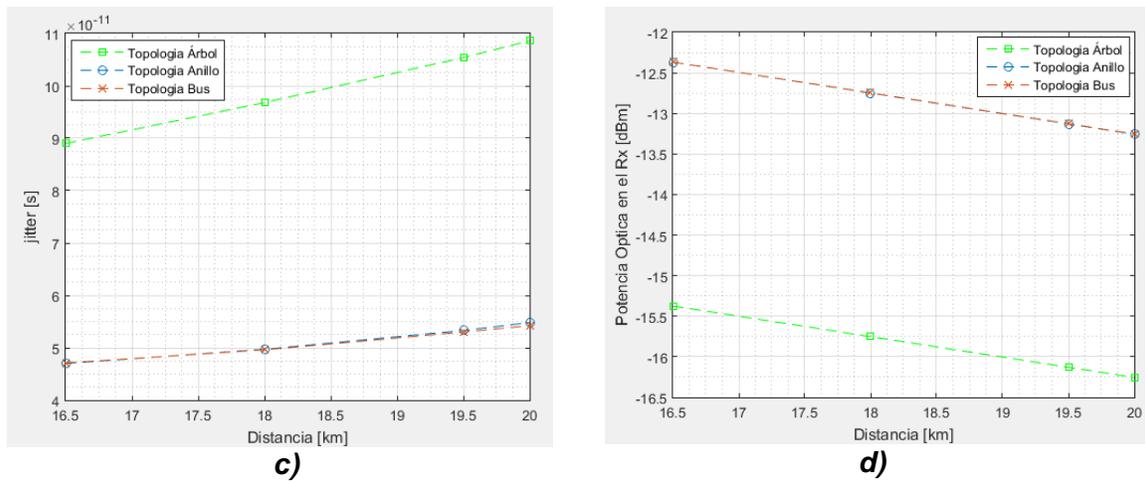
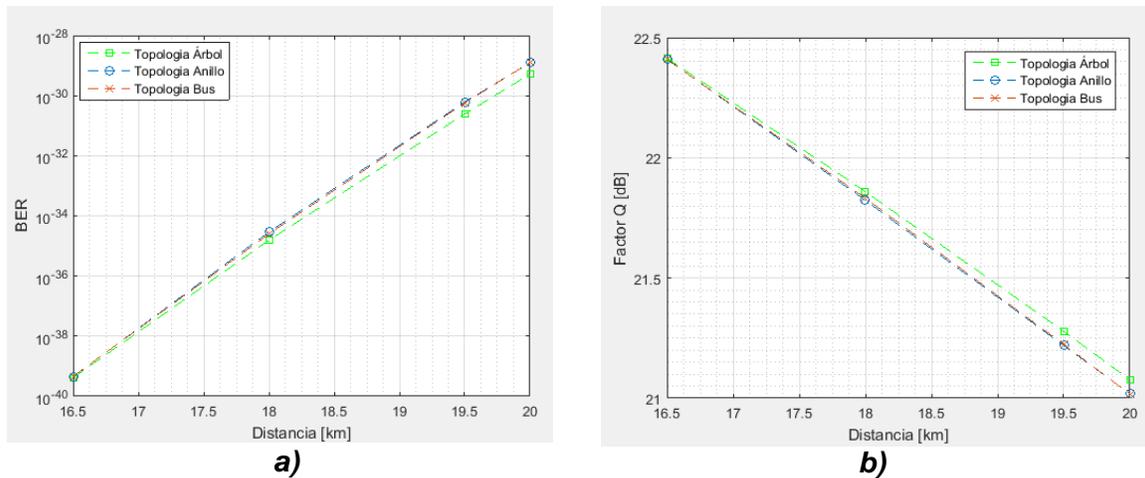


Figura 4.44. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 2**

La figura 4.45 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.



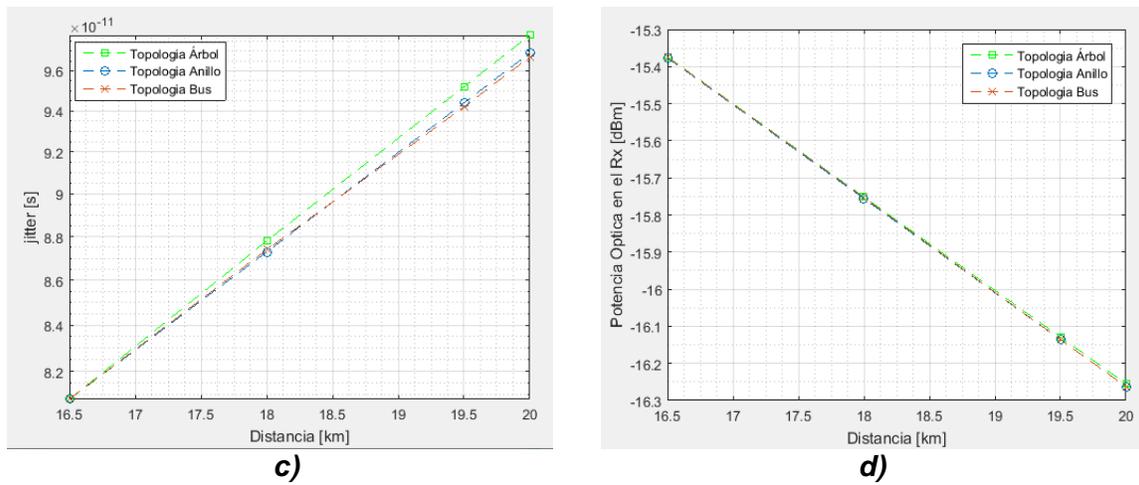
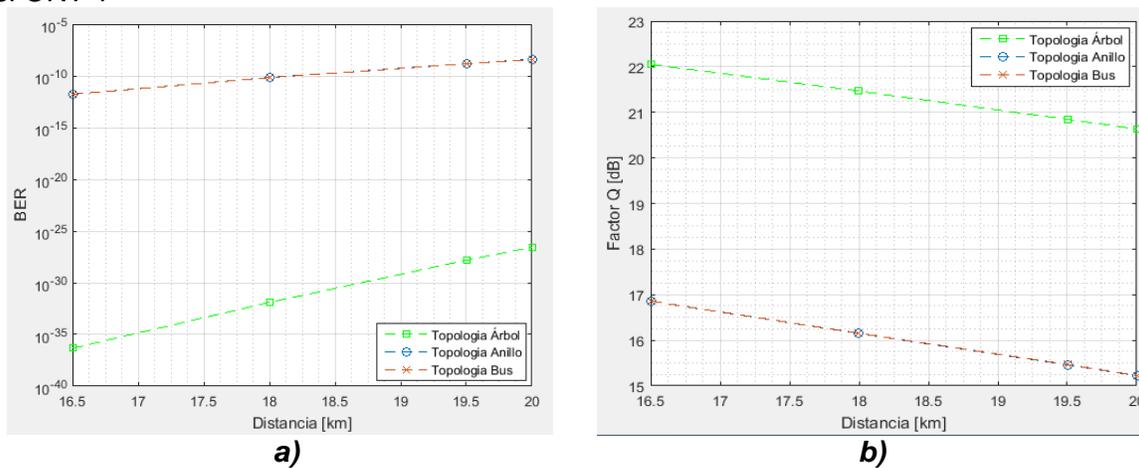


Figura 4.45. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT 3

La figura 4.46 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1



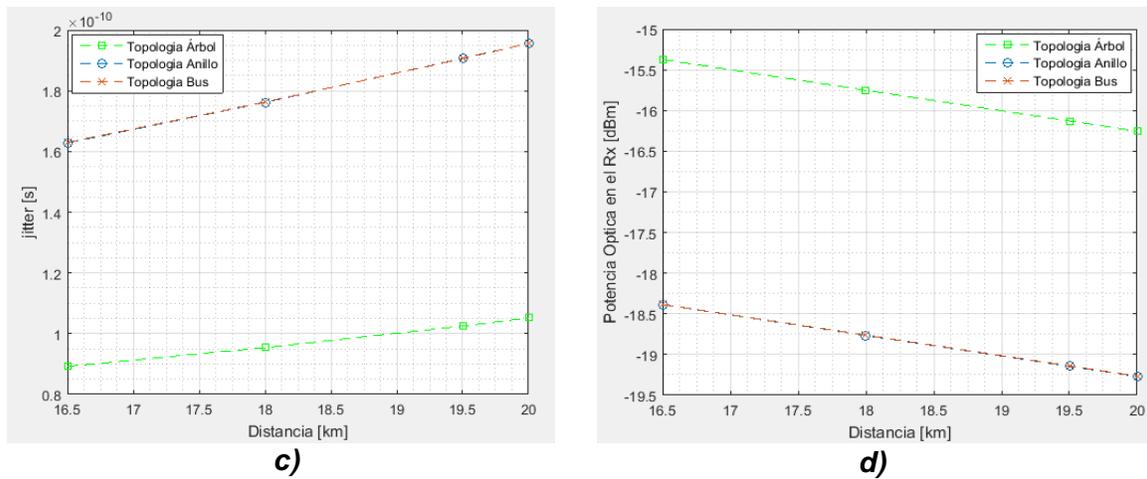
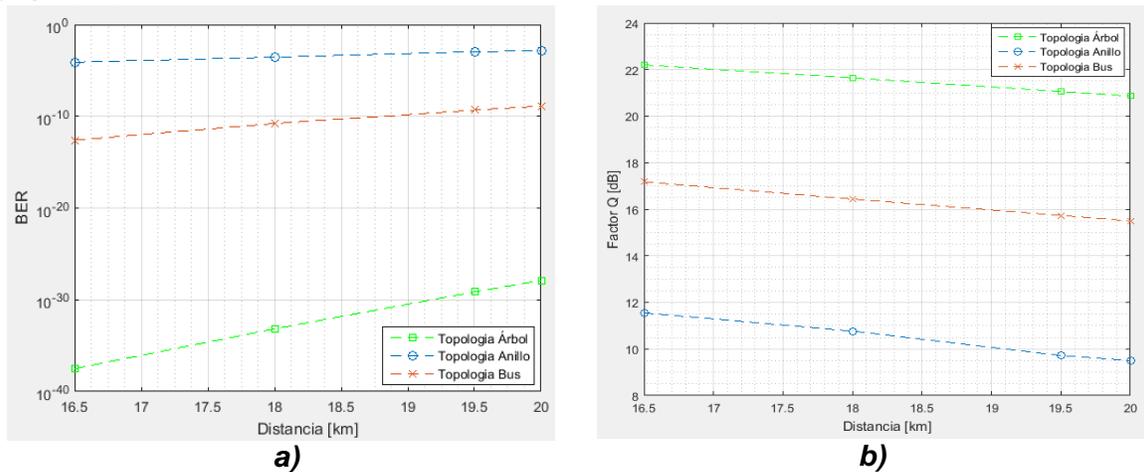


Figura 4.46. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT 4

La figura 4.47 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.



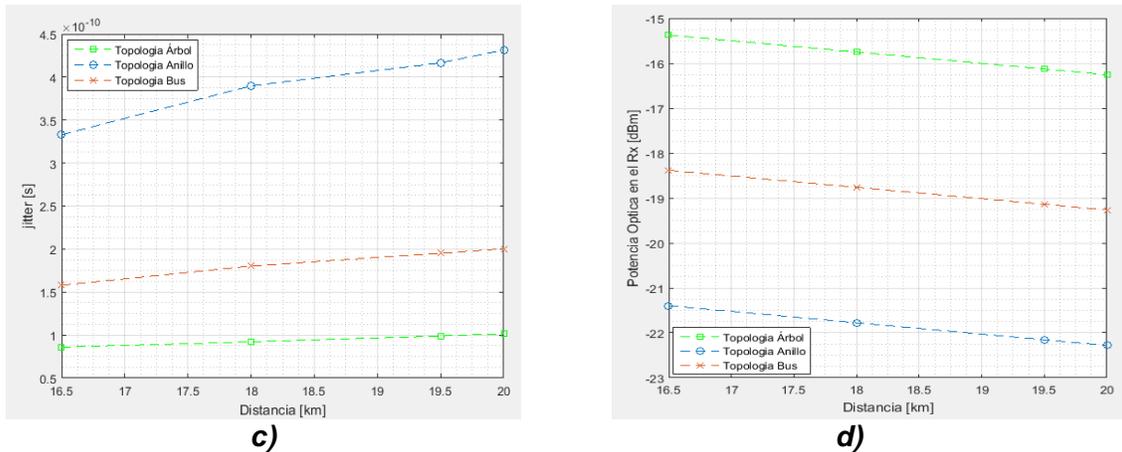


Figura 4.47. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2a – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

Considerando el comportamiento mostrado por la figura 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 y las condiciones de análisis establecidas previamente para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se observa en la tabla 4.21.

Tabla 4.21. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2a. Por los autores.

	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus	Topología en bus	Topología en anillo Topología en bus	Topología en anillo Topología en bus
ONT 2	Topología en anillo Topología en bus Topología en árbol			
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

De la tabla 4.21 se puede apreciar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, es la topología en árbol para la mayoría de nodos ONT. Por lo tanto, la topología en árbol es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas al inicio del desarrollo de la presente fase.

- **Servicio CATV Analógico.** A continuación se muestra el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio CATV Analógico con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No. 2a.

• **ONT 1**

La figura 4.48 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.

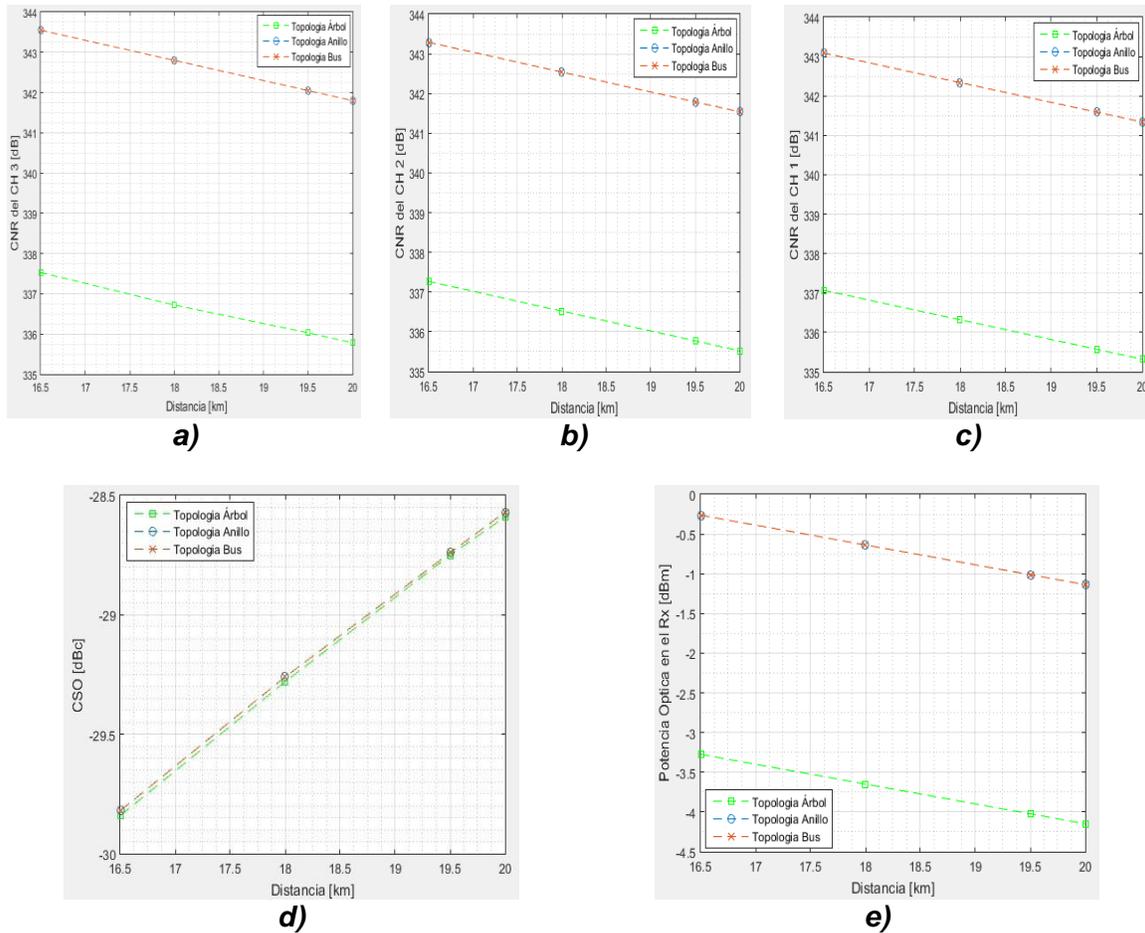


Figura 4.48. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 1. a) CNR – CH3 b) CNR – CH2 c) CNR – CH1 d) CSO e) Potencia Óptica en el receptor.

• **ONT 2**

La figura 4.49 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.

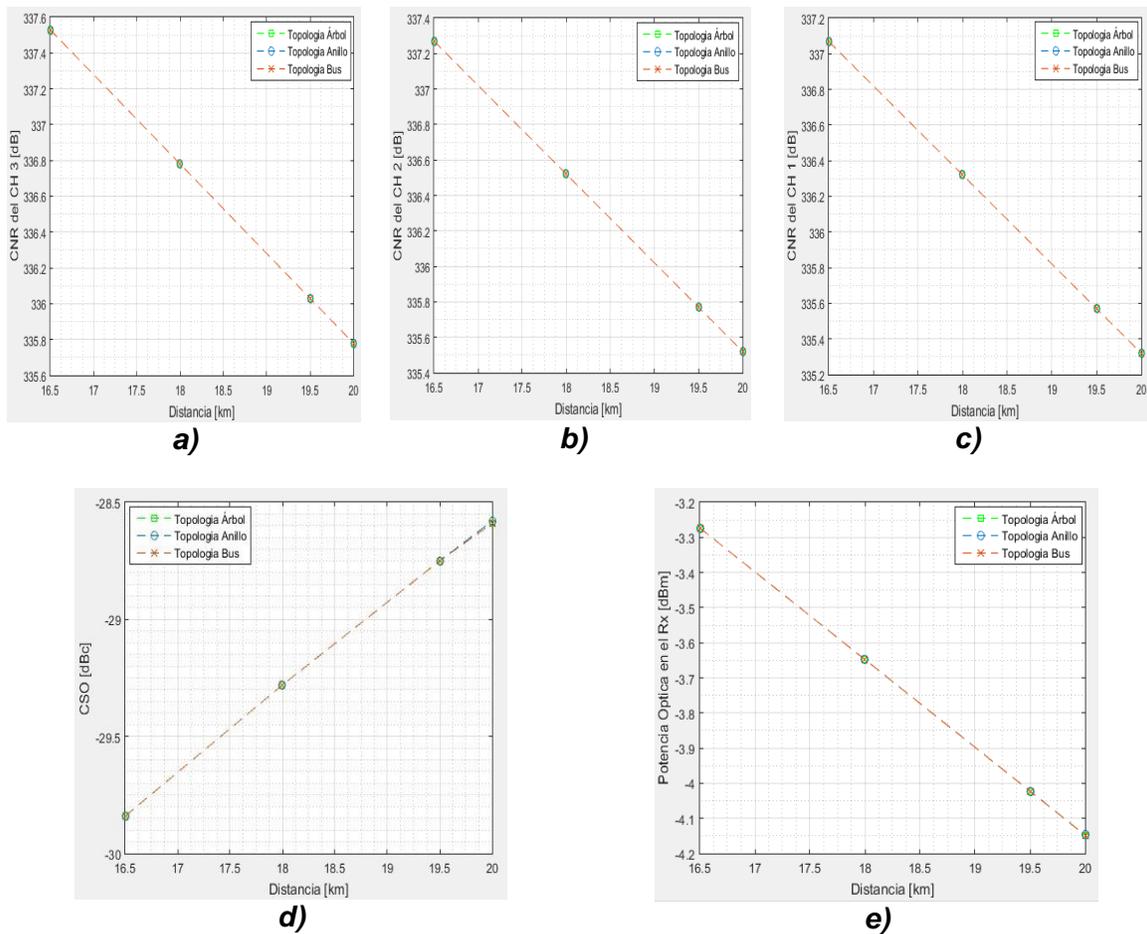
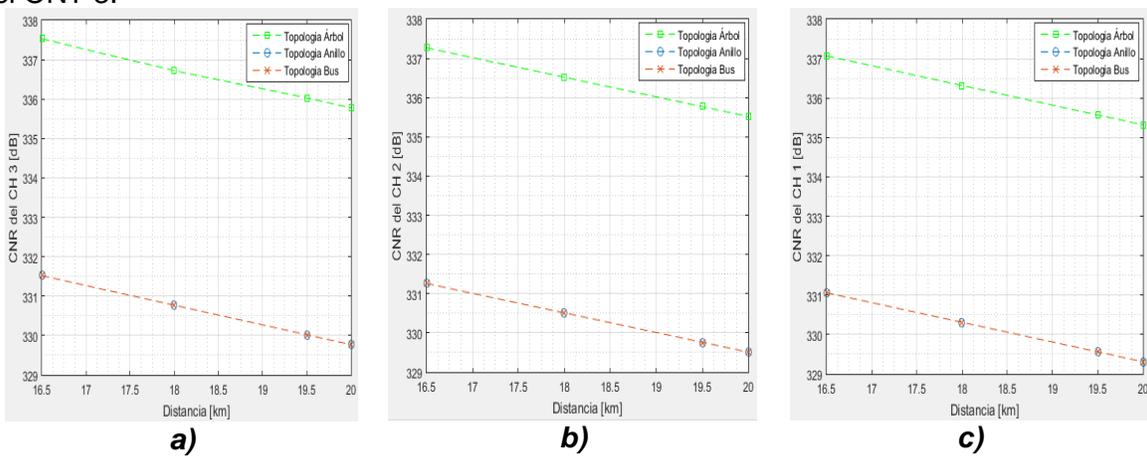


Figura 4.49. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 2: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 3**

La figura 4.50 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.



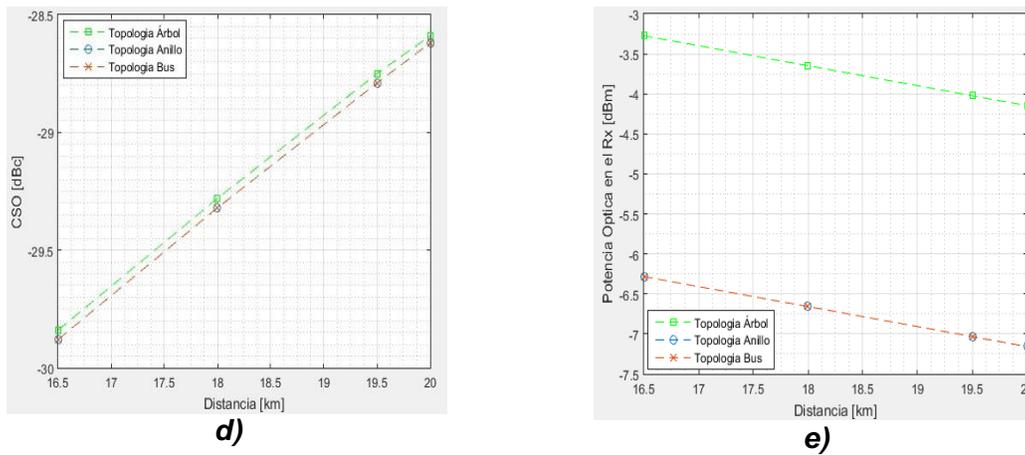
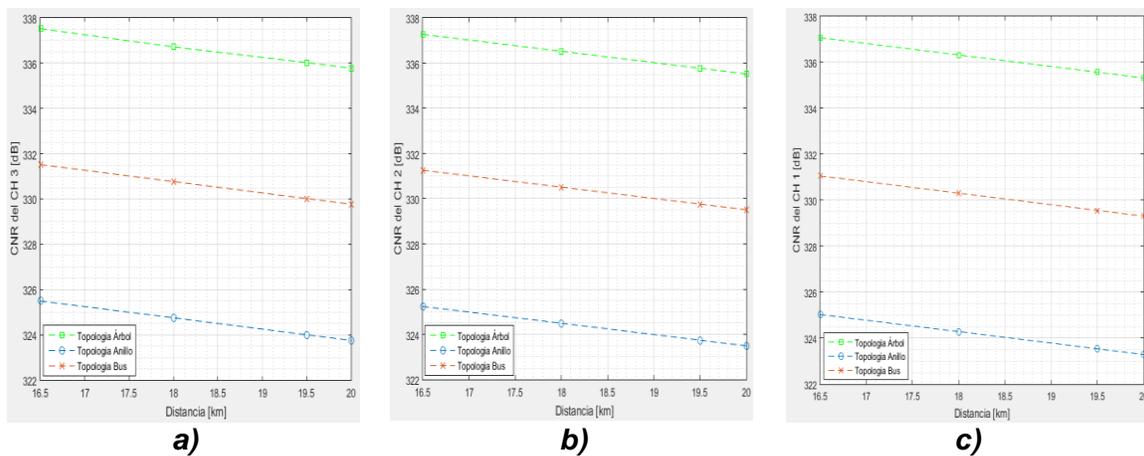


Figura 4.50. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 3: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 4**

La figura 4.51 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.



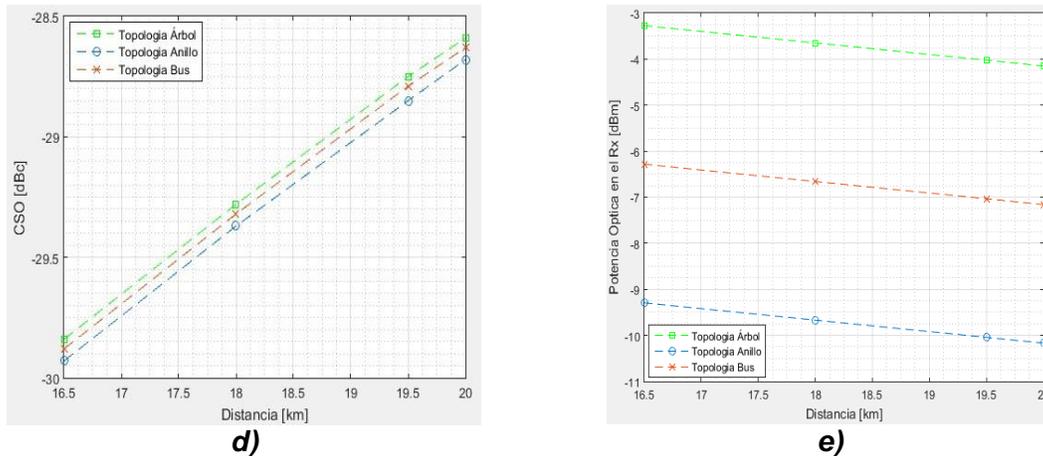


Figura 4.51. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2a – ONT 4: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

Teniendo en cuenta la figura 4.48, 4.49, 4.50, 4.51 y las condiciones de análisis que se establecieron previamente para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se muestra en la tabla 4.22.

Tabla 4.22. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2a. Por los autores.

	CNR- CH 3	CNR- CH 2	CNR- CH 1	CSO	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en anillo Topología en bus				
ONT 2	Topología en anillo Topología en bus Topología en árbol				
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en anillo Topología en bus	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en anillo Topología en bus	Topología en árbol

Considerando lo consignado en la tabla 4.22, la topología con la que se obtiene los niveles más bajos en ruido, menores niveles de intermodulación y menor atenuación en el enlace, es la topología de red en árbol en la mayoría de nodos ONT. A partir de lo

anterior, la topología en árbol es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas al inicio del desarrollo de la presente fase.

4.2.4.2.2. Caso de Estudio 2b. Distancia diferente entre el OLT y cada ONT

- **Servicios Internet / VoIP.** A continuación se expone el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio de Internet/VoIP con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No.2b.

- **ONT 1**

La figura 4.52 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.

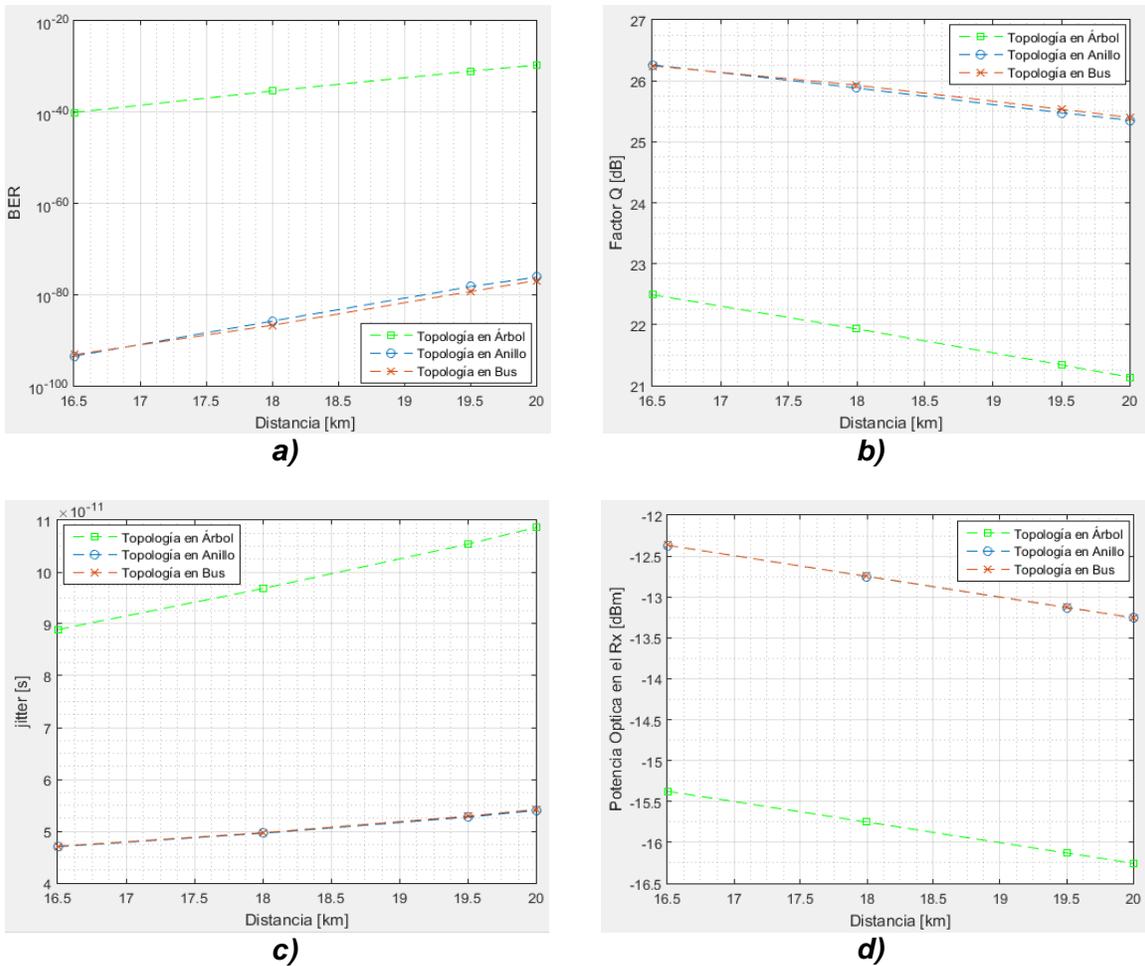


Figura 4.52. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 1: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 2**

La figura 4.53 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.

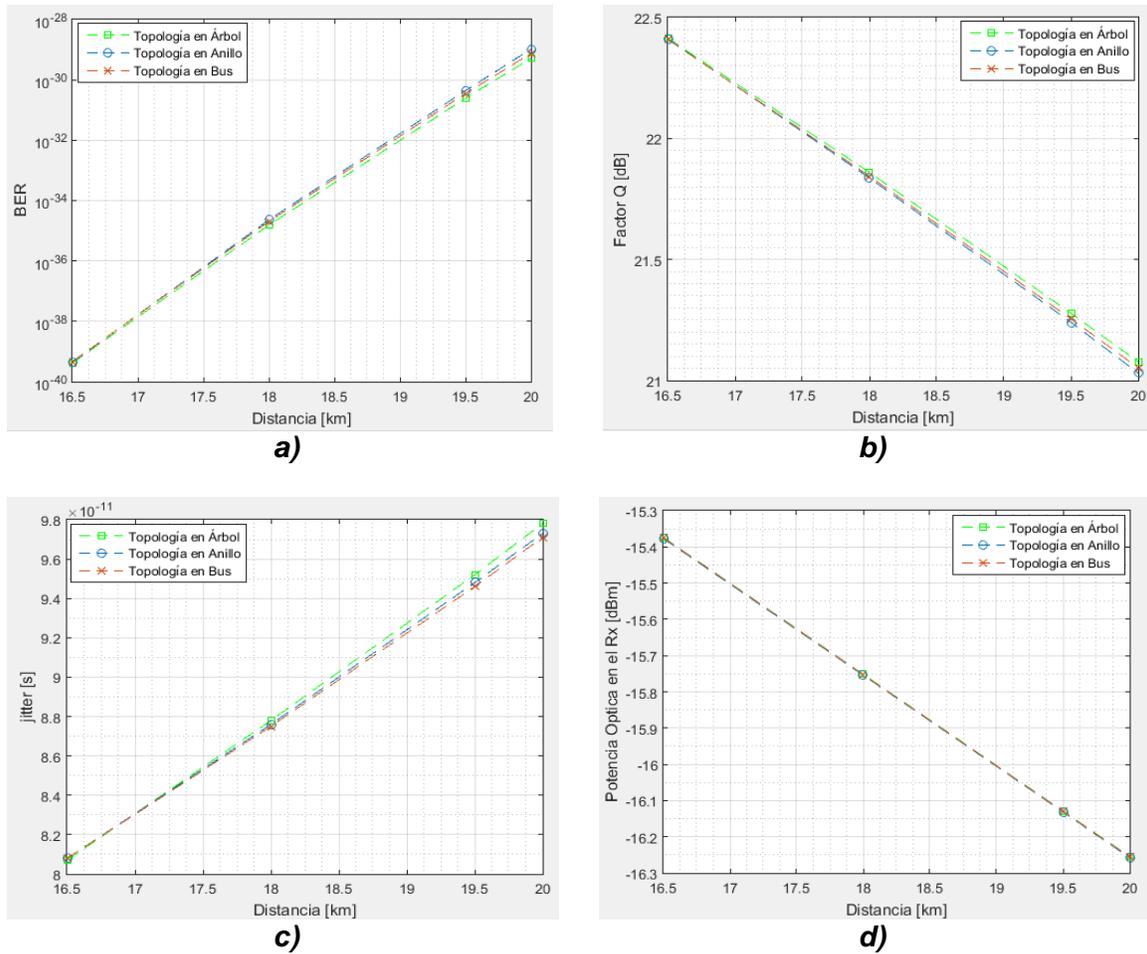


Figura 4.53. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 2: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 3**

La figura 4.54 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.

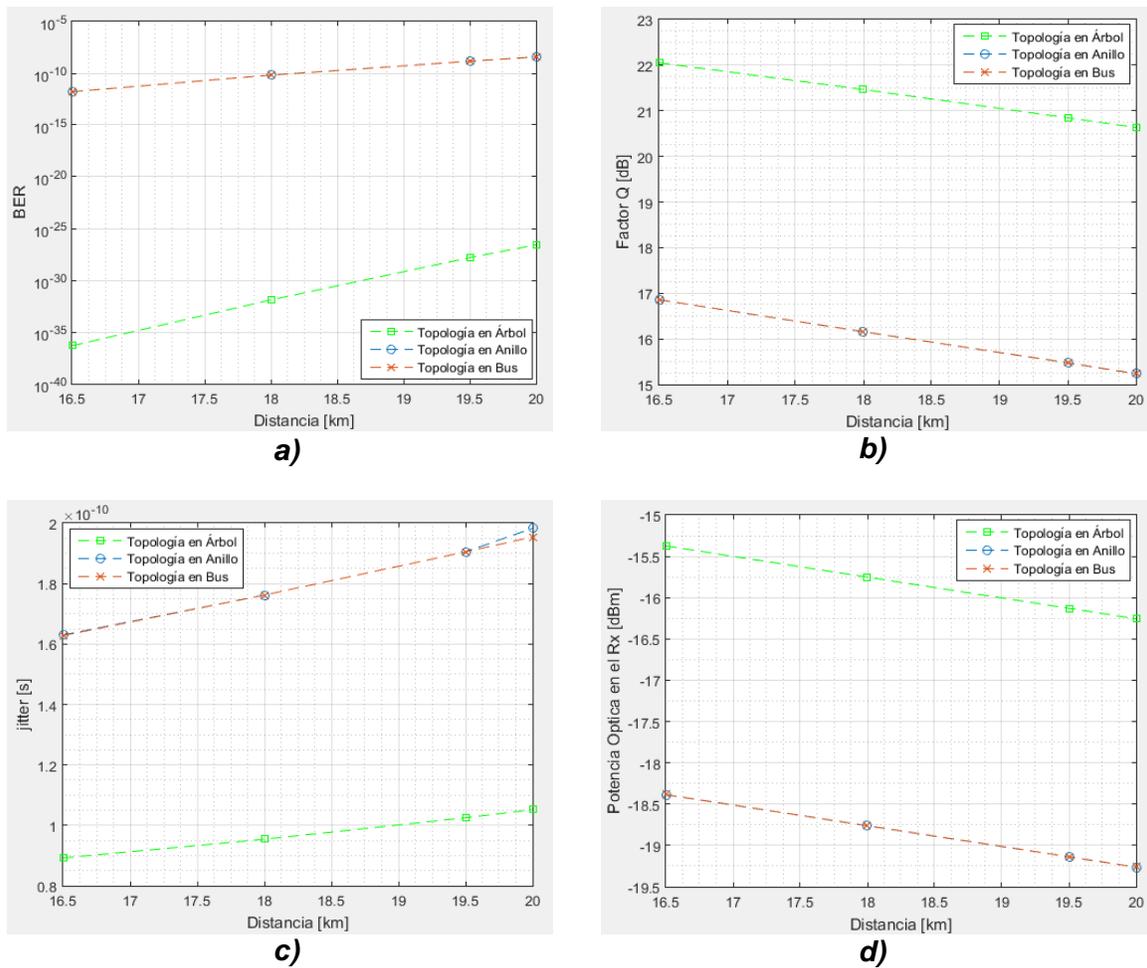
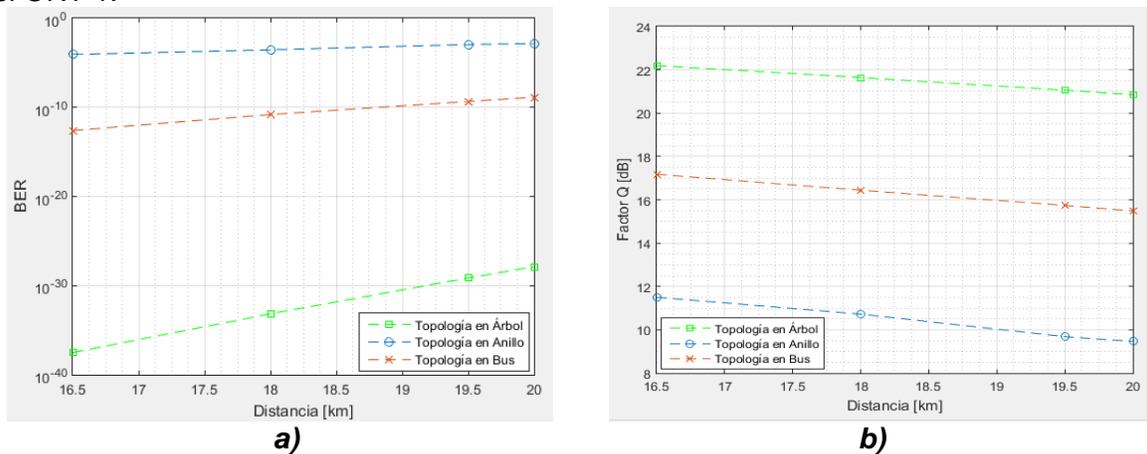


Figura 4.54. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 3: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

• **ONT 4**

La figura 4.55 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.



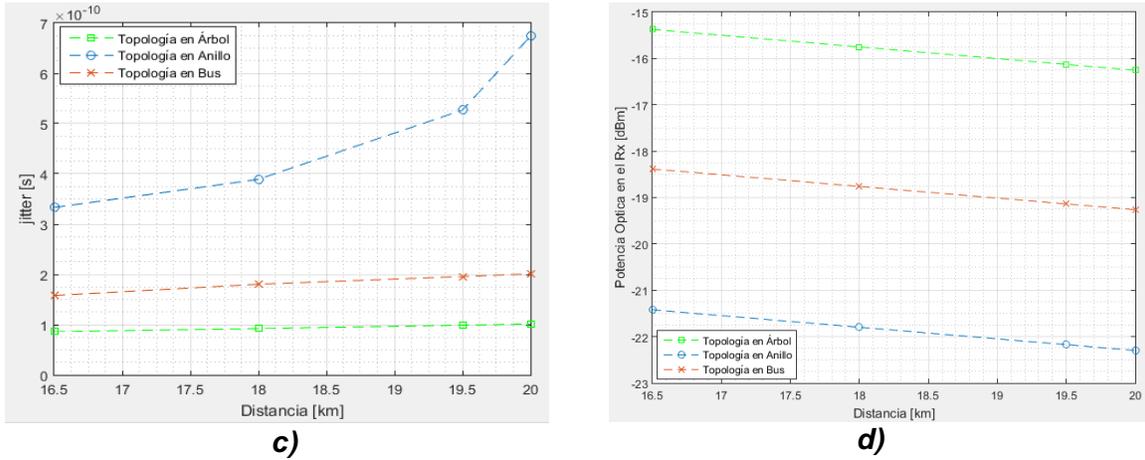


Figura 4.55. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de Internet/VoIP en el Caso de estudio No. 2b – ONT 4: a) BER, b) Factor Q, c) Jitter, d) Potencia Óptica en el receptor.

Tomando en cuenta lo mostrado por la figura 4.52, 4.53, 4.54 y 4.55 y las condiciones de análisis que se establecieron previamente para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) que presentan mejor desempeño en cada ONT, como se observa en la tabla 4.23.

Tabla 4.23. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2b. Por los autores.

	BER	Factor Q	Jitter	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en bus Topología en anillo	Topología en bus Topología en anillo	Topología en anillo Topología en bus	Topología en anillo Topología en bus
ONT 2	Topología en anillo Topología en bus Topología en árbol			
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol

En la tabla 4.23 se puede observar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en la tasa de error de bit, la mejor calidad de enlace, el retardo más bajo y la menor atenuación en el enlace, es la topología en árbol en la mayoría de nodos ONT. Por lo tanto se puede determinar que la topología en árbol es la que mejor se ajusta a las condiciones establecidas al inicio del desarrollo de la presente fase.

- **Servicio CATV Analógico.** A continuación se muestra el comportamiento de cada parámetro de desempeño para el servicio CATV Analógico con las tres topologías de red para cada uno de los ONT que compone el sistema, en el caso de estudio No. 2b.

- **ONT 1**

La figura 4.56 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 1.

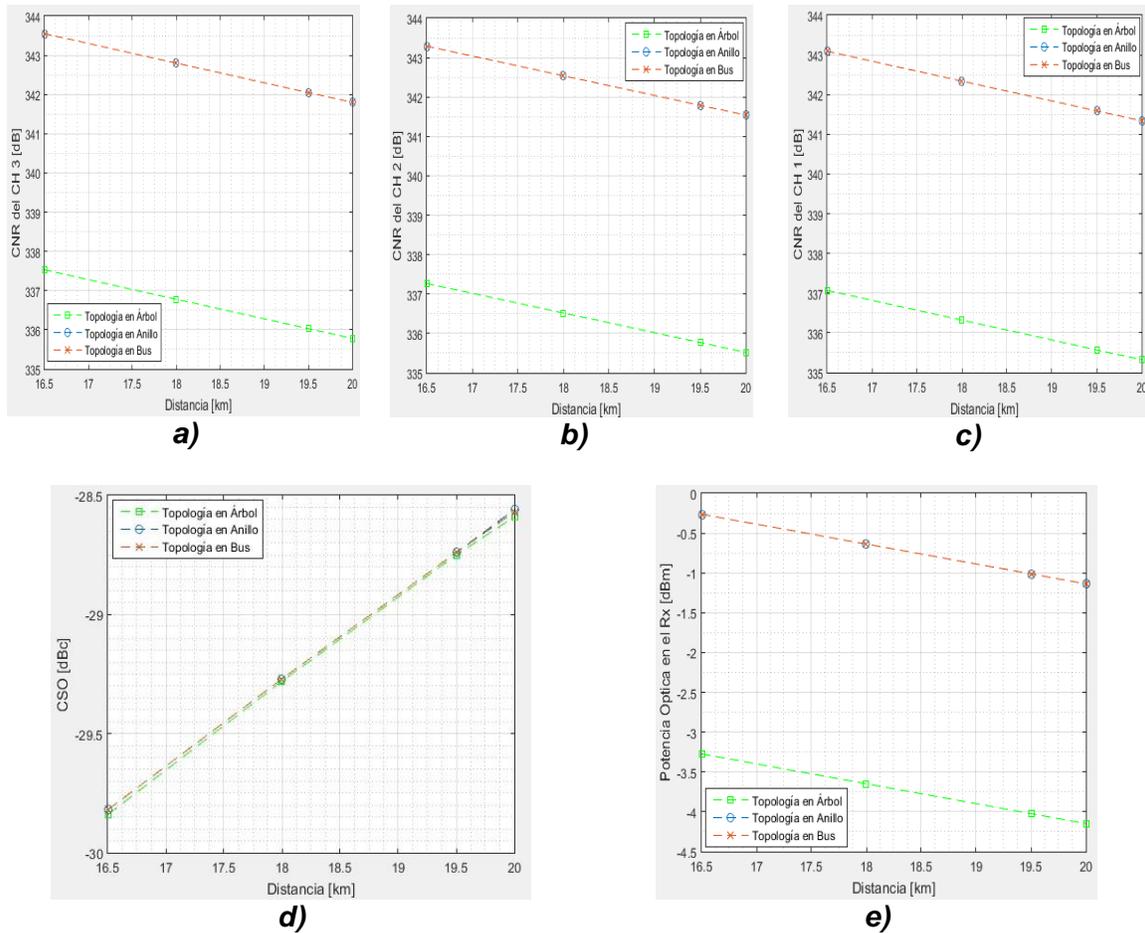


Figura 4.56. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 1: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 2**

La figura 4.57 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 2.

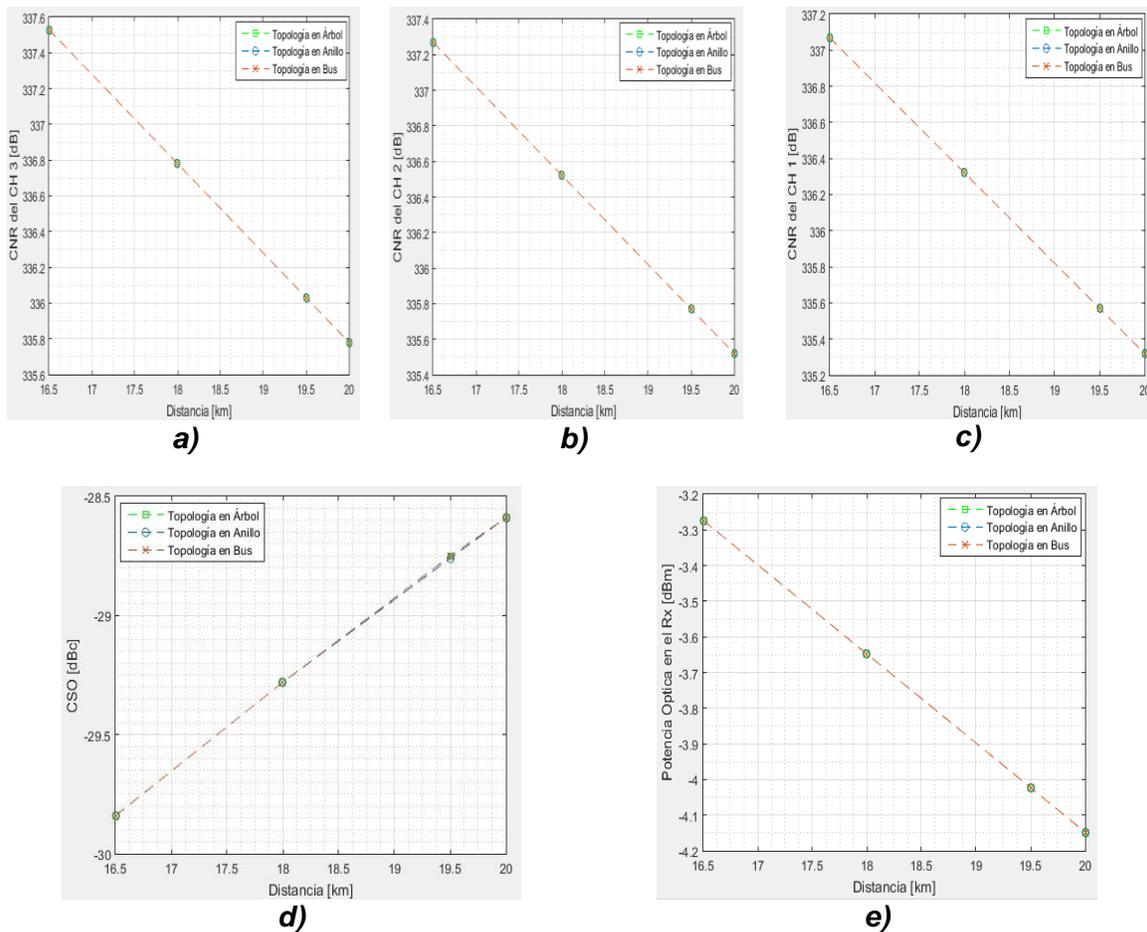
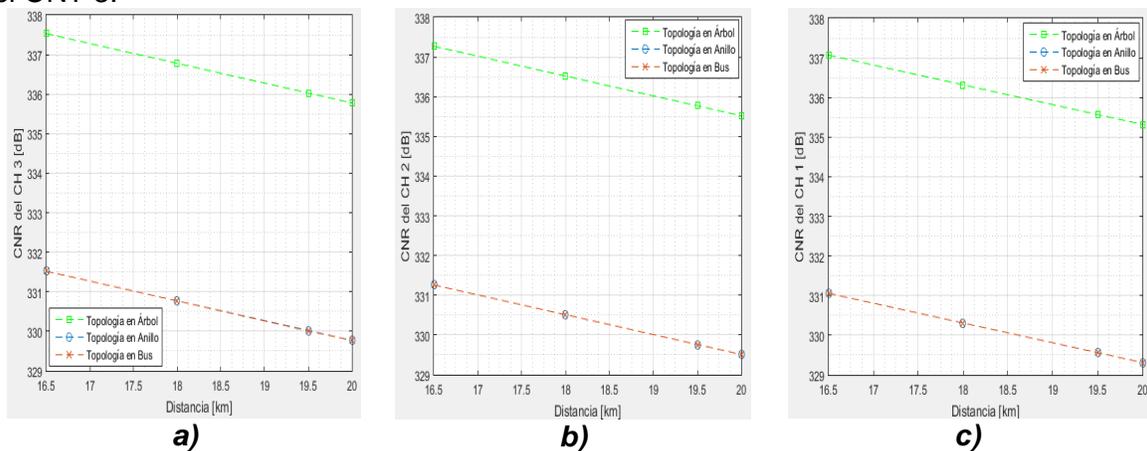


Figura 4.57. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 2: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

- ONT 3

La figura 4.58 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 3.



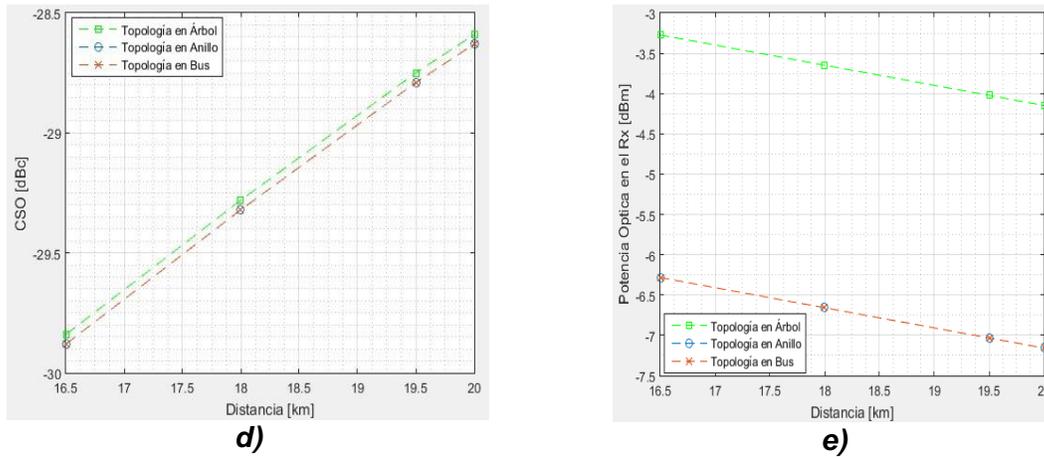
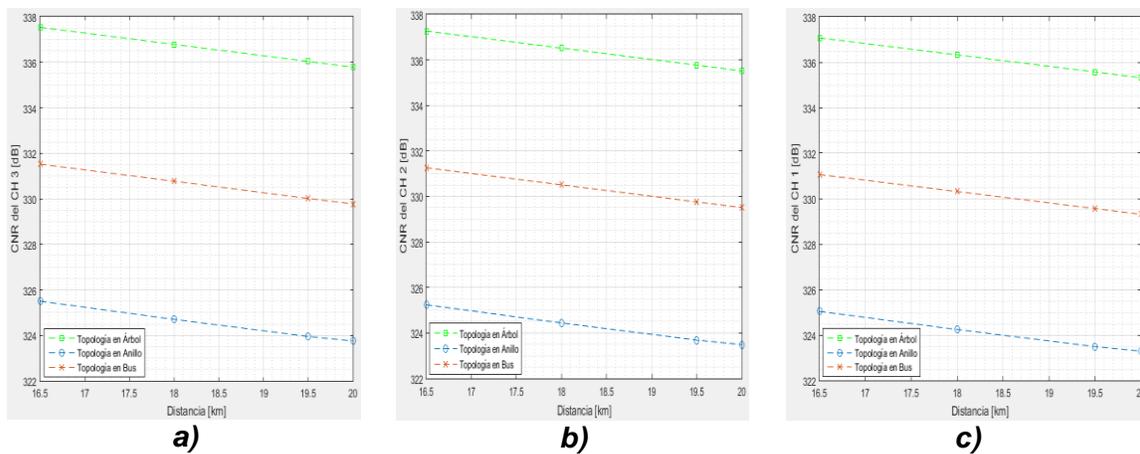


Figura 4.58. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 3: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

- **ONT 4**

La figura 4.59 muestra el comportamiento de los parámetros de desempeño obtenidos en el ONT 4.



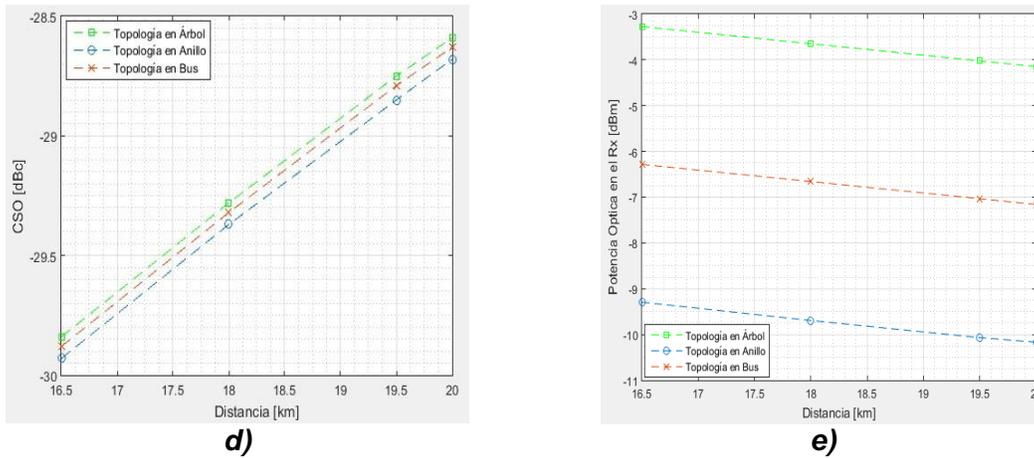


Figura 4.59. Distancia [km] vs. Parámetros de desempeño de CATV analógico en el Caso de estudio No. 2b – ONT 4: a) CNR – CH3, b) CNR – CH2, c) CNR – CH1, d) CSO, e) Potencia Óptica en el receptor.

Considerando el comportamiento que ilustra la figura 4.56, 4.57, 4.58, 4.59 y a partir de las condiciones de análisis que fueron previamente establecidas para cada parámetro, se establece la topología (o topologías) con mejor desempeño en cada ONT, como se observa en la tabla 4.24.

Tabla 4.24. Topología(s) con mejor desempeño en el caso de estudio No. 2b. Por los autores.

	CNR-CH 3	CNR-CH 2	CNR-CH 1	CSO	Potencia óptica en el receptor
ONT 1	Topología en anillo Topología en bus	Topología en anillo Topología en bus	Topología en anillo Topología en bus	Topología en árbol	Topología en anillo Topología en bus
ONT 2	Topología en anillo Topología en bus Topología en árbol				
ONT 3	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en bus Topología en anillo	Topología en árbol
ONT 4	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en árbol	Topología en anillo	Topología en árbol

En la tabla 4.24 se puede apreciar que con la topología que se obtiene los niveles más bajos en ruido, menores niveles de intermodulación y menor atenuación en el enlace, es la topología en árbol en la mayoría de nodos ONT. Por lo tanto, la topología en árbol es la

que mejor se ajusta a las condiciones establecidas para cada parámetro de desempeño al inicio del desarrollo de la presente fase.

Los precedentes gráficos sintetizan el comportamiento de los parámetros de desempeño del servicio Internet/VoIP y CATV analógico, con respecto a la variación de la distancia entre el OLT y cada ONT, obtenidos en las simulaciones. Una observación general es que los parámetros tienen una dependencia con la distancia, y particularmente la relación que tienen es la siguiente: El parámetro BER, Jitter y el CSO son directamente proporcionales y, el factor Q, potencia en el receptor y el CNR son inversamente proporcionales.

En el servicio Internet/VoIP se considera la relación existente entre el parámetro BER y el factor Q, presentada en el capítulo 3, con el fin de abarcar el comportamiento del factor Q con relación al obtenido en el parámetro BER. Además, en el servicio de CATV analógico se considera la relación inversamente proporcional existente en el comportamiento entre la potencia en recepción y la CNR con el objetivo de cubrir el comportamiento de CNR en cada canal con relación al comportamiento obtenido en la potencia en recepción.

Para el servicio Internet/VoIP se puede observar que:

- En la figura 4.44a y 4.52a se muestra el comportamiento del parámetro BER en el ONT 1. En estas graficas se observa que con la topología en anillo y en bus se ostentan niveles de BER, similares entre ellas, y menores que el presentado con la topología en árbol. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia la topología en bus y anillo presentan una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en árbol. Adicionalmente, en la figura 4.44b y 4.52b se muestra que el comportamiento del Factor Q presenta las mismas condiciones de comportamiento que el parámetro BER.
- En la figura 4.44c y 4.52c se muestra el comportamiento del parámetro Jitter en el ONT 1. En estas graficas se logra visualizar que las topologías en anillo y bus exhiben niveles de Jitter, similares entre ellas, y menores que el presentado por la topología en árbol. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia la topología en árbol presenta una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en anillo y bus.
- En la figura 4.44d y 4.52d se muestra el comportamiento de la potencia óptica en recepción en el ONT 1. En estas gráficas se logra visualizar que las topologías en anillo y bus muestran medidas de potencia, similares entre ellas, y mayores al presentado en la topología en árbol, la causa principal es la atenuación presentada en el enlace entre el OLT y el ONT 1 en la topología en bus y anillo, la cual es similar entre ellas, y menor que para la topología en árbol. Se analiza que a medida que se amplía la distancia las topologías presentan una razón de cambio similar.
- En la figura 4.45a y 4.53a se muestra el comportamiento del parámetro BER en el ONT 2. En estas graficas se detalla que los niveles obtenidos con la topología en árbol no presentan cambios considerables, en comparación al comportamiento presentado en la ONT 1. Por otro lado, con la topología en bus y en anillo incrementaron los niveles de BER, de manera abrupta, que alcanzaron los niveles

obtenidos con la topología en árbol. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia, las topologías presentan una razón de cambio similar. Adicionalmente, en la figura 4.45b y 4.53b se observa que el comportamiento del factor Q presenta las mismas condiciones de comportamiento que el parámetro BER.

- En la figura 4.44c y 4.52c se muestra el comportamiento del parámetro Jitter en el ONT 2. En estas graficas se detalla que los niveles mostrados por la topología en árbol presentan una disminución en comparación al comportamiento presentado en la ONT 1, por otro lado, la topología en bus y en anillo incrementaron los niveles de Jitter, de manera tan considerable, que adquirieron los mismos niveles mostrados por la topología en árbol. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia, la topología en árbol presenta una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en anillo y bus.
- En la figura 4.45d y 4.53d se muestra el comportamiento de la potencia óptica en recepción en el ONT 2. En estas graficas se analiza que los niveles mostrados por la topología en árbol no exhiben contrastes considerables, en balance al comportamiento presentado en la ONT 1, por otra parte, la topología en bus y en anillo disminuyeron los niveles de potencia óptica en recepción, de manera tan notable, que alcanzaron niveles similares a los mostrados por la topología en árbol, la cual en la ONT 1 presentaba los niveles más bajos. La razón principal por la que las topologías ostentan niveles similares de potencia en recepción, es que la atenuación presente en la conexión entre el OLT y ONT 2, es similar en las tres topologías. Adicionalmente, se analiza que a medida que se aumenta la distancia las topologías presentan una razón de cambio similar.
- En la figura 4.46a y 4.54a se muestra el comportamiento del parámetro BER en el ONT 3. En estas graficas se analiza que los niveles mostrados por la topología en árbol exhiben una disminución, en comparación al comportamiento presentado en el ONT 1 y el ONT 2, por otra parte, con la topología en bus y en anillo disminuyeron en iguales proporciones los niveles de BER, y de manera tan cuantiosa, que alcanzaron unos niveles muy altos con respecto a los niveles presentados en el ONT 2. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia con la topología en árbol se presenta una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en anillo y en bus. Adicionalmente en la figura 4.46b y 4.54b se muestra que el comportamiento del factor Q presenta las mismas condiciones de comportamiento que el parámetro BER.
- En la figura 4.46c y 4.54c se muestra el comportamiento del parámetro Jitter en el ONT 3. En estas graficas se analiza que los niveles mostrados por la topología en árbol exhiben un aumento, en comparación al comportamiento presentado en el ONT 1 y el ONT 2, por otra parte, la topología en bus y en anillo incrementaron, en iguales proporciones los niveles de Jitter, y de manera tan importante, que alcanzaron una relación en los niveles de aproximadamente dos veces sobre los niveles expuestos por la topología en árbol en esta ONT. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia la topología en árbol presenta una razón de cambio menor a la experimentada por la topología en anillo y bus.

- En la figura 4.45d y 4.53d se muestra el comportamiento del parámetro potencia óptica en recepción en el ONT 3. En estas graficas se logra visualizar que las topologías en anillo y bus ostentan niveles de potencia, similares entre ellas y menores al presente en la topología en árbol, esto se debe principalmente a la atenuación presente en la conexión, entre el OLT y el ONT 3, la cual en la topología en bus y anillo es similar entre ellas, y mayor al de la topología en árbol. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia las topologías presentan una razón de cambio similar.
- En la figura 4.47a y 4.55a se muestra el comportamiento del BER en el ONT 4. En estas graficas se detalla que con la topología en anillo se presenta un decremento mayor de los niveles BER, con respecto a la topología en bus y en árbol. Por otro lado, con la topología en árbol y en bus permanecen los niveles que se ostentaron en el ONT 3. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia la topología en árbol presenta una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en anillo y bus. Adicionalmente en la figura 4.47b y 4.55b se muestra que el comportamiento del factor Q presenta las mismas condiciones de comportamiento en las topologías que el parámetro BER.
- En la figura 4.47c y 4.54c se muestra el comportamiento del parámetro Jitter en el ONT 4. En estas graficas se logra visualizar que la topología en anillo ostenta una disminución mayor en los niveles de Jitter que a la experimentada por la topología en bus. Se analiza que a medida que se aumenta la distancia la topología en árbol presentan una razón de cambio mayor a la experimentada por la topología en anillo y bus.

Con relación al servicio CATV Analógico se tiene lo siguiente:

- En la figura 4.48e y 4.56d se muestra el comportamiento de la potencia óptica recibida en el ONT 1. En estas graficas se logra visualizar que las topologías en anillo y bus ostentan niveles de potencia, similares entre ellas, y mayores a los niveles presentes en la topología en árbol, estos resultados se deben a la atenuación presentada en el enlace entre el OLT y el ONT 1 en la topología en bus y anillo, la cual es menor que a la de la topología en árbol. Adicionalmente, en la figura 4.48a, 4.48b, 4.48c, 4.56a, 4.56b y 4.56c el parámetro CNR presenta las mismas condiciones de comportamiento que la potencia de recepción óptica.
- En la figura 4.48d y 4.56d se muestra el comportamiento del parámetro CSO en el ONT 1. En estas graficas se logra visualizar que con las tres topologías se obtienen niveles de CSO similares.
- En la figura 4.49e y 4.57d se muestra el comportamiento de la potencia óptica en el ONT 2. En estas graficas se logra visualizar que las topologías presentan niveles de potencia similares, lo cual se debe a la atenuación presentada en el enlace entre el OLT y ONT 2, la cual es similar en las tres topologías. Adicionalmente, en la figura 4.49a, 4.49b, 4.49c, 4.57a, 4.57b y 4.57c el parámetro CNR presenta las mismas condiciones de comportamiento que la potencia de recepción óptica.

- En la figura 4.49c y 4.57c se muestra el comportamiento del parámetro CSO en el ONT 2. En estas graficas se observa que en las tres topologías se tienen niveles de CSO similares.
- En la figura 4.50e y 4.58d se muestra el comportamiento de la potencia óptica en el ONT 3. En estas graficas se logra visualizar que las topologías en anillo y bus exhiben niveles de potencia similares entre ellas, y menores a los niveles presentes en la topología en árbol, la causa principalmente es la atenuación presente en el enlace entre el OLT y ONT 3 en la topología en bus y anillo, es similar entre ellas y mayor que a la de la topología en árbol. Adicionalmente, en la figura 4.50a, 4.50b, 4.50c, 4.58a, 4.58b y 4.58c el parámetro CNR para cada canal presenta las mismas condiciones de comportamiento que la potencia de recepción.
- En la figura 4.50c y 4.58c se muestra el comportamiento del parámetro CSO en el ONT 3. En estas graficas se logra visualizar que con la topología en anillo y bus se presenta una disminución en los niveles de CSO en relación a la red con topología en árbol, con la cual se ostenta los mismos valores que en el ONT 3.
- En la figura 4.51e y 4.59d se muestra el comportamiento de la potencia óptica en el ONT 4. En estas graficas se logra visualizar que las topologías en anillo ostentan una disminución considerable en los niveles de potencia que el presentado por la topología en bus y en árbol, principalmente esto es causado a la atenuación presente en el enlace entre el OLT y ONT 4 la cual es mayor en la topología en anillo que la presentada por la topología en bus y en árbol. Por otra parte, con la topología en árbol y bus no se presentan cambios considerables en los niveles con respecto al ONT 3. Adicionalmente, en la figura 4.51a, 4.51b, 4.51c, 4.59a, 4.59b y 4.59c se observa que el comportamiento del parámetro CNR presenta las mismas condiciones de comportamiento que la potencia de recepción óptica.
- En la figura 4.51c y 4.59c se muestra el comportamiento del parámetro CSO en el ONT 4. En estas graficas se logra visualizar que con la topología en anillo se presenta una disminución considerable en los niveles de CSO con respecto a la experimentada en la topología en bus y en árbol. Por otro lado, con la topología en árbol y en bus no se presenta un cambio significativo en el nivel de CSO con respecto al obtenido en el ONT 3.

Después de llevar a cabo la interpretación y análisis para cada caso descrito, las tablas que se muestran a continuación, sintetizan los resultados obtenidos de los parámetros de desempeño de los servicios Triple Play que se afectan por la topología de red FTTH-GEPON, de tal manera que se pueda visualizar comparativamente su comportamiento.

La tabla 4.25 muestra los valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1a para la distancia máxima establecida por el estándar para GEPON con la cual se llevó a cabo el estudio, que corresponde a 20 Km desde el OLT hasta cada ONT. Es preciso mencionar que a esta distancia se obtuvieron los valores máximos de BER y Jitter, y los valores mínimos de Factor Q y Potencia recibida.

Tabla 4.25. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1a con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km). Por los autores.

Topología	ONT	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en el receptor [dBm]
Servicio Internet/VoIP					
Árbol	ONT 1	1e-40	24.512361	0.012800	-14.464580
	ONT 2	1e-40	24.488600	0.013205	-14.464580
	ONT 3	1e-40	24.181059	0.013756	-14.464580
	ONT 4	1e-40	24.172475	0.012210	-14.464580
Bus	ONT 1	1e-40	26.572500	0.010167	-11.449996
	ONT 2	1e-40	24.384460	0.011707	-14.460753
	ONT 3	7.49498e-36	22.240777	0.015717	-17.472093
	ONT 4	6.15343e-30	21.0750	0.018000	-18.974650
Anillo	ONT 1	1e-40	26.455951	0.010161	-11.461220
	ONT 2	1e-40	24.091343	0.012482	-14.471490
	ONT 3	9.8613e-36	22.185102	0.017025	-17.481751
	ONT 4	2.72524e-21	19.576200	0.022100	-20.492013
Servicio CATV Digital					
Árbol	ONT 1	1.47961e-4	11.1714	0.2199	-8.546120
	ONT 2	1.47985e-4	11.1713	0.2759	-8.546120
	ONT 3	1.47984e-4	11.1713	0.2222	-8.546120
	ONT 4	1.47967e-4	11.1714	0.2720	-8.546120
Bus	ONT 1	1.40984e-4	11.2013	0.2981	-5.535799
	ONT 2	1.48066e-4	11.1710	0.3667	-8.545761
	ONT 3	1.51476e-4	11.1568	0.3524	-11.555579
	ONT 4	1.52471e-4	11.1527	0.3962	-13.055837
Anillo	ONT 1	1.41277e-4	11.2000	0.3272	-5.547252
	ONT 2	1.48209e-4	11.1704	0.3694	-8.557500
	ONT 3	1.51504e-4	11.1567	0.3550	-11.567757
	ONT 4	1.53224e-4	11.1496	0.3580	-14.578016

De la tabla 4.25 y el análisis de los resultados de simulación del caso 1a se tienen las siguientes conclusiones:

- Los resultados para el servicio de Internet/VoIP de Factor Q y Jitter con la topología en árbol muestran que para cada ONT no son iguales, presentándose una pequeña variación para cada uno de ellos. Puede suponerse que al observar que sus nodos se encuentran bajo las mismas condiciones de distancia, tendría que obtenerse el mismo valor de dichos parámetros en cada ONT. Este comportamiento se debe a que la herramienta de simulación trata de ser lo más real posible al procesar las señales que se transmiten en la red. Para el servicio CATV Digital, se presenta el mismo comportamiento para los parámetros BER, Factor Q y Jitter. Sin embargo, para los dos servicios, el parámetro potencia

recibida si es el mismo para cada ONT, como es de esperarse al encontrarse cada nodo bajo las mismas condiciones de atenuación.

- Para el servicio CATV Digital, con las topologías en bus y anillo, si bien el desempeño se ve afectado negativamente para cada ONT, la diferencia es pequeña, en contraste con el servicio de Internet/VoIP donde se observa que la diferencia es más significativa. Esto indica que la utilización de un dispositivo amplificador y de un esquema de modulación de bajo nivel, en el caso de la cabecera CATV, permite que la señal sea más inmune a degradaciones que afecten su calidad.
- En el ONT 1 de la red con topología en bus y anillo, se presenta un mejor desempeño que con la topología en árbol, principalmente, gracias a que este se conecta a la red con un *splitter* de relación 1:2.
- Para el ONT 3 y el ONT 4 se presentan los mayores niveles de BER y los niveles más bajos de Factor Q con las topologías de red en bus y anillo, lo cual es resultado de su ubicación en la red, puesto que para estas dos topologías la señal óptica atraviesa más elementos de red, en comparación con la topología en árbol, provocando más pérdidas y afectando su desempeño. Lo anterior demuestra que a pesar de que todos los ONT se encuentren a la misma distancia al OLT, los elementos de la red de distribución óptica propios de cada topología producen un deterioro en el desempeño.
- Los resultados de desempeño más deteriorados se presentan para el ONT 4 con topología en anillo, el cual se encuentra en la última posición de la red experimentando todas las degradaciones propias de los tramos de fibra óptica y las pérdidas introducidas por los *splitters* que componen la red.
- El desempeño de la red se ve afectado de una manera diferente con cada topología, en donde, la topología de red en árbol es la mejor en cuanto a prestar servicios Triple Play con un buen desempeño, que se puede reflejar para cada uno de sus ONT de manera más equitativa con relación a las otras topologías.
- Las topologías de red que presentan un mayor impacto en los parámetros de desempeño del servicio Triple Play son la red en bus y la red en anillo.

En la tabla 4.26 se ilustra los resultados de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1b para la distancia máxima (20 Km) desde el OLT hasta cada ONT, con la que se llevó a cabo el estudio.

Tabla 4.26. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 1b con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km). Por los autores.

Topología	ONT	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en el receptor [dBm]
Servicio Internet/VoIP					
Árbol	ONT 1	1e-40	24.645634	0.013112	-14.460347
	ONT 2	1e-40	24.317896	0.012926	-14.460347
	ONT 3	1e-40	24.361781	0.015284	-14.460347
	ONT 4	1e-40	24.340125	0.013256	-14.460347
Bus	ONT 1	1e-40	26.572500	0.008968	-11.449996
	ONT 2	1e-40	24.520092	0.012075	-14.462999
	ONT 3	1.8465e-36	22.243177	0.016384	-17.469802
	ONT 4	4.31238e-30	21.08980	0.018159	-18.972548
Anillo	ONT 1	1e-40	26.568211	0.009871	-11.460743
	ONT 2	1e-40	24.383802	0.013183	-14.471629
	ONT 3	7.42297e-36	22.188540	0.017189	-17.484391
	ONT 4	3.1666e-21	19.577735	0.020900	-20.494828
Servicio CATV Digital					
Árbol	ONT 1	1.47961e-4	11.1714	0.2253	-8.546120
	ONT 2	1.48076e-4	11.1709	0.2928	-8.546120
	ONT 3	1.48075e-4	11.1709	0.2958	-8.546120
	ONT 4	1.48035e-4	11.1711	0.2950	-8.546120
Bus	ONT 1	1.40984e-4	11.2013	0.2708	-5.535799
	ONT 2	1.48123e-4	11.1707	0.3214	-8.548847
	ONT 3	1.5147e-4	11.1568	0.3342	-11.555311
	ONT 4	1.52512e-4	11.1525	0.3336	-13.056321
Anillo	ONT 1	1.41094e-4	11.2008	0.2984	-5.547966
	ONT 2	1.48060e-4	11.1701	0.3325	-8.555921
	ONT 3	1.51501e-4	11.1567	0.3438	-11.570069
	ONT 4	1.5327e-4	11.1494	0.3421	-14.580217

De la tabla 4.26 y el análisis de los resultados de simulación del caso 1b se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los resultados en los valores de los parámetros de desempeño son similares para cada ONT con la topología de red en árbol, a diferencia de la topología en bus y anillo, lo que demuestra el impacto de utilizar una topología de red diferente.
- Los parámetros de desempeño BER, Factor Q y Jitter del servicio CATV Digital, si bien se impactan por el cambio de la topología de red, su deterioro no es tan significativo como el que se presenta en el servicio Internet/VoIP. Por su parte, el

parámetro potencia recibida tiene el mismo comportamiento en los dos servicios, impactándose de igual manera al cambiar la topología de la red.

- Para el ONT 2 los resultados de los parámetros de desempeño son similares en las tres topologías de red utilizadas, indicando que para éste se tienen condiciones similares de atenuación y pérdidas con todas las topologías. Sin embargo, se nota un desempeño más bajo con la topología en anillo, esto se explica por la presencia de un tramo de fibra óptica adicional en su estructura (entre el circulador y el primer *splitter*, si se compara con la topología en bus), lo que produce las degradaciones propias de este medio de transmisión.
- De manera similar al caso 1a, los resultados de más bajo desempeño se obtienen para el ONT 4 cuando se utiliza una red con topología en anillo.
- Con la topología de red en árbol, se obtuvieron resultados de los parámetros de desempeño de una manera más equilibrada para cada ONT, evidenciando un mejor comportamiento respecto a las otras topologías, presentándose un mayor impacto en los parámetros de desempeño con las topologías de red en bus y anillo.

La tabla 4.27 muestra los valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2a para la distancia máxima establecida por el estándar para GEPON con la cual se llevó a cabo el estudio, que corresponde a 20 Km desde el OLT hasta cada ONT.

Tabla 4.27. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2a con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km). Por los autores.

Servicio Internet/VoIP						
Topología	ONT	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en el receptor [dBm]	
Árbol	ONT 1	2.0723e-30	21.1389	0.1086	-16.2547	
	ONT 2	5.1623e-30	21.0777	0.0978	-16.2547	
	ONT 3	2.6795e-27	20.6354	0.1052	-16.2547	
	ONT 4	1.3081e-28	20.8547	0.1013	-16.2547	
Bus	ONT 1	1.1186e-77	25.3991	0.0542	-13.2532	
	ONT 2	1.2657e-29	21.0169	0.0967	-16.2625	
	ONT 3	3.8522e-9	15.2307	0.1956	-19.2655	
	ONT 4	1.2961e-9	15.4984	0.2003	-19.2655	
Anillo	ONT 1	5.8479e-75	25.2400	0.0548	-13.2572	
	ONT 2	1.2396e-29	21.0184	0.0969	-16.2625	
	ONT 3	4.0013e-9	15.2211	0.1956	-19.2712	
	ONT 4	1.4125e-3	9.5024	0.4316	-22.2811	
Servicio CATV Analógico						
	ONT	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
Árbol	ONT 1	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
	ONT 2	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
	ONT 3	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787

	ONT 4	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
Bus	ONT 1	-28.57	341.34	341.54	341.8	-1.13692
	ONT 2	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14769
	ONT 3	-28.62	329.31	329.51	329.77	-7.15814
	ONT 4	-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.15814
Anillo	ONT 1	-28.57	341.34	341.54	341.8	-1.13663
	ONT 2	-28.58	335.32	335.52	335.78	-4.14729
	ONT 3	-28.62	329.31	329.51	329.77	-7.15771
	ONT 4	-28.68	323.29	323.49	323.75	-10.1680

De la tabla 4.27 se tienen las siguientes conclusiones:

- Los mejores resultados para los parámetros de desempeño del servicio Internet/VoIP se obtienen con la topología en árbol de manera uniforme en comparación con las demás topologías. Si bien se observan ciertas variaciones en los valores de los parámetros BER, Factor Q y Jitter, entre cada ONT, estas no son tan marcadas en contraste con la topologías bus y anillo.
- El parámetro de potencia recibida permanece constante en los ONT de la topología de red en árbol, mientras que con las topologías en bus y anillo, este valor se afecta drásticamente, observándose variaciones marcadas entre cada uno de los nodos que componen estas dos topologías. Específicamente, en el ONT 4 de la topología en anillo se tienen los niveles más altos de atenuación, en comparación con las otras topologías.
- El nivel de BER más alto y de Factor Q más bajo se obtiene en el ONT 4 con topología en anillo. Esto indica que si se requieren añadir más nodos a esta red, el desempeño no será el mejor, a diferencia de la topología en árbol, en la cual el desempeño en este nodo es significativamente mejor. Lo anterior demuestra el impacto que se presenta por parte de la topología de red, además indica que en términos de escalabilidad la topología en árbol es superior a las demás topologías.
- Los resultados obtenidos para el servicio CATV analógico presentan un mejor comportamiento en la topología en árbol. A diferencia de los parámetros del servicio digital, las variaciones para el servicio analógico es uniforme en todos los ONT que componen esta topología, puesto que no se presentan variaciones en los valores obtenidos en cada ONT.
- Los valores de CNR sufren variaciones significativas entre cada ONT de las topologías en bus y anillo, presentándose los niveles más bajos en el ONT 4 de la topología en anillo. Por su parte, los valores del CSO, si bien se ven afectados al cambiar de topología, las variaciones no son tan significativas de un ONT a otros, a diferencia del CNR, presentándose niveles similares con las topologías en bus y anillo.
- Los valores obtenidos para los parámetros CSO sufren una disminución principalmente a causa de la atenuación presente en cada topología, como se observó en las gráficas expuestas previamente.

En la tabla 4.28 se ilustra los resultados de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2b para la distancia máxima (20 Km) desde el OLT hasta cada ONT, con la que se llevó a cabo el estudio.

Tabla 4.28. Valores de los parámetros de desempeño obtenidos en el caso 2b con cada topología de red para cada ONT (Distancia 20 Km). Por los autores.

Servicio Internet/VoIP						
Topología	ONT	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en el receptor [dBm]	
Árbol	ONT 1	2.0723e-30	21.1389	0.1086	-16.25479	
	ONT 2	5.1623e-30	21.0777	0.0978	-16.25479	
	ONT 3	2.6795e-27	20.6354	0.1052	-16.25479	
	ONT 4	1.3081e-28	20.8547	0.1013	-16.25479	
Bus	ONT 1	1.1186e-77	25.3991	0.0542	-13.25325	
	ONT 2	7.5041e-30	21.0523	0.0971	-16.25554	
	ONT 3	3.7506e-9	15.2375	0.1954	-19.26220	
	ONT 4	1.3551e-9	15.4877	0.2009	-19.26220	
Anillo	ONT 1	6.4351e-77	25.3552	0.0540	-13.25446	
	ONT 2	1.0369e-29	21.0308	0.0973	-16.25778	
	ONT 3	3.7995e-9	15.2342	0.1983	-19.26399	
	ONT 4	1.4666e-3	9.4689	0.6737	-22.29822	
Servicio CATV Analógico						
	ONT	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
Árbol	ONT 1	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
	ONT 2	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
	ONT 3	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
	ONT 4	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14787
Bus	ONT 1	-28.57	341.34	341.54	341.80	-1.13692
	ONT 2	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14782
	ONT 3	-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.15839
	ONT 4	-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.15839
Anillo	ONT 1	-28.56	341.34	341.54	341.8	-1.13683
	ONT 2	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.14765
	ONT 3	-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.15825
	ONT 4	-28.68	323.29	323.49	323.75	-10.1686

De la tabla 4.28 se tienen las siguientes conclusiones:

- La topología de red en árbol presenta un mejor comportamiento en comparación con las demás topologías, dado que los valores de los parámetros de desempeño para cada servicio en cada uno de los ONT que conforman la red son uniformes sin presentar variaciones abruptas en comparación con la topología en bus y la topología en anillo.
- En los terminales ubicados en las últimas posiciones de la topología en bus y anillo, se presenta el desempeño más deteriorado, en especial con la topología en anillo se obtiene un desempeño más bajo en el último terminal (ONT 4). En comparación con la topología en árbol, se obtienen mejores resultados en este mismo terminal, lo que demuestra el impacto que tiene la topología de red en los parámetros de desempeño. Sin embargo, el parámetro CSO sufre una leve variación en su valor al cambiar de topología, a diferencia de los otros parámetros. Para el caso 2a y el caso 2b, los resultados obtenidos para el CSO presentan un comportamiento similar a los resultados obtenidos en el estudio realizado en [149], tomado como referencia para verificar el correcto funcionamiento del sistema CATV analógico implementado. En el anexo C (sección C.3) se expone la caracterización del parámetro CSO en función del sistema y adicionalmente se hace un contraste con los resultados del trabajo citado anteriormente.
- Al igual que en los resultados obtenidos para el caso 1, en el caso 2 se observa que las topologías en bus y anillo son las que mayor impacto producen en los parámetros de desempeño evaluados, puesto que con la topología en árbol dichos parámetros no sufren cambios trascendentales entre cada ONT.

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en las simulaciones ejecutadas para cada caso de estudio. Se realizó el análisis de los parámetros de desempeño de servicios Triple Play evaluados con tres topologías de red y se concluyó que la red con topología en árbol presenta el mejor comportamiento en comparación con las redes con topología en bus y anillo, las cuales presentan mayor afectación en los parámetros de desempeño.

Con lo realizado en el presente capítulo, se da cumplimiento al objetivo específico número tres: **“Evaluar mediante simulación, el desempeño de servicios Triple Play en una red FTTH-GEPON con topología en árbol, anillo y bus”** y por ende, al objetivo general del trabajo de grado: **“Analizar el impacto de la topología de red FTTH-GEPON en el desempeño de servicios Triple Play”**.

El siguiente capítulo presenta las conclusiones a nivel general que se enmarcan en el desarrollo del presente proyecto, así como las recomendaciones y trabajos futuros relacionados con redes FTTH-GEPON.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que surgen del desarrollo del trabajo de grado. Las conclusiones se dan respecto a la topología de red, al desarrollo del trabajo de grado y a la herramienta de simulación. Las recomendaciones abarcan aspectos relacionados a la metodología del trabajo y a la herramienta de simulación. Finalmente, los trabajos futuros se presentan respecto a las redes FTTH-PON, los servicios Triple Play y las topologías de red.

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. Respecto a los resultados de simulación y la topología de red

- En las dos maneras de proporcionar Servicios Triple Play (Internet/VoIP y CATV digital o analógico) se presenta un impacto en sus parámetros de desempeño de acuerdo a la topología en la que se configura la red mediante los cuales son proporcionados.
- En las dos maneras de proporcionar Servicios Triple Play los mejores resultados en los parámetros de desempeño se obtienen con una topología de red en árbol. Si bien en el ONT 1 las topologías de red en bus y anillo tienen un mejor comportamiento en cuanto al desempeño, no resultaría equitativo para los suscriptores que únicamente uno solo tuviese mejor desempeño estando todos bajo las mismas condiciones de transmisión por parte del OLT, es por esto que en términos de ofrecer un desempeño equánimemente distribuido para todos los terminales es la topología en árbol.
- El desempeño que se obtiene con la topología de red en árbol está estrechamente relacionado con la distancia entre el transmisor y el receptor, para cortas distancias se presentan mejores resultados en los parámetros de desempeño, es decir, que a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor aumenta, el desempeño se impacta negativamente.
- El desempeño se afecta no solo por la distancia entre el transmisor y receptor, sino también por la cantidad de elementos de red que la señal atraviese puesto que se tienen mayores pérdidas, lo cual se evidencia en las topologías de red en bus y anillo, es por esto que para los últimos ONT el desempeño se vio drásticamente afectado, de manera que para el ONT 3 y el ONT 4 se obtuvo un desempeño más bajo en las topologías mencionadas anteriormente en comparación con la topología en árbol. Lo anterior indica que si se requieren aumentar más receptores en las topologías bus y en anillo, el desempeño para los últimos nodos de la red no sería el mejor, lo que supone una afectación en la escalabilidad de la red. Es por esto que la topología de red en árbol es la mejor en términos de escalabilidad.
- Para las dos maneras de Servicios Triple Play, el peor de los resultados se obtuvo en el último nodo de la topología de red en anillo. Además, en términos de dificultad de implementación, esta topología presenta una alta complejidad en ser implementada puesto que necesita de más elementos en su configuración, como por ejemplo, un punto de terminación en donde el anillo de acceso se cierre y dos tramos de fibra

óptica adicionales a la fibra alimentadora y a las fibras entre *splitters*, uno después del punto de terminación y antes del primer *splitter*, y otro tramo después del último *splitter* para conectar al punto de terminación. Por su parte, la topología de red en árbol y bus presentan menos complejidad de implementación, siendo la topología en árbol la más sencilla de ser implementada.

5.1.2. Respecto al desarrollo del Trabajo de Grado

- El trabajo de grado desarrollado se caracteriza por ser un aporte para el desarrollo de proyectos de investigación que surgen a partir de este, ya que el tema de tratado no ha sido tenido muy en cuenta en proyectos anteriores, y en especial, realiza un gran aporte a la propuesta de investigación: “*Análisis de requerimientos y simulación de una red DWDM GPON/FTTH en el contexto colombiano para una plataforma multiservicio*” como lo han manifestado sus integrantes. Dicho aporte se realiza con la base teórica consignada en el presente documento, modelos de simulación implementados en los dos modos de la herramienta OptSim® y los resultados obtenidos.
- En el presente trabajo de grado se logró aplicar y consolidar conocimientos adquiridos en asignaturas cursadas, no solamente de redes ópticas, sino también en las que las temáticas impartidas guardan relación con modulación multinivel, transmisión RF (al conseguir implementar un sistema de radio sobre fibra para la prestación del servicio CATV analógico), entre otros temas. Además, se logró adquirir nuevos conocimientos entorno a redes ópticas de acceso, dada su gran actualidad y trascendencia en el campo investigativo de las telecomunicaciones y que de cierta manera carecen de un tratamiento destacado y profundo en las asignaturas impartidas en la facultad enmarcadas en el estudio de este tipo de tecnologías.
- Para la implementación del diseño se debe tener en cuenta la potencia de los transmisores (OLT) y en los receptores (ONT) la sensibilidad de estos dependiendo de los servicios que se pretendan ofrecer.
- La red GEPON con arquitectura FTTH no establece el uso de repetidores en su red de distribución óptica y permite atender a una cantidad considerable de usuarios gracias a la tecnología de transmisión WDM.
- El BER permite hacer una estimación de la calidad de una señal, sin embargo, para tener una certeza sobre la integridad de la señal en determinado punto de la red se debe determinar el SNR y el Factor Q, sin olvidar en ningún momento la potencia con la que se excita el fotodetector y permite recuperar la información dependiendo directamente de la sensibilidad del sensor. Finalmente, la potencia de entrada que percibe el receptor se ve afectada por múltiples factores, como son la atenuación, el ruido, el Jitter y efectos propios de la fibra óptica.
- Para la presente investigación se alcanzaron cuatro niveles de *splitters*. En la topología en árbol se alcanzó un nivel de *splitter*, en la topología en bus y anillo se alcanzaron un máximo de cuatro niveles de *splitters*. Los *splitters* presentan muchas pérdidas debido a la propia división de potencia y la consecuencia de aumentar los

niveles es que aumenten las pérdidas, viéndose necesario compensar estas pérdidas con la reducción de la distancia del enlace de fibra óptica.

- La distancia máxima de la red de distribución óptica u ODN, es decir, la distancia de tendido de fibra óptica entre la OLT y ONT no debe superar los 20 Km. La medida de 20 Km es un valor definido para el estándar GEPON, sin embargo, la longitud de fibra óptica depende del cálculo de la atenuación máxima del enlace, que no debe sobrepasar el de 23.5 dB para una longitud de onda de 1490nm, esta restricción obedece a los umbrales de trabajo de los equipos OLT y ONT. Así se garantiza una óptima operatividad y por tanto un buen servicio a los usuarios finales.
- El hecho de desarrollar el trabajo de grado en los dos modos de simulación permitió adquirir una capacidad de manejo de la herramienta en un mayor nivel respecto al adquirido previamente en ciertas asignaturas, puesto que, si bien los dos modos tienen similitudes, al momento de adentrarse en la manipulación de ellos presentan bastantes diferencias, lo que exige un trato más profundo de cada uno de ellos.
- Uno de los inconvenientes que surgieron en el desarrollo del presente trabajo, se presentó en el momento de la implementación de los espacios del escenario de simulación en el modo bloque de la herramienta. Por un lado, para la topología de red en anillo, este modo no contaba con un dispositivo circulador que permitiera su implementación, a diferencia del modo muestra. Sin embargo, se recurrió a buscar otras alternativas que permitieran lo anterior. En primera instancia, se diseñó un circulador óptico en el modo bloque, tomando como referencia el diseñado en el modo muestra, pero no funcionó. En segunda instancia, profundizando en las guías de usuario que la herramienta ofrece, se encontró que el dispositivo *Repeat Loop Model* (propio del modo bloque) permite, entre otras funciones, crear configuraciones de red en anillo y su manera de operar es muy similar a la de un circulador. Por lo que se optó por esta alternativa para la implementación de esta topología, en este modo de la herramienta. Por otra parte, si bien la herramienta de simulación ofrece redes configuradas con parámetros por defecto y que pueden servir como referencia, en un primer momento se tuvieron que realizar ciertos ajustes para realizar el estudio que este trabajo de grado planteó, que en el caso del modo bloque, provocó que lo que se requería implementar y analizar no funcionara correctamente. Por esta razón, se tuvo que implementar desde cero cada uno de los módulos que componen las redes a utilizar y así tener un mejor control de lo que se deseaba implementar y analizar, pero con base en la red GEPON y otras redes CATV que ofrece el modo bloque como ejemplo. De esta manera, se logró la implementación de lo requerido para el trabajo, pero que también implicó ciertos inconvenientes propios del funcionamiento de la herramienta que fueron superados, lo cual se explica en el segundo literal de la sección 5.1.4.

5.1.3. Respecto al mercado de las telecomunicaciones

- Debido a la gran demanda por parte de los usuarios para tener mejores servicios, sobre todo con respecto a las velocidades de Internet, los operadores se ven obligados a mejorar su infraestructura para poder brindar mejor servicio. Las soluciones más utilizadas en la actualidad son de la familia DSL, las cuales alcanzan

importantes velocidades de transmisión, pero se quedan cortas ante servicios tales como videoconferencia de alta calidad, televisión de alta definición, juegos on-line, entre otros. Además, presentan problemas sobre todo de ruido inducido, no solo de su propia red, sino por las acometidas de los usuarios finales, conjuntamente presentan cuellos de botella, factores que limitan las funcionalidades y la eficiencia de las comunicaciones. Estas tecnologías evitan transformar el bucle de abonado, lo que se convierten en las soluciones más económicas para el usuario final. Por todo ello, concierne disponer de la mejor solución tecnológica para mejorar los problemas de insuficiencia de prestación que se están presentando en las redes de comunicaciones para la comercialización de servicios Triple Play. La tecnología que responde a todas esas necesidades es la red GEPON con arquitectura FTTH, la cual es la apuesta más prometedora en un futuro cercano para optimizar el bucle de abonado, aumentar la tasa de transmisión de bits, mejorar la seguridad y el disminuir el costo de mantenimiento, además de minimizar los problemas de ruido, atenuación e interferencia porque se utilizan equipos pasivos.

- La migración a una nueva tecnología, implica cambios de dispositivos, pero se debe considerar que utilizar la tecnología GEPON no se produce contrastes marcados en la red, ya que dichas tecnologías usan como plataformas con base en el estándar Ethernet, el cual está implementado en 85% de las redes de los proveedores de servicios a nivel mundial.
- La tecnología Triple Play no debe ser solamente pensada como un nuevo servicio, sino también como una definición concerniente a una nueva táctica de negocio, que comprende empaquetamiento y provisión comercial de servicios bajo una red de protocolo centralizado.

5.1.4. Respecto a la herramienta de simulación

- En el caso del modo muestra, se pudo observar que la longitud de onda a utilizar presenta una gran incidencia en los parámetros de simulación que este modo utiliza para llevar a cabo dicho proceso, por lo que entre más alejadas se encuentren las longitudes de onda a utilizar (por ejemplo la de 1490 nm utilizada para la transmisión de Internet/VoIP y la de 1550 nm utilizada para CATV digital, pertenecientes a dos bandas de transmisión diferentes), la herramienta requiere más muestras por bit, configurando por defecto un número elevado. Esto exige la utilización de un tiempo de simulación más elevado que debe ser establecido por el usuario, ya que al necesitar más muestras por bit, más tiempo necesita el simulador para su procesamiento y el correcto despliegue de gráficos que muestren resultados confiables.
- Como se mencionó en la sección 4.1, la herramienta de simulación ofrece módulos independientes de redes CATV y PON tanto en el modo bloque como en el modo muestra que pueden servir como referencia. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en el caso del modo bloque se presentó la necesidad de implementar desde cero tales redes con base en diferentes módulos. Para este modo de simulación, resultó de gran dificultad el intentar unir un módulo de transmisión de CATV analógico que la herramienta proporciona con un módulo de transmisión de

datos puesto que, el modo bloque a diferencia del modo muestra, posee mayor cantidad de parámetros que requieren ser configurados y que para llevar a cabo esta unión de módulos, dichos parámetros tienen que estar de cierta manera sincronizados, presentando una incidencia en el momento de ejecución de la simulación, que con base en algunos cálculos matemáticos fueron configurados y posteriormente se llevó a cabo las simulaciones sin ningún inconveniente. Por su parte, el modo muestra resultó ser más “flexible” en cuanto a la implementación de las redes y en la unión de los módulos necesarios para la implementación, puesto que la configuración principal que engloba a todos los parámetros de los elementos de la red radica en una correcta configuración de los parámetros de simulación.

- Como se mencionó anteriormente, los dos modos de simulación proporcionados por la herramienta presentan diferencias que deben ser tomadas muy en cuenta al momento de su utilización, siendo el modo bloque el que presenta una mayor dificultad de manejo considerando, entre otras cosas, que sus componentes presentan una mayor cantidad de parámetros de configuración para tener en cuenta. Sin embargo, el hecho de que el modo bloque presenta una mayor dificultad que el modo muestra no significa que tenga desventajas, al contrario, fue tomado para desarrollar parte del trabajo de grado ya que para el estudio de los servicios de CATV analógico, además de tener implementaciones para ser tomadas como guía, permitió un mejor manejo y visualización del espectro por parte de sus componentes de análisis de señales y *plotting* (con el fin de permitir una mejor comprensión), lo que permitió apreciar con mayor claridad los parámetros de desempeño propios en este tipo de servicios, a diferencia del modo muestra, sobre el cual se realizó una implementación previa de este servicio, para verificar si lo que se quería estudiar era mostrado de una manera sencilla y fácil de comprender y analizar, pero el manejo que los componentes de medida y análisis de señales le dan al espectro en este modo, no resultó ser la alternativa más comprensible de mostrar los resultados para su posterior análisis.
- Optsim® es una poderosa herramienta que permite desplegar una gran cantidad de resultados numéricos y gráficos, sin embargo para ciertas aplicaciones la herramienta ofrece otras maneras de sacar resultados cuantitativos a partir de diagramas, como el caso del diagrama de constelación. En este trabajo de grado se logró sacar provecho de todo lo que la herramienta otorga para el estudio realizado, de tal manera que el grupo de trabajo no se conformó solo con los datos que la herramienta muestra directamente, sino que se fue más allá de ellos y se aplicó otros conocimientos adquiridos en el proceso de investigación del estado del arte.

5.2. RECOMENDACIONES

- Es importante adoptar y aplicar una metodología de simulación que permita seguir un orden y realizar de manera organizada este proceso, esto permite alcanzar menor complejidad, mayor entendimiento y una adecuada implementación de los sistemas a simular.
- Se debe contar con un equipo de cómputo con alta capacidad de procesamiento y memoria de almacenamiento, ya que para sistemas complejos, la herramienta

OptSim® demanda una gran cantidad de recursos para simular en su totalidad el sistema implementado y así mostrar óptimos resultados en el menor tiempo posible.

- Tener en cuenta que para el tipo de redes estudiadas en este trabajo de grado, el tiempo de simulación en modo muestra debe ser mucho mayor que el sugerido por OptSim®, con el fin de obtener suficientes datos para su análisis y gráficos correctos (como el diagrama del ojo multinivel y el diagrama de constelación). Lo anterior se afirma con base en el comportamiento de los resultados de simular la red PON que OptSim®, en su modo muestra, brinda como referencia, los cuales arrojan gráficos que no permiten ser visualizados correctamente. Por lo tanto, de acuerdo a las pruebas realizadas en este trabajo de grado, se recomienda ejecutar las simulaciones con un tiempo de simulación mínimo de 512 ns.
- Se debe tener una adecuada exploración, buen manejo y conocimiento detallado de la herramienta de simulación para evitar inconvenientes en el momento de la implementación, simulación y pruebas. Para lo anterior, se recomienda consultar y hacer un ejercicio de lectura minuciosa a los manuales o guías de usuario que ofrece la herramienta para su manejo.
- Se recomienda aplicar el modelo de jerarquías de OptSim® cuando los módulos a utilizar, como el receptor, están conformados por una gran cantidad de componentes, esto con el fin de encapsularlos en un solo elemento, de tal manera que la red quede simplificada y mejor organizada.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

Con el desarrollo del trabajo de grado, se han identificado nuevos trabajos de investigación, tales como:

- Analizar el impacto del tipo de fibra óptica monomodo estándar en el desempeño de servicios Triple Play.
- Analizar el impacto de la transmisión de televisión digital con otros niveles de modulación QAM, por ejemplo, 64-QAM y 256-QAM y otros tipos de modulación digital que también pueden ser utilizados para este servicio.
- La distorsión no lineal CSO se afecta drásticamente utilizando modulación directa del láser, ya que el *chirp* generado por este se combina con la dispersión de la fibra dando lugar a niveles de distorsión que pueden llegar a ser intolerables. Por esta razón, se propone analizar el impacto del tipo de modulación externa y el tipo de láser utilizados en la transmisión de CATV analógico sobre una red FTTH, tomando como referencia el estudio realizado en [149].
- Analizar otras tecnologías y estándares como 10-GEPON teniendo en cuenta que la velocidad con la que opera es mayor y la cobertura que puede alcanzar es de aproximadamente 60 Km.

- Realizar un estudio del desempeño de servicios Triple Play considerando otros tipos de redes PON como DWDM-PON donde la cantidad de canales transmitidos, la velocidad de transmisión y la distancia son mayores, por lo que pueden presentarse efectos no deseados para los cuales se pueden proponer técnicas para que estos puedan ser compensados.
- Una de las principales características de una red en anillo es su capacidad de ser implementada con algún tipo de protección o redundancia en la parte física de la red, por lo cual se propone diseñar, implementar y evaluar mediante simulación, mecanismos de redundancia que permitan entregar servicios del tipo Triple Play de manera más segura ante un posible fallo en la integridad física de la red.
- La herramienta de simulación utilizada se caracteriza por permitir la realización de simulaciones a nivel físico, por lo que se propone explorar otras herramientas de simulación que permitan realizar investigaciones enmarcadas en tecnología GEPON con niveles superiores, de tal manera que puedan implementarse protocolos como MPCP con el fin de estudiar el comportamiento de cada topología cuando se llevan a cabo transmisiones en sentido ascendente por parte de los terminales ONT.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Abreu, et al., "Características generales de una red de fibra óptica al hogar (FTTH)," *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, no 7, pp. 38-46, 2009.
- [2] M. López, E. Moschim, F. Rudge, "Estudio Comparativo de Redes GPON y EPON," *Scientia et Technica*, no. 41, pp. 321-326, May. 2009.
- [3] G. Kramer, G. Rudge, "Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no 2, pp. 66-73, Feb. 2002.
- [4] S. R. Navarro, et al., "Análisis de la red óptica pasiva con capacidad de Gigabit a través de las redes de fibra óptica de la empresa de transmisión eléctrica dominicana de la ciudad de Santo Domingo, R.D.," en *Ninth Latin American and Caribbean Conference*, pp. 1-10, Ago. 2011.
- [5] H. Singh, B. Kaur, K. Singh, "Performance Evaluation of Fiber to the Home Triple Play Services," *International Journal for Science and Emerging*, pp. 27-30, Nov. 2014.
- [6] A. Vukovic, et al. "Performance characterization of PON technologies," *Photonics North 2007. International Society for Optics and Photonics*, Jun. 2007.
- [7] C.R. González, "Redes GEPON," en *Estudio de la adaptación de la tecnología GEPON en redes empresariales*, Universidad Católica de Cuenca, 2008.
- [8] Alejandro Carballar, "Introducción a las Comunicaciones Ópticas," 2002.
- [9] M. Albuja, "Estudio de las tecnologías EPON/GEPON como tecnologías de última milla para el transporte de voz, datos y video, aplicado a una zona residencial del distrito metropolitano de Quito," tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Ene. 2010.
- [10] P.K. López, "Comparativa de tecnologías emergentes de acceso a redes móviles y fijas," tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2007.
- [11] M. S. González, "La última milla", *redestelematicas.com*, 2012. [En línea]. Disponible: <http://redestelematicas.com/la-ultima-milla/>
- [12] D. Ortega, "Introducción a Ingeniería de las Telecomunicaciones: Conceptos fundamentales," Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012. [En línea]. Disponible:<http://es.slideshare.net/davidortegag/capitulo-02-conceptos-fundamentales>
- [13] La red de acceso, en *Las telecomunicaciones de nueva generación*, 2003. [En línea]. Disponible: http://www.spw.cl/05mar07_mobile/tecnologias_de_acceso/
- [14] F. Borja y J. V. Ramirez, "xDSL y Cable Modem," 2004. [PDF]. Disponible:https://www.mhe.es/cf/ciclos_informatica/844819974X/archivos/unidad2_recurso6.pdf.
- [15] F. Montes y G. González, "Datos sobre sistema de Televisión por Cable," Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica: Curso de redes de computadoras, 2004.
- [16] P. Colleman, "Cable Modem," 2010. [PDF]. Disponible: http://home.scarlet.be/colleman/extra_info/Cable%20modem.pdf.
- [17] UNE-EPM Telecomunicaciones S.A, "Generalidades de redes HFC", 2010
- [18] A. Montoya, "HFC," 2008. [En línea]. Disponible: <http://microe.udea.edu.co/~alince/recursos/lineas/HFC%20resumen>
- [19] J. Cartagena, "Redes HFC (Híbrido Fibra-Coaxial) y sus vulnerabilidades," Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, Valparaíso, Chile, 2008.

- [20] I. Martínez, "Tecnologías de acceso a red. Soluciones y servicios multiacceso," Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. [En línea]. Disponible: <http://slideplayer.es/slide/323264/>
- [21] S. Uceda, "Ser o no ser fibra óptica," 2012. [En línea]. Disponible: <https://blog.cnmc.es/2012/09/05/ser-o-no-ser-fibra-optica/>
- [22] C. E. Molina, "xDSL," 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.redtauros.com/Clases/Redes_II/
- [23] A. Lucin y L. Herrera, "Diseño de una red de planta externa adecuado para tecnología xDSL," Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2014.
- [24] V. Mendieta y S. Duarte, *Estudio sobre tecnologías xDSL Digital Subscriber Line*, Universidad Católica, Departamento de Electrónica e Informática, Asunción, Paraguay, 2002
- [25] Autoridad Nacional de los Servicios Públicos, "¿Que es un decodificador o Set Top Box?". [En línea]. Disponible en: <http://www.asep-rtvdigitalpanama.gob.pa/index.php/tdt/preguntas-frecuentes#j>
- [26] A. Araguz, "Red de acceso o bucle local," 2012. [En línea]. Disponible: <https://sites.google.com/site/sistemasdetelefoniasti/t-1-2-el-bucle-local>
- [27] Universidad Pública de Navarra, "Tecnologías xDSL-ADSL," 2010.
- [28] J.A. González y F. Vega, "Diseño de una red de acceso que utiliza la tecnología FTTH con VDSL2 en el sector La Mariscal de la ciudad de Quito," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [29] ITU-T, "ITU-T G.993.1: Very High speed digital subscriber line transceivers (VDSL)," 2004.
- [30] ITU-T, "ITU-T G.992.3: Asymmetric Digital Subscriber Line Transceivers 2 (ADSL2)," 2009.
- [31] ITU-T, "ITU-T G.992.5: Asymmetric Digital Subscriber Line Transceivers-Extended bandwidth (ADSL2+)," 2005.
- [32] ITU-T, "ITU-T G.991.1: High Bit Rate Digital Subscriber Line Transceivers (HDSL2)," 1999.
- [33] ITU-T, "ITU-T G.991.2: Single Pair High Speed Digital Subscriber Line Transceivers (SHDSL)," 2003.
- [34] ITU-T, "ITU-T G.993.2: Very High speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)," 2006.
- [35] Universidad Politécnica de Madrid, "Sistemas de Acceso Metalicos (xDSL)," 2011. [En línea]. Disponible: http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/sistemas-de-telecomunicacion-2011/Contenidos/Material_de_clase/T.2/apuntes/2_sistemas_acceso_metalicos_DS_L_2011_2.pdf/view
- [36] M. Gagnaire, "An overview of broad-band access technologies," Proceedings of the IEEE, vol. 85, no 12, p. 1958-1972, 1997.
- [37] M. Lattanzl y A. Graf, "Redes FTTH: Conceptos y aplicaciones," IEEE Argentina, 2008.
- [38] S. R. Navarro, et al., "Análisis de la red óptica pasiva con capacidad de Gigabit a través de las redes de fibra óptica de la empresa de transmisión eléctrica dominicana de la ciudad de Santo Domingo, R.D.," en *Ninth Latin American and Caribbean Conference*, pp. 1-10, Ago. 2011.
- [39] D. P. Pabón, "Diseño de una red de acceso GPON para proveer servicios Triple Play en el sector de La Carolina a través de la red del Grupo TVCable", tesis de

- pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, 2009.
- [40] D. Ulloa, "Tecnología FTTx," Colegio de Ingenieros Tecnólogos, 2010.
- [41] D. Kocher, "Investigation of FTTH Architectures Based on Passive Optical Networks," M.S. Tesis, Universidad de Thapar, Patiala, 2012.
- [42] M. Carrera, "Redes de Acceso," 2011. [En línea]. Disponible: <http://redesaccesomichelle.blogspot.com.co/2011/04/fttx.html>
- [43] T. Martínez, "¿FTTH o FTTB?, esa es la cuestión," 2013. [En línea]. Disponible: [<http://www.telequismo.com/2013/03/ftth-fttb.html>]
- [44] P. Carmona, A. Montes, "Diseño y simulación de una red óptica pasiva PON para prestar servicios Triple Play a un conjunto residencial," tesis de pregrado, Universidad Católica Popular del Risaralda, Pereira, Colombia, Oct. 2009.
- [45] L.C. Fernández, "Tecnologías de Banda Ancha para la convergencia de aplicaciones: FTTx y LTE", tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2011.
- [46] D.R. Ruiz, "Estudio comparativo y simulación de las tecnologías PON tradicionales y emergentes", tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2015.
- [47] H. Singh, B. Kaur, K. Singh, "Performance Evaluation of Fiber to the Home Triple Play Services," International Journal for Science and Emerging, pp. 27-30, 2014.
- [48] OMC Fiber Industry, "FTTx," [En línea]. Disponible: <http://www.omcfth.com>
- [49] G. Gómez, *Fibra Óptica: Propiedades Generales*, Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, 2014.
- [50] T. Muciaccia, F. Gargano y V. Passaro, "Passive Optical Access Networks: State of the Art and Future Evolution," *Photonics*. Vol. 1. No. 4. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2014.
- [51] R. Pinto y A. Cabezas, "Sistemas de Comunicaciones Ópticas," Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2014.
- [52] A. Villacis, "Diseño de una red 10G-PON para el barrio Carcelén Alto 3D," Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2013.
- [53] J. Corchero, "Diseño e Instalación de una red FTTH," Tesis de Pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [54] C. León, "Análisis y diseño de la red FTTH con tecnología GPON para el ISP TroncalNet en el Cantón Cañar," M.S. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Junio 2015.
- [55] D. Ruiz, "Estudio Comparativo y simulación de tecnologías PON tradicionales y emergentes," Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, marzo 2015.
- [56] Y. Ishii y H. Yamashita, "Optical Access Transport System GE-PON Platform," *Fujitsu Sci. Tech. J*, vol. 45, no 4, pp. 346-354, 2009.
- [57] A. Carrión y E. Ronquillo, "Diseño de una red de acceso GEPON para la empresa Ecuonet- Megadatos en un sector de Cumbayá," Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2012.
- [58] H. Labeaga, "Estudio de viabilidad tecnico-economica para la implantación de una red Triple Play en el municipio de Castelldefels," Tesis de pregrado, Escuela Politécnica de Catalunya, 2013.
- [59] Web ProForum Tutorials, "Ethernet Passive Optical Networks," *The International Engineering Consortium*, 2004.

- [60] L. Paredes y A. F. Andrade, "Dimensionamiento de una red de acceso EPON para la prestación de un servicio IPTV en Colombia," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [61] Huri, "Que es Broadcast," 2016. [En línea]. Disponible en: [<http://huribroadcast.com/que-es-broadcast/>]
- [62] M. Cervantes, D. Pesantez y G. Rosales, "Diseño de seguridad en una red GEPON orientada a servicios X-Play," Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2011.
- [63] B. L. Calle, "Diseño de una red GEPON para la implementación en la ciudad de Guayaquil, estudio de viabilidad Técnico, Económico y Legal," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2010.
- [64] IEEE, IEEE Std 802.3ah-2004, Amendment to IEEE Std 802.3-2002. New York, IEEE, 2004.
- [65] X. García y J. Falconí, "Simulación de enlace de fibra óptica en red EPON," Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2012.
- [66] EFM IEEE 802.3 Study Group, "EFM Point to Multipoint Ethernet Passive Optical Network Tutorial," 2002.
- [67] M. Pagani, Encyclopedia of Multimedia Technology and Networking, IGI Global, 2008.
- [68] D. C. Sánchez, "Evaluación de Algoritmos de Distribución Dinámica de Ancho de Banda en Redes Ópticas Pasivas," Informe final de cursos en cooperación técnica y desarrollo social, Coordinación de Ingeniería Electrónica, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, 2008.
- [69] N. Radzi, *et. al.*, "Recent Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm Methods In Ethernet Passive Optical Network," *International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA)*, vol. 4, no. 4, pp. 167-176, 2014.
- [70] J. Urraza, "Teoría y aplicaciones de la informática 2," Universidad Católica Nuestra señora de la Asunción, Asunción, Paraguay, 2010.
- [71] Management Solutions, "La Convergencia y su impacto en la organización," Departamento de Marketing y Comunicación, España, 2008.
- [72] JDS Uniphase Corp., "FTTx Triple-Play Technologies and Applications," 2007.
- [73] C. Añazco, "Diseño Básico de Redes de Acceso FTTH utilizando el estándar GPON", Tesis maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, mayo, 2013.
- [74] E. Schmidberg, "Redes de telecomunicaciones Totalmente Ópticas," IEEE, Marzo, 2009.
- [75] F. Hens y J. Caballero, "Triple Play: Building the converged network for IP, VoIP and IPTV," Vol. 3. John Wiley & Sons, 2008.
- [76] "Codecs y consumo de banda," 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.voztovoice.org/?q=node/562>
- [77] T. Horváth, *et. al.*, "Coexistence GPON, NG-PON, and CATV systems," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 21, n. 2, pp. 61-66, 2015.
- [78] T. Kusakabe, *et. al.*, "Evaluation of optical network of multichannel baseband Digital Broadcast over FTTH," *ITE Transactions on Media Technology and Applications (MTA)*, vol. 2, n. 3, pp. 266-276, 2014.
- [79] J. Saheb y N. R. Patil, "FTTH deployment options for telecom operators," *Sterlite Optical Technologies Ltd., White Paper*, pp. 1-9, 2005.

- [80] M. Van de Water, "Low Cost CATV transmission in Fiber to the Home Networks," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Tecnología de Eindhoven, 2005.
- [81] E. Del Rio, "IPTV: La alternativa al sistema Analógico RF Overlay para la señal de televisión en redes de fibra óptica," 2015. [En línea]. Disponible: [<http://fibraoptica.blog.tartanga.net/2015/01/01/iptv-la-alternativa-al-sistema-analogico-rf-overlay-para-la-senal-de-television-en-redes-de-fibra-optica/>]
- [82] J. Seidenberg, "RF Video Overlay-Open Access Solutions for Video Services on PONs," *RF Video Overlay*, vol.32, n. 3, 2010.
- [83] Universidad de Valladolid, "Sistemas SCM," 2006. [En línea]. Disponible: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_5_1.htm
- [84] C. Simoni, "Fibras Ópticas-Aplicación en redes de telecomunicaciones y Broadcasting", 2008. [En línea]. Disponible en: <http://docplayer.es/2638837-Fibras-opticas-aplicaciones-en-redes-de-telecomunicaciones-y-broadcasting.html>
- [85] M.A. Galicia, "Televisión sobre IP (IPTV) y Redes de Próxima Generación (NGN)," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, 2011.
- [86] J. Torres, *et.al*, "Estado del Arte de IPTV y consideraciones técnicas para su migración a IPV6 en Colombia," *Redes de Ingeniería*, vol. 2, no 1, pp. 45-64, 2011.
- [87] C.A. Barrera y J.H. Puentes, "Parámetros Técnicos y Normativos para la Implementación de IPTV Sobre Las Redes DVB-C e Internet en IPv6 Con QoS," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, 2013.
- [88] A. Ribelles, "Digitalización, almacenamiento y transmisión de audio y video," Universitat Oberta de Catalunya, 2013.
- [89] M.S. Richer, G. Reitmeier, *et.al*. "The ATSC Digital Television System," *PROCEEDINGS-IEEE*, vol. 94, 2006.
- [90] Sotelo, Rafael, and Diego Durán. "Modulación digital: aplicación a la televisión digital en DVB," Universidad de Montevideo, 2008.
- [91] ITU-T, "IPTV Focus Group Proceedings," 2008.
- [92] G.O'Driscoll, "Next Generation IPTV Services and Technologies," John Wiley & Sons, 2008.
- [93] Diccionario de Informática y Tecnología, "Definición de Streaming," 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/streaming.php>
- [94] N. Chong Seng, "Preparing your home for Fiber Broadband." [En línea]. Disponible en: <http://www.hardwarezone.com.sg/feature-preparing-your-home-fiber-broadband>
- [95] R. Di Marco, "El fin de la televisión lineal," 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.vanguardia.com/opinion/columnistas/rene-di-marco/231969-el-fin-de-la-television-lineal>
- [96] A. Rosado, "Tema 2. Redes de Comunicación: Topología y enlaces," Universidad de Valencia, 2003.
- [97] T. V. Villalba, "Estudo de Topologias Híbridas em Redes Ópticas Passivas," *XXVII Simposio Brasileiro de Telecomunicações*, pp.1-4, 2009.
- [98] P. Lafata y J. Vodrazka, "Simulation of Ring-based Passive Optical an Its Experimental Verification," *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 19, no. 5, pp. 93-98, 2013.
- [99] J. Cruz y H. Estrada, "Tecnología CAD de ambiente gráfico orientado al diseño de redes secundarias FTTH," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, 2014.

- [100] N. Sharma y M. Garg, "Investigation on Triple Play FTTH PON 10Gb/s for 156 ONUs," *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 3, no. 2, pp. 1172-1176, 2015.
- [101] EXFO Electro-Optical Engineering Inc, *La Guía FTTH PON*, Quebec, Canadá, 2013.
- [102] M. De Barros, et al, "Avaliação de topologia para redes GPON com distribuição assimétrica," *Cad. CPqD Tecnologia*, vol. 3, no. 2, pp. 61-69, 2007
- [103] O. Calderón, Asesoría académica personalizada, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2016.
- [104] K. Sivalingam y S. Subramaniam, *Emerging Optical Network Technologies: Architectures, Protocols and Performance*, Boston: Springer, 2005.
- [105] G. Maier, A. Pattavina, S. D. Patre y M. Martinelli, "Optical Network Survivability," *Photonic Network Communications*, pp. 251-269, 2002.
- [106] J. Silva y Y. Díaz, "Análisis comparativo del desempeño en la migración de una red DWDM de 10 a 40 Gbps, ante las variaciones de las propiedades de una fibra compensadora de dispersión (DCF)," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2016.
- [107] M. Mahloo y *et.al*, "Towards Reliable Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks," *Communications Magazine IEEE*, vol. 52, no. 2, pp. 1-15, 2014.
- [108] G. Kramer, B. Mukherjee y A. Maislos, "Ethernet Passive Optical Network (EPON)," 2004.
- [109] E. Moscoso y P. Burneo, "Análisis técnico y financiero para migrar la red de acceso de cobre a una red GPON de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones del Ecuador en el Cantón Azogues," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2013.
- [110] I. Chochliouros y G. Heliotis, *Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies*, New York: IGI Global, 2010.
- [111] J. Prat, *Next Generation FTTH Passive Optical Networks*, Springer, 2008.
- [112] P.Lafata y J. Vodrazka, "Perspective Application of Passive Optical Network with Optimized Bus Topology," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 340-346, 2012.
- [113] D. Leino, "10 Gigabit-capable Passive Optical Network Transmission Convergence Layer Design," Tesis de Maestría, Facultad de Electrónica, Comunicaciones y Automatización, Universidad Aalto, Espoo, 2010.
- [114] A.S. Hossain, *et.al*, "Supporting Private Networking Capability in EPON," En *2006 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 2655-2660, 2006.
- [115] H. Erkan, G. Ellinas, A. Hadjiantonis, R. Dorsinville y M. Ali, "Native Ethernet-Based Self-Healing WDM-PON Local Access Ring Architecture: A New Direction for Supporting Simple and Efficient Resilience Capabilities," En *2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, 2010.
- [116] D. Kliazovich, F. Granelli y H. Woesner, "Bidirectional Optical Ring Network Having Enhanced Load Balancing and Protection," 2006.
- [117] A. Baptista, *et.al*, "Remotely Reconfigurable Remote Node for Hybrid Ring-Tree Passive Optical Networks," de *Proc. Conftele 2009*, 2009.
- [118] D. Hossain, R. Dorsinville y M. A. Ali, "Ring-based local access PON architecture for supporting private networking capability," *JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING*, vol. 5, no. 1, pp. 26-39, 2006.
- [119] K. Ramantas, *et. al*, "Efficient resource management via dynamic bandwidth sharing in a WDM-PON ring-based architecture," En *14th International Conference*

- on Transparent Optical Networks (ICTON). IEEE Conference Publications, Piscataway, Nueva Jersey, 2012.
- [120] K. Ramantas, *et.al.*, "New Unified PON-RAN Access Architecture for 4G LTE Networks", *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, no. 10, pp. 890-900, 2014.
- [121] G. Gómez y J. Grijalba, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2010.
- [122] X. Fernando, "Additive White Gaussian Noise (AWGN) Channel and Matched Filter Detection," Department of Electrical and Computer Engineering, Universidad de Ryerson, Presentacion, 2011.
- [123] J. Dinamarca, "Informe de Teoría de Comunicaciones Digitales "Análisis de Diagramas de Ojo," Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [124] W. Damm, "Introducción al *Jitter*", Wireless Telecom Group, Reporte 2009.
- [125] J. Hinojosa, "Diseño De Una Propuesta De Red De Acceso Para Brindar Servicios De Internet, Telefonía, Datos Y Televisión A Través De FTTH, Para El Sector De Iñaquito Mediante La Tecnología RFOG Para Un Proveedor De CATV," Tesis de grado, Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Escuela Politécnica y Nacional, 2014.
- [126] F. Guevara, "Estudio Técnico De La Red De Comunicaciones Para Brindar Los Servicios De Voz, Internet Y Video Por Demanda De Una Urbanización," Tesis de grado, Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Escuela Politécnica y Nacional, 2010.
- [127] S.L. Criollo y F.R. Lasso, "Impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10 Gb/s," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2014
- [128] "Eye Pattern, Eye Diagram, Eye Opening," [En línea]. Disponible en: http://www.ktword.co.kr/m/abbr_view.php?m_temp1=887
- [129] M. Van de Wate, "Low-cost CATV Transmission in Fiber-to-the-Home Networks," Universidad Technological de Eindhoven, 2008.
- [130] Hewlett-Packard, "Cable Television System Measurements Handbook," 1994.
- [131] H. Feng Yang, "Impact of Raman Crosstalk and relative Intensity Noise Transfer on RF Overlay in Optical Passive Networks," Universidad de Concordia, 2007.
- [132] Cable Servicios, "Cómo optimizar y sacar el máximo provecho a los equipos activos de su red," 2012. [En línea]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/cableservicios/redes-catv-como-optimizar-y-sacar-el-mximo-provecho-a-los-equipos-activos-de-su-red>
- [133] R. Benítez y C. Zúñiga, "Soporte Redes de Acceso-Elementos Activos de la Red," 2011. [En línea]. Disponible en: <http://slideplayer.es/slide/5443387/>
- [134] RSoft Design Group, OptSim User Guide, Ossining NY: RSoft Design, 2010.
- [135] J. G. López, "Diseño de escenarios y modelos de desempeño y simulación," en *Diseño de métodos Cross Layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS)*, Tesis Doctoral, Universidad del Cauca, Mar. 2015.
- [136] M. Marciszack, "Modelos de Especificación de Requerimientos para la Obtención de Esquemas Conceptuales en un Dominio Restringido: Comparación de Metodologías, " Tesis de Maestría, Universidad Nacional de la Plata, 2010.

- [137] P. Lafata y J. Vodrazka, "Application of Fiber Ring for Protection of Passive Optical Infrastructure," *RADIOENGINEERING*, vol. 22, no. 1, pp. 357-362, 2013.
- [138] R. Udayakumar, V. Khanaa y K.P Kaliyamurthie, "Optical Ring Architecture Performance Evaluation using Ordinary Receiver," *Indian Journal of Science and Technology (INDJST)*, vol. 6, pp. 4742-4747, 2013.
- [139] M. Gharaei, *et. al.*, "A Novel Ring Architecture of Multiple Optical Private Networks over EPON Using OCDMA technique," *Conference Paper*, 2015.
- [140] N.S. Raghavie, *et. al.*, "Comparative Analysis of Network Topologies Using Optical Amplifiers," *International Journal Computer Technology and Applications (IJCTA)*, vol. 5, pp. 573-577, 2014.
- [141] S. S. El Faleet, "Fiber To The Home (FTTH) Networks based on OCDM Technique," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Islámica de Gaza, Gaza, 2015.
- [142] M. A. Othman, *et. al.*, "Fiber To The Home (FTTH) Design and Analysis using OCDMA Structure," *International Journal of Engineering and Industries (IJEI)*, vol. 3, n. 4, pp. 36-48, 2012.
- [143] A. Lakshmi, G. Lakshmy, "Performance Analysis of Bus Topology in Fiber Optic Communication," *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, vol. 5, pp. 51-55, 2015.
- [144] C. Yeh y S. Chi, "Self-Healing Ring-Based Time-Sharing Passive Optical Networks," *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 19, no. 15, pp. 1139-1141, 2007.
- [145] Teledes, "Quad Play Solutions over Optical Fibre," *Informe Técnico*, 2016.
- [146] Lumerical, "Diagrama del ojo 16 QAM". [En línea]. Disponible: https://kb.lumerical.com/en/pic_circuits_adv_mod_optical_qam-16_discussion_and_results.html
- [147] Shaham Sharifian, "Chromatic Dispersion Compensation by Signal Predistortion: Linear and Nonlinear Filtering," Chalmers University of Technology, Goteborg, Suecia, 2010.
- [148] R. Roldan, "Quadrature Amplitude Modulated (QAM) Microwave Signal Transmission over Radio-over-Fibre Link using Semiconductor Optical Amplifier," Tesis de Maestría, Universidad de Limerick, Irlanda, 2008.
- [149] F. Ramos Pascual, "Estudio De Efectos No Lineales En Dispositivos Fotónicos y su Aplicación en Sistemas Radio Sobre Fibra Óptica," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2000.