

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA RED DE ACCESO EPON PARA LA PRESTACIÓN  
DE UN SERVICIO IPTV EN COLOMBIA**



**LILIANA PAREDES OJEDA  
ALEXANDER FELIPE ANDRADE FUERTES**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2008**

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA RED DE ACCESO EPON PARA LA PRESTACIÓN  
DE UN SERVICIO IPTV EN COLOMBIA**

**LILIANA PAREDES OJEDA  
ALEXANDER FELIPE ANDRADE FUERTES**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero  
en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director  
Ing. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2008**



A Graciela y Eduardo por su amor,  
abnegación y apoyo incondicional.  
A mis hermanos, mis segundos padres,  
por su apoyo y consejos.  
A Felipe, por su apoyo y compañía  
en momentos inolvidables.  
A los amigos que marcharon conmigo  
por el mismo camino.

**Liliana**

Gloria, Luis, Yadira, Paola, Lucho, Liliana  
este triunfo es para ustedes, gracias  
por su apoyo absoluto durante  
esta etapa.

**Felipe**

## **AGRADECIMIENTOS**

RSoft Design Group

---

## **TABLA DE CONTENIDO**

---

<b>TABLA DE CONTENIDO</b>	<b><i>i</i></b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b><i>v</i></b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b><i>ix</i></b>
<b>RESUMEN</b>	<b><i>xiv</i></b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b><i>1</i></b>
<b>1. DEFINICIONES RELACIONADAS CON IPTV, FTTX Y EPON</b>	<b><i>3</i></b>
1.1 Televisión sobre el protocolo IP (IPTV)	<b><i>3</i></b>
1.1.1 Elementos de Red de IPTV	<i>5</i>
1.1.1.1 Cabecera de Video	<i>5</i>
1.1.1.2 Proveedor de Red IP	<i>6</i>
1.1.1.3 Red de Acceso	<i>6</i>
1.1.1.4 Red del Hogar	<i>6</i>
1.1.2 Escenarios de Distribución de Contenidos de IPTV	<i>6</i>
1.1.2.1 Distribución de Televisión Broadcast	<i>6</i>
1.1.2.2 Distribución de VoD	<i>8</i>
1.1.3 Componentes Hardware de IPTV	<i>8</i>
1.1.3.1 Set top Box (STB)	<i>8</i>
1.1.3.2 Media Center (Centro Multimedia)	<i>9</i>
1.1.3.3 Servidores	<i>9</i>
1.1.3.3.1 Servidor de Cabecera	<i>9</i>
1.1.3.3.2 Servidor Broadcast	<i>9</i>
1.1.3.3.3 Servidor de Video digital (DVS)	<i>10</i>
1.1.3.3.4 Servidor VoD	<i>10</i>
1.1.3.3.5 Servidor de Archivos	<i>10</i>
1.1.3.3.6 Servidor Timeshift Broadcast	<i>10</i>
1.1.3.3.7 Servidor de gestión y Facturación	<i>10</i>
1.1.4 Componentes Software de IPTV	<i>11</i>
1.1.4.1 Middleware (MW)	<i>11</i>
1.1.4.2 Sistema de Control de Derechos y de Acceso Condicional (DRM/CAS)	<i>11</i>
1.2 Red de Acceso	<b><i>11</i></b>
1.2.1 Soluciones en Redes de Acceso	<i>12</i>
1.2.1.1 Fibra Hasta la X (Fiber to the X - FTTX)	<i>12</i>
1.2.1.1.1 Arquitecturas FTTX	<i>13</i>
1.3 Redes ópticas pasivas Ethernet (EPON)	<b><i>14</i></b>
1.3.1 Topologías EPON	<i>16</i>
1.3.2 Arquitectura EPON	<i>16</i>
1.3.3 Modelo de Capas de EPON	<i>17</i>
1.3.3.1 Capa Física	<i>17</i>
1.3.3.2 Capa de enlace de datos	<i>18</i>
1.3.4 Funcionamiento de las redes EPON	<i>19</i>
1.3.4.1 Manejo de tráfico Downstream y Upstream	<i>19</i>
1.3.4.2 Formato de trama EPON	<i>20</i>
<b>2. CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN UN SISTEMA DE IPTV SOBRE REDES EPON.</b>	<b><i>22</i></b>

2.1. Protocolos de Codificación de Señales de Video	22
2.1.1. MPEG-2	22
2.1.1.1. Niveles	23
2.1.1.2. Perfiles	23
2.1.2. MPEG-4 Y H.264/AVC	24
2.1.2.1. H.264	25
2.1.2.2. Transmisión	25
2.2. Protocolos para la transmisión de video en una Red IP	26
2.2.1. Pila de Protocolos de TCP/IP	26
2.2.2. Protocolo de Red ( <i>Internet Protocol - IP</i> )	27
2.2.3. Protocolos de Transporte	27
2.2.3.1. User Datagram Protocol - UDP	28
2.2.3.2. Transmission Control Protocol - TCP	28
2.2.4. Protocolo Para Multidifusión: <i>Internet Group Management Protocol (IGMP)</i>	28
2.2.5. Protocolos de Streaming	29
2.2.5.1. Real-Time Transport Protocol (RTP)	29
2.2.5.2. Real Time Transport Control Protocol (RTCP)	29
2.2.5.3. Real-Time Streaming Protocol (RTSP)	30
2.2.5.4. MPEG Transport Stream (MPEG TS)	30
2.3. Requerimientos de Calidad del Servicio (QoS)	30
2.3.1. Parámetros en la Capa de Servicio	32
2.3.2. Parámetros en la Capa de Aplicación.	33
2.3.2.1. Plano de control	33
2.3.2.2. Plano de datos	33
2.3.3. Parámetros en la capa de Transporte	34
2.3.3.1. Plano de control	34
2.3.3.2. Plano de datos	35
2.3.4. Calidad en la Integración.	36
2.4. Protocolo de Control Punto a Multi Punto ( <i>Multi point Control Protocol - MPCP</i> )	36
2.4.1. Modo de asignación de ancho de banda	37
2.4.2. Modo Auto descubrimiento	38
2.5. Función de Control del Láser en EPON	40
2.5.1. Detector de datos	41
2.6. Métodos de asignación de ancho de banda en redes EPON	41
2.6.1. Asignación Estática de Ancho de Banda	41
2.6.2. Asignación Dinámica de ancho de banda	42
2.6.2.1. IPACT - Sondeo Intercalado con ciclo de tiempo adaptativo (Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time)	42
2.6.2.2. BGP - Sondeo de ancho de banda garantizado (Bandwidth Guaranteed Polling)	43
2.7. Eficiencia en redes EPON	43
2.7.1. Overhead de encapsulamiento	43
2.7.2. Overhead de planificadores	43
2.7.3. Eficiencia absoluta en EPON	44
2.8. Análisis de parámetros de desempeño utilizando el Diagrama del Ojo	44
<b>3. CRITERIOS Y REGLAS DE INGENIERÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ACCESO EPON PARA PRESTAR EL SERVICIO IPTV</b>	<b>48</b>
3.1. Etapas de Planeación de una red de acceso	48
3.2. Dimensionamiento de la red de acceso	49

<b>3.3</b>	<b>Criterio tecnológico</b>	<b>50</b>
3.3.1	Relacionados con el servicio IPTV	50
3.3.1.1	Middleware (MW)	51
3.3.1.2	Codificador	52
3.3.1.3	Criterios mínimos generales de SD y HD para video	52
3.3.1.4	Resolución de video HD	52
3.3.1.5	Servidores de Video	53
3.3.1.6	Distribución del contenido	54
3.3.1.7	Gestión de PVR y TSTV	54
3.3.1.8	Ancho de banda requerido para IPTV	54
3.3.2	Criterios tecnológicos relacionados con la red de acceso EPON	56
3.3.2.1	Tipo de fibra y topología	56
3.3.2.2	Atenuación, Dispersión y BER	57
3.3.2.3	Plan de frecuencias	57
3.3.2.4	Potencia de transmisión, sensibilidad y presupuesto de potencia	57
3.3.2.5	Ancho espectral	58
3.3.2.6	Operación en modo ráfaga	58
3.3.2.7	Ancho de banda requerido por usuario	59
3.3.2.8	Capacidad de usuarios por enlace EPON	60
3.3.2.9	Planta externa	60
3.3.2.10	Energía para los ONT	61
<b>3.4</b>	<b>Criterio financiero</b>	<b>62</b>
3.4.1	Relacionado con IPTV	62
3.4.1.1	Criterio Financiero CAPEX	62
3.4.1.2	Criterio Financiero OPEX.	63
3.4.2	Relacionados con la red de acceso EPON	63
3.4.3	Escogencia de equipos ONT, OLT y STB	64
3.4.3.1	OLT	64
3.4.3.2	ONT	64
3.4.3.3	STB	65
<b>3.5</b>	<b>Criterios de calidad</b>	<b>66</b>
<b>3.6</b>	<b>Criterio Regulatorio</b>	<b>66</b>
<b>3.7</b>	<b>Reglas a seguir para la implementación de redes EPON para la prestación de servicios IPTV en Colombia</b>	<b>67</b>
3.7.1	Regla de Viabilidad	68
3.7.2	Regla de Definición de requerimientos y Análisis del sistema	69
3.7.3	Regla de Diseño de arquitectura	70
3.7.4	Regla de Construcción, Integración y Pruebas del sistema	71
<b>4.</b>	<b>SIMULACIÓN A NIVEL FÍSICO DE UNA RED DE ACCESO EPON, PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO IPTV</b>	<b>73</b>
4.1	Estudio de las herramientas de simulación	73
4.1.1	Herramientas de Simulación de redes	74
4.1.1.1	OPNET Modeler	74
4.1.1.2	NCTUns 3.0	74
4.1.1.3	NS-2	75
4.1.1.4	VPI Photonics	75
4.1.1.5	OptiSystem	75
4.1.1.6	OptSim	76
4.1.2	Comparación de herramientas de simulación óptica más importantes	77
4.1.3	Selección de la herramienta de simulación	80
4.2	Definición de la simulación: Red de acceso EPON en arquitectura FTTH	81

4.3	Definición de escenarios de simulación y resultados obtenidos en sentido downstream	83
4.3.1	Escenario 1: Pruebas de Códecs de video	83
4.3.1.1	Resultados del Escenario 1	84
4.3.2	Escenario 2: Variación de distancias en los ONT	87
4.3.2.1	Resultados del Escenario 2	89
4.3.3	Escenario 3: Transmisión de varios flujos de IPTV.	96
4.3.3.1	Resultados del Escenario 3	97
4.3.4	Escenario 4: Simulación de flujos IPTV y tráfico de voz y datos	99
4.3.4.1	Resultados	100
4.3.5	Simulaciones adicionales en sentido downstream	102
4.3.5.1	Máxima tasa de bits (1.25Gbps)	102
4.3.5.2	Parámetros extremos de distancia y tasa de bits	104
4.4	Definición del escenario de simulación y resultados obtenidos en sentido upstream	105
4.4.1.1	Resultados sentido upstream	106
4.4.1.2	Presencia de interferencia entre ONT's	107
4.5	Generalización de resultados	108
4.6	Caso de estudio	109
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>xv</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>xvii</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>xviii</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1.1. Elementos de Red de IPTV [1].	5
Figura 1.2. Escenarios de distribución de contenido IPTV [1].	7
Figura 1.3. Arquitecturas FTTx [26].	13
Figura 1.4. Arquitectura de una red PON [25].	14
Figura 1.5. Correspondencia EFM con el modelo OSI [25].	15
Figura 1.6. Topologías de las redes PON [25].	16
Figura 1.7. Arquitectura EPON [23].	16
Figura 1.8. Modelo de Capas EPON [25].	17
Figura 1.9. Tráfico downstream en EPON [23].	19
Figura 1.10. Tráfico upstream en EPON [23].	19
Figura 1.11. Trama downstream en EPON [23].	20
Figura 1.12. Trama upstream en EPON [23].	20
Figura 1.13. Formato de trama Ethernet y del preámbulo en EPON [25].	21
Figura 2.1. Modelos OSI y TCP/IP [1].	27
Figura 2.2. Diagrama de distribución de video [38].	32
Figura 2.3. Clasificación de los retardos en las diferentes aplicaciones según la ITU G.1010 [29].	36
Figura 2.4. Proceso de asignación de ancho de banda en MPCP [25].	37
Figura 2.5. GATE y REPORT en MPCP [38].	38
Figura 2.6. Asignación secuencial Vs Asignación Dinámica [25].	38
Figura 2.7. Proceso de autodescubrimiento en MPCP [25].	39
Figura 2.8. Medición del tiempo de viaje [27].	40
Figura 2.9. Proceso de descubrimiento y presencia de una colisión [25].	40
Figura 2.10. Funcionamiento del control de láser [25].	41
Figura 2.11. Asignación estática de ancho de banda [40].	41
Figura 2.12. Funcionamiento de DBA [40].	42
Figura 2.13. Estructura de las bandas de guarda [42].	43
Figura 2.14. Diagrama del ojo obtenido con OptSim.	45
Figura 2.15. Diagrama del ojo para una secuencia de 3 bits [43], [44].	45
Figura 2.16. Parámetros del pulso en un patrón de ojo [43].	46
Figura 2.17. Parámetros fundamentales del ojo [43].	46
Figura 2.18. Diagrama del ojo con efectos producidos por el jitter [43].	47
Figura 3.1. Planeación de Redes de Acceso [47].	49
Figura 3.2. Comparación resolución de video HD vs. SD.	52
Figura 3.3. Comparativa de resoluciones de video digital [56].	53
Figura 3.4. Audiencia por franjas horarias de lunes a viernes [72].	56
Figura 3.5. Audiencia por franjas horarias los fines de semana [72].	56
Figura 3.6. Implementación de una red EPON en un entorno urbano [24].	61
Figura 3.7. Arquitectura de energización de los elementos de la red EPON [24].	61
Figura 3.8. ONT multifuncional.	65
Figura 3.9. Arquitectura de una red de acceso EPON para prestar el servicio IPTV.	72
Figura 4.1. Pantalla de inicio de OptSim.	80
Figura 4.2. Topología Red de Acceso EPON para 1 usuario.	82
Figura 4.3. Topología Escenario 1.	83
Figura 4.4. Gráfica BER para MPEG 2.	86



Figura 4.5. Gráfica BER para MPEG-4.....	86
Figura 4.6. Distancias en la planta externa de una red FTTH – EPON.....	87
Figura 4.7. Topología para 16 usuarios.....	88
Figura 4.8. Distancia de Ubicación de los ONT para 16 usuarios.....	88
Figura 4.9. Topología para 32 Usuarios.....	88
Figura 4.10. Configuración de distancias para 32 usuarios.....	89
Figura 4.11. Potencia recibida en el OLT para 16 usuarios.....	91
Figura 4.12. BER para MPEG-4 - HDTV 292.8Mbps.....	92
Figura 4.13. Potencia recibida en OLT para 32 usuarios.....	94
Figura 4.14. BER para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.....	95
Figura 4.15. Número de Televisores por hogar en 2006 y 2007 [72].....	96
Figura 4.16. Número de televisores tradicionales o de Plasma o LCD en los hogares [72]. .....	96
Figura 4.17. BER para MPEG-4 - HDTV– 829.6 Mbps.....	98
Figura 4.18. BER para MPEG-4 - HDTV– 1146.8 Mbps.....	101
Figura 4.19. BER para 1.25Gbps.....	103
Figura 4.20. Topología empleada para las simulaciones adicionales.....	104
Figura 4.21. Diagrama del ojo para BER = 1e-10 con 2Gbps de tasa de bits y 20Km.....	105
Figura 4.22. Diagrama del ojo para 30Km y 1.25Gbps de tasa de bits.....	105
Figura 4.23. Topología de Simulación sentido Upstream en un slot de tiempo.....	106
Figura 4.24. Presencia de Interferencia entre ONT's.....	107
Figura 4.25. Diagrama del ojo en presencia de interferencia.....	107
Figura 4.26. Señal transmitida por el ONT y recibida en el OLT en presencia de ISI.....	108
Figura 4.27. Espectro óptico en presencia de interferencia.....	108

---

## **LISTA DE TABLAS**

---

Tabla 1.1. Fibra Punto - Punto vs. EPON [23].	15
Tabla 2.1. Niveles de MPEG-2 [1], [31].	23
Tabla 2.2. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios SDTV codificados con MPEG-2 [29].	31
Tabla 2.3. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios SDTV codificados con MPEG-4 AVC o VC-1 [29].	31
Tabla 2.4. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios HDTV codificados con MPEG-2 [29].	31
Tabla 2.5. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios HDTV codificados con MPEG-4 AVC o VC-1 [29].	31
Tabla 2.6. Retardos máximos según la categorización de la acción del usuario [29].	33
Tabla 2.7. Tasa de bit mínima para señal de video SD con tasa de bits constante (CBR) [29].	34
Tabla 2.8. Tasa de bit mínima para señal de video HD con tasa de bits constante (CBR) [29].	34
Tabla 2.9. Tasa de bit mínima para señal de audio en SD, VoD y Premium SD, y HD [29].	34
Tabla 2.10. Overhead de control [42].	43
Tabla 2.11. Overhead por bandas de guarda [42].	44
Tabla 2.12. Overhead por delineación de tramas [42].	44
Tabla 2.13. Eficiencia absoluta en EPON [42].	44
Tabla 3.1. Tasas de penetración del servicio triple play [51].	51
Tabla 3.2. Distribución del contenido SD y HD de IPTV con proyección a 5 años [51].	55
Tabla 3.3. Número de canales SD y HD en un periodo de 5 años [51].	55
Tabla 3.4. Presupuesto de potencia [60].	58
Tabla 3.5. PMD para EPON [25], [27].	59
Tabla 3.6. CAPEX para la Cabecera de video [20].	62
Tabla 3.7. OPEX para IPTV [20].	63
Tabla 3.8. Esquemas de prestación del servicio IPTV.	69
Tabla 4.1. Comparación de OptSim con otros programas [67].	80
Tabla 4.2. Consideraciones de ancho de banda en redes EPON.	81
Tabla 4.3. Características de transmisión en 1000BASE PX-20D y 1000BASE PX-20U [27].	82
Tabla 4.4. Características de recepción en 1000BASE PX-20D y 1000BASE PX-20U [27].	83
Tabla 4.5. Tasas de bits utilizadas en el escenario 1.	84
Tabla 4.6. Mediciones de niveles de Potencia en el escenario 1.	84
Tabla 4.7. Mediciones de BER en el Escenario 1.	85
Tabla 4.8. Gráficas para MPEG-4 - HDTV – 164.4Mbps.	85
Tabla 4.9. Tasas de Bits empleadas en el Escenario 2.	89
Tabla 4.10. Medidas de potencia en OLT y Splitter.	90
Tabla 4.11. Medidas de potencia para 16 usuarios.	90
Tabla 4.12. BER para MPEG-4 - HDTV 292.8Mbps.	91
Tabla 4.13. Gráficas para MPEG-4 - HDTV – 292.8Mbps.	92
Tabla 4.14. Medidas de potencia para 32 usuarios.	93
Tabla 4.15. BER para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.	95
Tabla 4.16. Gráficas para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.	95
Tabla 4.17. Anchos de banda utilizados en la simulación.	97
Tabla 4.18. BER para MPEG-4 - HDTV – 829.6Mbps.	98

Tabla 4.19. Gráficas para MPEG-4 - HDTV– 829.6 Mbps. ....	99
Tabla 4.20. Tasas de bits utilizadas en el escenario 4. ....	99
Tabla 4.21. BER para MPEG-4 - HDTV– 1146.8 Mbps. ....	100
Tabla 4.22. Gráficas para MPEG-4 - HDTV– 1146.8 Mbps. ....	101
Tabla 4.23. BER para 1.25Gbps. ....	103
Tabla 4.24. Gráficas para 1.25Gbps.....	104
Tabla 4.25. Resultados sentido Upstream. ....	106
Tabla 4.26. Gráficas de sentido Upstream. ....	106

---

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

<b>802.3ah</b>	Estándar que define EFM (Ethernet en la Primera Milla)
<b>AC</b>	<i>Alternating Current</i> (Corriente Alterna)
<b>ADM</b>	<i>Add Drop Multiplexer</i> (Multiplexor de Inserción / Extracción)
<b>AES</b>	<i>Audio Elementary Stream</i> (Trama Elemental de Audio)
<b>AGC</b>	<i>Automatic Gain Control</i> (Control Automático de Ganancia)
<b>AOC</b>	<i>Audio Objects Component</i> (Componentes de Audio Objetos)
<b>AON</b>	Active Optical Network (Red Óptica Activa)
<b>API</b>	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
<b>ASE</b>	<i>Amplifier Spontaneous Emission</i> (Emisión Espontánea Amplificada)
<b>ASP</b>	<i>Advanced Simple Profile</i> (Perfil Simple Avanzado)
<b>ATM</b>	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> (Modo de Transferencia Asíncrono)
<b>ATSC</b>	<i>Advanced Television System Committee</i> (Comité del Sistema Avanzado de Televisión)
<b>AVC</b>	<i>Advance Video Coding</i> (Codificación Avanzada de Video)
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i> (Tasa de Bits Erróneos)
<b>BGP</b>	<i>Bandwidth Guarantee Polling</i> (Sondeo de Ancho de Banda Garantizado)
<b>BPON</b>	Broadband Passive Optical Network (Red Óptica Pasiva de Banda Ancha)
<b>BPSK</b>	<i>Binary phase-shift keying</i> (Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria)
<b>BTV</b>	<i>Broadcast Television</i> (Difusión de Televisión)
<b>BW</b>	<i>Bandwidth</i> (Ancho de Banda)
<b>CAPEX</b>	<i>Capital Expenditure</i> (Gastos de Capital)
<b>CAS</b>	Conditional Access (Acceso Condicional)
<b>CATV</b>	<i>Community Antenna Television</i> (Televisión por Cable)
<b>CBR</b>	<i>Constant Bit Rate</i> (Tasa de Bits Constante)
<b>CD</b>	<i>Compact Disc</i> (Disco Compacto)
<b>CDR</b>	<i>Clock and Data Recovery</i> (Recuperación de Reloj y Datos)
<b>CM</b>	<i>Continuous Media</i> (Medios Continuos) - Cable Modem
<b>CNTV</b>	Comisión Nacional de Televisión
<b>CO</b>	<i>Central Office</i> (Oficina Central)
<b>CoS</b>	<i>Class of Service</i> (Clase de Servicio)
<b>CPE</b>	<i>Costumer Premise Equipment</i> (Equipo de premisa de usuario)
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i> (Chequeo de redundancia cíclica)
<b>CRT</b>	Comisión de Regulación de Telecomunicaciones - <i>Cathode Ray Tube</i> (Tubo de Rayos Catódicos)
<b>CRZ</b>	<i>Chirped Return to Zero</i>
<b>CSMA/CD</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i> (Acceso múltiple por detección de portadora / Detección de colisión)
<b>CSRZ</b>	<i>Carrier Suppressed Return to Zero</i> (Retorno a Cero con Supresión de Portadora)
<b>DBA</b>	<i>Dynamic Bandwidth Algorithm</i> (Algoritmo de Ancho de Banda Dinámico)
<b>DCS</b>	<i>Digital Cross Connector</i> (Cros Conector Digital)
<b>DHCP</b>	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> (Protocolo de Configuración Dinámica de Host)
<b>DMIF</b>	Delivery Multimedia Integration Framework (Marco de Integración para Entrega de Multimedia)
<b>DMLaser</b>	<i>Direct Modulated Laser</i> (Láser Directamente Modulado)

<b>DPSK</b>	<i>Differential Phase Shift Keying</i> (Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial)
<b>DRM</b>	<i>Digital Rights Management</i> (Gestión de Derechos Digital)
<b>DSF</b>	<i>Dispersion Shifted Fiber</i> (Fibra de Dispersión Variable)
<b>DSL</b>	<i>Digital Subscriber Line</i> (Línea Digital de Abonado)
<b>DSLAM</b>	<i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i> (Multiplexor de acceso de línea digital de abonado)
<b>DVB</b>	<i>Digital Video Broadcasting</i> (Emisión de Video Digital)
<b>DVD</b>	<i>Digital Video Disc</i> (Disco de Video Digital)
<b>DVS</b>	<i>Digital Video Server</i> (Servidor Digital de Video)
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa)
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> (Amplificador de Fibra Dopado con Erblio)
<b>EFM</b>	<i>Ethernet in the First Mile</i> (Ethernet en la Primera Milla)
<b>EGM</b>	Estudio General de Medios
<b>EMS</b>	<i>Element Management System</i> (Sistema de Gestión de Elementos)
<b>EoDSL</b>	<i>Ethernet over DSL</i> (Ethernet sobre redes DSL)
<b>EPG</b>	<i>Electronic Program Guide</i> (Guía Electrónica de Programación)
<b>EPON</b>	<i>Ethernet Passive Optical Network</i> (Red Pasiva Óptica Ethernet)
<b>ETB</b>	Empresa de Teléfonos de Bogotá
<b>FCA</b>	<i>Fiber Cable Attenuation</i> (Atenuación en Fibra Óptica)
<b>FCAPS</b>	<i>Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security Management</i> (Fallas, Configuración, Contabilidad, Funcionamiento y Seguridad)
<b>FCS</b>	<i>Frame Check Sequence</i> (Secuencia de Chequeo de Trama)
<b>FEC</b>	<i>Forward Error Correction</i> (Corrección de Errores hacia adelante)
<b>FIFO</b>	<i>First In First Out</i> (Primero que entra, Primero que sale)
<b>FSK</b>	<i>Frequency Shift Keying</i> (Modulación por desplazamiento en Frecuencia)
<b>FTP</b>	<i>File Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferencia de Archivos)
<b>FTTB</b>	<i>Fiber to the Building</i> (Fibra hasta el edificio)
<b>FTTC</b>	<i>Fiber to the Curb</i> (Fibra hasta el barrio)
<b>FTTH</b>	<i>Fiber to the Home</i> (Fibra hasta la Casa)
<b>FTTN</b>	<i>Fiber to the Node</i> (Fibra hasta el nodo)
<b>FTTx</b>	<i>Fiber to the Any</i> (Fibra hasta cualquier ubicación)
<b>GbE</b>	<i>Gigabit Ethernet</i>
<b>GMII</b>	<i>Gigabit Media Independent Interface</i> (Subcapa de interfaz gigabit independiente del medio)
<b>GNTT</b>	Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
<b>GOP</b>	<i>Group of Pictures</i> (Grupo de Imágenes)
<b>GPL</b>	<i>General Public License</i> (Licencia Pública General)
<b>GPON</b>	<i>Gigabit Passive Optical Network</i> (Red Óptica Pasiva Gigabit)
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i> (Servicio General de Radio Paquetes)
<b>GUI</b>	<i>Graphic User Interface</i> (Interfaz Gráfica de Usuario)
<b>HD</b>	<i>High Definition</i> (Alta Definición)
<b>HDTV</b>	<i>High Definition Television</i> (Televisión de alta definición)
<b>HFC</b>	<i>Hybrid Fiber – Coaxial</i> (Hibrido Fibra – Coaxial)
<b>HIS</b>	<i>High Speed Internet</i> (Internet de Alta Velocidad)
<b>HTTP</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)
<b>ICC</b>	<i>Instant Channel Change</i> (Cambio Instantáneo de Canal)
<b>ID</b>	Identificación

<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos)
<b>IFG</b>	<i>Inter Frame Gap</i> (Guarda entre Tramas)
<b>IGMP</b>	<i>Internet Group Multicast Protocol</i> (Grupo del protocolo multicast de Internet)
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
<b>IPACT</b>	<i>Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time</i> (Sondeo Intercalado con ciclo de tiempo adaptativo)
<b>IPSec</b>	<i>IP Security</i> (Seguridad IP)
<b>IPTV</b>	<i>Internet Protocol Television</i> (Televisión sobre el protocolo IP)
<b>ISI</b>	<i>Inter Symbol Interference</i> (Interferencia Inter-Símbolos)
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional para la Estandarización)
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunications Union</i> (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
<b>JVT</b>	<i>Joint Video Team</i> (Unión de Equipos de Video)
<b>LAN</b>	<i>Local Area Network</i> (Red de Área Local)
<b>LLC</b>	<i>Logical Link Control</i> (Control de Enlace Lógico)
<b>LLID</b>	<i>Logical Link Identifier</i> (Identificador de Enlace Lógico)
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i> (Control de Acceso al Medio)
<b>MAN</b>	<i>Metropolitan Area Network</i> (Red de Área Metropolitana)
<b>MDI</b>	<i>Media Dependent Interface</i> (Interfaz Dependiente del Medio)
<b>MII</b>	<i>Media Independent Interface</i> (Interfaz Ethernet Independiente del Medio)
<b>MOS</b>	<i>Mean Opinion Score</i> (Puntaje de Opinión)
<b>MPCP</b>	<i>Multi Point Control Protocol</i> (Protocolo de Control Multipunto)
<b>MPEG</b>	<i>Moving Pictures Experts Group</i> (Grupo de expertos en Video)
<b>MW</b>	Middleware
<b>NAL</b>	<i>Network Abstraction Layer</i> (Capa de Abstracción de Red)
<b>NCTUns</b>	National Chiao Tung University Network Simulator
<b>NGN</b>	<i>New Generation Network</i> (Redes de Nueva Generación)
<b>NRZ</b>	<i>Non Return to Zero</i> (No Retorno a Cero)
<b>NS-2</b>	Network Simulator 2
<b>NTSC</b>	<i>National Television System Committee</i> (Comité del Sistema Nacional de Televisión)
<b>NTT</b>	<i>Nippon Telegraph and Telephone Corporation</i> (Empresa de Telecomunicaciones Japonesa)
<b>OAM</b>	Operations, Administration, and Maintenance (Operación, Administración y Mantenimiento)
<b>OCW</b>	<i>Optical Wireless Communications</i> (Comunicaciones Ópticas Inalámbricas)
<b>OEO</b>	<i>Optic Electro Optic</i> (Óptico Eléctrico Óptico)
<b>OLT</b>	<i>Optical Line Terminator</i> (Terminal de Línea Óptica)
<b>ONT</b>	<i>Optical Network Terminal</i> (Terminal de Red Óptica)
<b>OPEX</b>	<i>Operational Expenditure</i> (Gastos de Operación)
<b>OPNET</b>	Simulador de redes de Telecomunicaciones
<b>OptSim</b>	<i>Optical Simulator</i> (Simulador de Redes Ópticas)
<b>OSA</b>	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> (Analizador de Espectro Óptico)
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> (Interconexión de Sistemas Abiertos)
<b>P2P</b>	<i>Point to Point</i> (Punto a punto)
<b>P2PM</b>	<i>Point to Multi Point</i> (Punto a multipunto)
<b>PAL</b>	<i>Phase Alternating Line</i> (Línea de Fase Alterna)

<b>PC</b>	<i>Personal Computer</i> (Computador Personal)
<b>PCS</b>	<i>Physical Coding Sub layer</i> (Subcapa de codificación Física)
<b>PES</b>	<i>Packetized Elementary Streams</i> (Flujos Empaquetados Elementales)
<b>PHY</b>	Physical (Físico)
<b>PIN</b>	P – Intrínseco – N
<b>PLC</b>	<i>Power Line Communications</i> (Comunicaciones por línea de potencia)
<b>PMA</b>	<i>Physical Medium Attachment</i> (Unión con el medio físico)
<b>PMD</b>	<i>Physical Medium Dependent</i> (Dependiente del medio físico)
<b>PoE</b>	<i>Power over Ethernet</i> (Potencia sobre Ethernet)
<b>PON</b>	<i>Passive Optical Network</i> (Red Óptica Pasiva)
<b>POTS</b>	<i>Plain Old Telephone Service</i> (Servicio de Telefonía Pública Conmutada)
<b>PPV</b>	<i>Pay Per View</i> (Pague por Ver)
<b>PRBS</b>	<i>Pseudo Random Binary Source</i> (Generador Binario Pseudo-Aleatorio)
<b>PSTN</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i> (Red de Telefonía Básica Conmutada)
<b>PVR</b>	<i>Personal Video Recorder</i> (Grabador de video personal)
<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (Modulación de Amplitud en Cuadratura)
<b>QoE</b>	<i>Quality of Experience</i> (Calidad de la experiencia)
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> (Calidad de Servicio)
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (Modulación por Desplazamiento de Cuadratura de Fase)
<b>RAID</b>	<i>Redundant Array of Independent Disc</i> (Arreglo Redundante de Discos Independientes)
<b>RCA</b>	Radio Corporation of America
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i> (Radio Frecuencia)
<b>ROF</b>	<i>Radio Over Fiber system</i> (Sistemas de Radio Sobre Fibra)
<b>RS</b>	<i>Reconciliation Sub layer</i> (Subcapa de reconciliación)
<b>RTCP</b>	<i>Real Time Transport Control Protocol</i> (Protocolo de Control de Transporte de Tiempo Real)
<b>RTP</b>	<i>Real Time Transport Protocol</i> (Protocolo de transporte en tiempo real)
<b>RTSP</b>	<i>Real-Time Streaming Protocol</i> (Protocolo de Distribución en Tiempo Real)
<b>RTT</b>	<i>Round Trip Time</i> (Tiempo de Viaje)
<b>RZ</b>	<i>Return to Zero</i> (Retorno a Cero)
<b>SBA</b>	<i>Static Bandwidth Assignment</i> (Asignación Estática de Ancho de Banda)
<b>SBS</b>	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i> (Dispersión estimulada de Brillouin)
<b>SD</b>	<i>Standard Definition</i> (Definición Estándar)
<b>SDH</b>	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> (Jerarquía Digital Síncrona)
<b>SDTV</b>	<i>Standard Definition Television</i> (Televisión de Definición Estándar)
<b>SLA</b>	<i>Service Level Agreement</i> (Acuerdo de Nivel de Servicio)
<b>SLD</b>	Simple LLID Delimiter (Delimitador de LLID simple)
<b>SMF</b>	<i>Single Mode Fiber</i> (Fibra Mono-Modo)
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i> (Relación Señal a Ruido)
<b>SONET</b>	<i>Synchronous Optical Network</i> (Red Óptica Síncrona)
<b>SP</b>	<i>Simple Profile</i> (Perfil Simple)
<b>SRTCP</b>	<i>Secure Real-time Transport Protocol</i> (Protocolo Seguro de Transporte en Tiempo Real)
<b>STB</b>	<i>Set Top Box</i> (Decodificador de Usuario Final)
<b>SVCD</b>	<i>Super Video CD</i> (Disco de Súper Video)
<b>TCP</b>	<i>Transport Control Protocol</i> (Protocolo de Control de Transporte)
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplex</i> (Multiplexación por División de Tiempo)

<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i> (Acceso Múltiple por división de Tiempo)
<b>TIA</b>	<i>Telecommunications Industry Association</i> (Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones)
<b>TOS</b>	<i>Type of Service</i> (Tipo de Servicio)
<b>TSTV</b>	<i>Time Shift Television</i> (Congelado de escenas de televisión)
<b>TV</b>	Televisión
<b>TVD</b>	Televisión Digital
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol</i> (Protocolo de datagramas de usuario)
<b>VBR</b>	<i>Variable Bit Rate</i> (Tasa de bits variable)
<b>VCD</b>	<i>Video CD</i> (Disco de Video)
<b>VCEG</b>	<i>Video Coding Experts Group</i> (Grupo de Expertos en Codificación de Video)
<b>VCL</b>	<i>Video Coding Layer</i> (Capa de Codificación de Video)
<b>VDSL</b>	<i>Very high bit-rate Digital Subscriber Line</i> (Línea Digital de Abonado de alta Velocidad)
<b>VES</b>	<i>Video Elementary Stream</i> (Trama Elemental de Video)
<b>VLAN</b>	<i>Virtual Local Area Network</i> (Red de Área Local Virtual)
<b>VOC</b>	<i>Video Objects Component</i> (Componentes de Video Objetos)
<b>VoD</b>	<i>Video on Demand</i> (Video bajo demanda)
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP</i> (Voz sobre IP)
<b>VPI</b>	Software de simulación de redes ópticas
<b>VPN</b>	<i>Virtual Private Network</i> (Red Privada Virtual)
<b>VQEG</b>	<i>Video Quality Experts Group</i> (Grupo de Expertos en Calidad del Video)
<b>WAN</b>	<i>Wide Area Network</i> (Red de Área Amplia)
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexación por División de Longitud de Onda)
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i> (Red de área local inalámbrica)
<b>WWW</b>	<i>World Wide Web</i> (Red Global Mundial)
<b>xDSL</b>	<i>Any Digital Subscriber Line</i> (Cualquier tipo de Línea Digital de Abonado)



---

## **RESUMEN**

---

Actualmente, la convergencia de servicios de video, voz y datos sobre una infraestructura común se ha convertido en una temática que requiere tratamiento especial con el fin de proporcionar soluciones de calidad de cara al usuario final. Este es el caso de la Televisión sobre el protocolo IP más conocida como IPTV, que utilizando un protocolo mundialmente aceptado como es el protocolo IP pretende llevar contenidos de televisión de alta calidad a los usuarios, utilizando redes que brinden calidad de servicio y gran ancho de banda. Teniendo en cuenta que las redes de acceso desplegadas en la actualidad no son capaces de satisfacer la demanda de este tipo de servicios y aprovechando las bondades de la fibra óptica, las redes EPON aparecen como una solución atractiva para los operadores de telecomunicaciones que buscan captar más clientes ofreciendo redes de acceso de calidad, con gran velocidad y nuevos servicios, con el fin de enfrentar la fuerte competencia del mercado móvil y de los cable operadores.

Por lo anterior, en el presente trabajo de grado se aplican los conceptos relacionados con estas tecnologías, con el fin de generar unas reglas de ingeniería aplicables a la planificación de redes de acceso EPON para brindar el servicio de IPTV, tomando como soporte unos criterios, que van desde los criterios tecnológicos hasta los criterios regulatorios, pasando por los criterios financieros y de calidad. Además apoyados en la simulación del sistema realizada con la herramienta OptSim, fue posible analizar los parámetros ópticos más relevantes en este tipo de redes, con el fin de determinar la cantidad de usuarios que pueden ser atendidos con calidad en la red propuesta.

## INTRODUCCIÓN

En la sociedad actual, la integración de servicios se ha convertido en una necesidad que debe ser satisfecha de tal manera que se reduzcan los costos que implicaría brindar nuevos servicios mediante infraestructuras separadas. En particular, los servicios implementados sobre el protocolo IP (VoIP, IPTV, Internet de Alta Velocidad) que demandan gran cantidad de ancho de banda, hacen que las redes y tecnologías de acceso actualmente desplegadas (Telefónica, Cable, Inalámbrico, Satelital, Modem banda vocal), no cumplan con los requisitos mínimos que demandan estos servicios.

La limitación de las redes de acceso se fundamenta particularmente en la escases del recurso de Ancho de banda, lo cual se conoce como cuello de botella (bottleneck), un problema ampliamente conocido en el campo de las Telecomunicaciones, en el cual el ancho de banda disponible en las redes de backbone es desaprovechado debido a las limitantes de la tecnología en las soluciones de primer kilómetro (First Mile), dificultando el despliegue de nuevos servicios en las redes de telecomunicaciones.

Actualmente, la tendencia tecnológica está orientada hacia una red completamente IP (All IP), y con la aparición de nuevos servicios como VoIP e IPTV, se hace necesaria una solución radical al problema del cuello de botella. Para esto, existen varias soluciones, algunas de las cuales aprovechan la infraestructura de cobre existente, como la solución xDSL (Digital Subscriber Line), pero no brindan una solución definitiva al problema; otras en cambio, proporcionan una mejor solución basándose en el aprovechamiento de las bondades de la fibra óptica (Ancho de banda teóricamente “infinito”, economía, mayor distancia de cobertura, entre otras) como las tecnologías de acceso AON (Active Optical Network) y PON (Passive Optical Network), las cuales brindan una solución más eficaz que las soluciones xDSL.

Entre las soluciones de acceso ópticas, las PON: ATM-PON (APON), Broadband-PON (BPON), Gigabit-PON (GPON) y Ethernet-PON (EPON), son las más económicas debido a que usan únicamente elementos pasivos para la transmisión. Por otro lado, la naturaleza de las redes EPON permite que solo con equipamiento pasivo, usado para dividir la señal óptica, se llegue desde el Nodo Central (Central Office Node), hasta el equipo de usuario final (Optical Network Terminal - ONT), lo que hace que la implementación de estas redes se presente como la opción más económica y con más ancho de banda disponible para la prestación de servicios interactivos de nueva generación y debido a que EPON utiliza el protocolo Ethernet para la transmisión de datos, se eliminan elementos de conversión entre tecnologías.

La oferta de Triple-Play, con voz, banda ancha y televisión, se ha convertido en el requisito básico para competir en el mercado de las telecomunicaciones. En esta oferta, muchos operadores están llegando a la conclusión de que la televisión marca el valor diferencial (por ser éste el principal medio de entretenimiento), dado que los otros dos elementos, voz y banda ancha, tienden a convertirse rápidamente en un producto básico de la oferta de Servicios.

Para la implementación del servicio IPTV resulta beneficioso el uso de la tecnología EPON, ya que es un servicio que utiliza gran ancho de banda, el cual puede ser alcanzado con redes pasivas de fibra óptica, siendo esta una opción económicamente interesante tanto para los operadores, como para los usuarios debido a la variedad de servicios agregados.

El presente trabajo de grado enmarcado en la línea de Comunicaciones Ópticas del Grupo I+D de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT), propone un conjunto de reglas para la implementación de este tipo de redes obtenidos a partir de la recolección de las características y criterios más relevantes de las tecnologías IPTV y EPON, verificados posteriormente con los resultados obtenidos en la simulación de este tipo de sistemas utilizando la herramienta OptSim.

De este modo este trabajo de grado consta de cuatro capítulos recopilados de la siguiente manera:

En el **Capítulo 1** se tratarán temas relacionados con los elementos que conforman una red de acceso EPON, su arquitectura y funcionamiento, así como también se hará un estudio en los elementos que componen un sistema de IPTV, tanto software como hardware.

El **Capítulo 2** se compone de dos secciones: en la primera se explican los protocolos necesarios para la transmisión de contenido de IPTV y los parámetros de calidad que necesita este servicio, en la segunda sección se abordan los conceptos técnicos relacionados con la fibra óptica, protocolos de control, de asignación de ancho de banda y medidas de eficiencia en redes EPON, todos estos conceptos son importantes a la hora de la realización de la simulación del sistema.

En el **Capítulo 3** se proponen una serie de criterios para la implementación de redes de acceso EPON que presten el servicio de IPTV, con base en conceptos teóricos de los **Capítulos 1 y 2**, además se proponen una serie de reglas a seguir por parte de un operador que desee implementar este tipo de sistemas.

En el **Capítulo 4** se hace un estudio de las diferentes herramientas de simulación consideradas en el desarrollo de este proyecto de grado, se define y ejecuta la simulación y se presentan los resultados obtenidos, con su respectivo análisis.

Finalmente, se termina el trabajo con las conclusiones derivadas del mismo y las recomendaciones pertinentes.

# 1. DEFINICIONES RELACIONADAS CON IPTV, FTTX Y EPON

---

En este Capítulo se desarrolla el marco teórico del proyecto, con el fin de ubicar al lector en las temáticas tratadas, abordando las características de: arquitectura, elementos, componentes y funcionamiento más importantes del servicio IPTV y de las redes de acceso EPON. Con este propósito se divide el capítulo en 3 secciones: en la primera, se hace una introducción al servicio IPTV, a sus elementos, escenarios de distribución y componentes *hardware* y *software*; la segunda sección, trata el tema de la red de acceso y soluciones disponibles, haciendo énfasis en las que utilizan fibra óptica y Ethernet para su comunicación; finalmente, la tercera sección está orientada hacia la descripción de la composición y funcionamiento de las Redes Ópticas Pasivas Ethernet (EPON), que junto con IPTV constituyen las temáticas principales a tratar.

## 1.1 Televisión sobre el protocolo IP (IPTV)

---

Según el Grupo de Trabajo en IPTV de la ITU-T (*International Telecommunications Union*) se define IPTV como: “*Servicios multimedia como Televisión/Video/Audio/Texto/Gráficas/Datos transportados sobre redes IP que soporten el nivel requerido de Calidad del Servicio (Quality of Service – QoS)/Calidad de la Experiencia (Quality of Experience – QoE), seguridad, interactividad y confiabilidad*”<sup>1</sup>.

Probablemente un término más adecuado para IPTV es “*IP video*”, dado que IPTV es la representación del contenido de video digital (incluyendo la televisión), el cual utiliza como mecanismo de entrega o transporte al protocolo IP (*Internet Protocol*) ya sea sobre una red IP pública (incluyendo Internet) o una red IP privada, donde Internet no tiene que ser necesariamente la red, ni la televisión el servicio [1]. IPTV es un soporte de televisión interactiva y proporciona muchos servicios en uno sólo gracias a las redes de banda ancha (xDSL, PON), lo cual genera una competencia eficiente en el mercado del *Triple Play* a favor de las empresas de telefonía convencionales que han afrontado pérdidas significativas de usuarios e ingresos en los últimos años debido a la introducción del servicio de VoIP (Voz sobre IP) por parte de los operadores de CATV (Televisión por cable) y al crecimiento de los operadores de telefonía móvil [2] - [4].

Desde el punto de vista técnico, a diferencia de los métodos convencionales (CATV y Televisión Satelital) que transmiten simultáneamente los canales de televisión (ocupando un ancho de banda de 600 MHz) a frecuencias predefinidas que son sintonizadas por los suscriptores, IPTV es completamente diferente al ser una tecnología “*pull-push*”<sup>2</sup> basada en software y un servicio completamente digital que opera bajo demanda, donde sólo se transmite el canal que solicite el suscriptor, ofreciendo una mayor capacidad y reduciendo el requerimiento de ancho de banda por canal (requiere de 15 a 20 Mbps de ancho de banda e incluye canales simultáneos, VoIP e Internet de alta velocidad) [1], [5].

---

<sup>1</sup> [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/opb/proc/T-PROC-IPTVFG-2008-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/proc/T-PROC-IPTVFG-2008-PDF-E.pdf).

<sup>2</sup> El usuario solicita el canal requerido y sólo este canal es transmitido a dicho usuario.

El impacto de IPTV se resume en 3 áreas [1], [6]:

- **Contenido.** Proporciona un número ilimitado de canales, películas, videos y otros contenidos bajo demanda, que superan a los ofrecidos por la televisión convencional.
- **Convergencia.** Ofrece servicios de Internet, televisión, contenido de video y VoIP bajo una misma conexión.
- **Interactividad.** Facilidad de transmisión bidireccional y una orientación hacia un mercado horizontal, con sistemas operativos abiertos que puedan ejecutarse en cualquier aparato receptor redundando en una mayor oferta de servicios y aplicaciones.

Existe una tendencia en tratar a IPTV y a la Televisión sobre Internet (también llamada *video streaming* sobre Internet o Internet TV) como sinónimos, pero en realidad estos términos describen dos tecnologías diferentes. IPTV es una tecnología que emplea una red IP que garantiza la calidad de servicio (QoS - *Quality of Service*) para cada flujo de información de video, y además introduce de manera relevante el concepto de calidad de la experiencia (QoE - *Quality of Experience*), mientras que en la Televisión sobre Internet el flujo de información hace uso de un servicio basado en el “mejor esfuerzo”. IPTV constituye una tecnología de televisión interactiva que puede igualar o mejorar la calidad de la distribución de señales digitales de video que se implementan actualmente [7] - [9].

Mientras que IPTV tiene asociado como componente integral a un hardware representado por el sintonizador o *Set Top Box* (STB), la Televisión sobre Internet tiene asociado como componente integral a un software representado por el Media Player (Windows Media Player, Quick Time, Real Player, Flash, entre otros) [1].

También es importante diferenciar IPTV de TVD (Televisión Digital), enfatizando en que la TVD es utilizada principalmente para la difusión de contenidos multimedia a múltiples usuarios gracias a la capacidad de un medio de difusión ya sea terrestre (TDT – Television Digital Terrestre), CATV o satelital. Según [10] al referenciar éstas dos tecnologías con el modelo OSI, es posible afirmar que la TVD corresponde a la distribución de contenidos sobre la capa 1 que opera por difusión en relación a los usuarios, y que IPTV por su parte necesita una red de paquetes para ser transportada, por lo que se puede considerar a IPTV como un servicio en capa de aplicación en el modelo OSI. La difusión de contenidos de TV en las redes IP actualmente implementa técnicas de multidifusión.

Las redes de TVD son unidireccionales, por lo tanto requieren de una red complementaria para hacer posible la interactividad implementando un canal de retorno (con una línea telefónica fija o móvil), lo que no ocurre con IPTV, ya que al ser una tecnología bidireccional emplea la misma red tanto para difundir los contenidos como para implementar el canal de retorno necesario para la interactividad [6], [11].

Entre los factores que han contribuido a la aparición de IPTV en el contexto de las telecomunicaciones están los siguientes [1], [3]: el mercado de la televisión por pago, el acceso a banda ancha (relacionado con el aumento en las descargas de contenido), retardos con el *Dial-up*, ofertas DSL y de Cable Modem con mayor velocidad de descarga, crecimiento del contenido de video en Internet, televisión en los equipos celulares, la implementación de formatos digitales (acompañado de la evolución en la compresión de video), y la convergencia de voz, datos y video.

Gracias a que IPTV ofrece un contenido digital de alta calidad y a que proporciona comunicaciones bidireccionales, es posible contar con varias aplicaciones por parte de este servicio, tales como [5], [12]: entretenimiento, TVD, televisión personalizada, VoD (contenido virtualmente ilimitado), aprendizaje a distancia con mayor interacción, comunicaciones empresariales, televisión en teléfonos móviles, video chat sin retrasos en la interacción.

IPTV además cuenta con las siguientes funcionalidades (**Anexo A.1**) [1], [13]: Guía electrónica de programación (EPG - *Electronic Program Guide*), sistema de menús para la selección, búsqueda y compra de los videos bajo demanda, sistema de grabación de video (PVR - *Personal Video Recorder*), sistema de repetición inmediata y congelado de escenas de un programa en vivo (*Time Shift TV* - TSTV), presentación de señales (de los canales en vivo) en Mosaico o *Picture in Picture*, sistema de control parental y para compra de servicios bajo demanda, contenido con audio de alta calidad, servicios interactivos, integración con otras plataformas de mensajería, capacidad de navegación por Internet en el TV (*Web TV*), entre otras.

En un marco de referencia Latinoamericano, se encuentra que IPTV afronta a la lentitud regulatoria como su mayor obstáculo para la prestación de éste servicio (y por ende para la convergencia tecnológica), y a la necesidad de destacar la superioridad de IPTV mediante el conjunto de aplicaciones y ventajas comparativas frente a las ofertas actuales. Además de esto, se requiere que los operadores hagan grandes inversiones para asegurar la capacidad de las redes y una demanda adecuada para desplegar este servicio. Es claro que con las velocidades actuales de banda ancha es muy difícil ofrecer el servicio de IPTV. En términos de regulación y enfoques a servicios *Triple Play*, Chile es el país de la región que se encuentra más adelantado [14]. El **Anexo A.2** muestra las velocidades máximas en Latinoamérica y el Caribe para conexiones de banda ancha.

### 1.1.1 Elementos de Red de IPTV

Un sistema IPTV puede ser representado principalmente por cuatro elementos de red, los que se describen en la **Figura 1.1** [1], [6], [15].

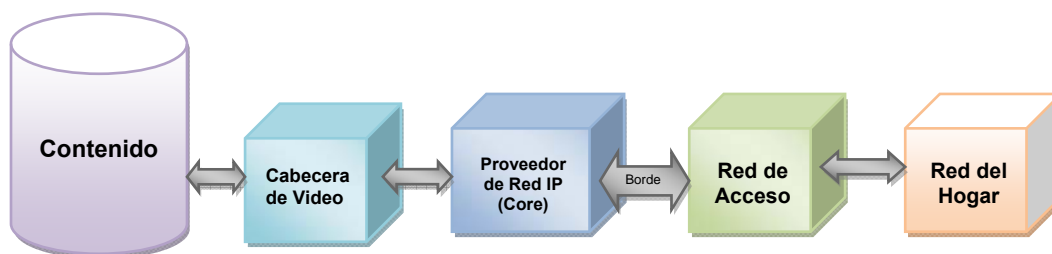


Figura 1.1. Elementos de Red de IPTV [1].

#### 1.1.1.1 Cabecera de Video

También conocido como *headend*, es el punto en donde se captura y formatea el contenido para su distribución en la red IP, y es similar a las cabeceras de video usadas en CATV y sistemas satelitales digitales. La cabecera de video de la red IP puede ser conectada a receptores satelitales para recibir televisión *Broadcast* y televisión *Premium*. Otro tipo de programación puede ser recibida a través de conexiones terrestres basadas en fibra, mediante el uso de DVD o de servidores de almacenamiento para el suministro de contenido bajo demanda.

La cabecera de video toma cada flujo de datos y lo codifica dentro de un formato de video digital (MPEG-2 o MPEG-4), luego lo encapsula en un flujo de datos IP y lo transmite a una dirección IP de destino específica en respuesta a la petición de un suscriptor por un canal en particular.

La cabecera de video está constituida a su vez por los elementos que se nombran a continuación; una descripción más detallada de los mismos se suministra en el **Anexo A.3**: Antenas satelitales, Descriptores, Codificadores (imprescindibles para ofrecer servicios de Broadcast TV), Conformador de la tasa de bits (*Bit Rate Shaping*), Multiplexor y un sistema de

inserción de propaganda y sobreimpresos. De estos cabe mencionar que el Conformador de la tasa de bits se encarga de la conformación de los *streams* de video a un modelo comparable a una tasa de bits constante (*Constant Bit Rate - CBR*) con el fin de conformar a partir de una entrada GbE MPEG VBR<sup>3</sup> una salida equivalente a un GbE MPEG CBR. Es conveniente que en las redes de transporte y acceso IP de IPTV los flujos de *video streaming* sean implementados de forma que puedan asimilarse como una tasa de bit constante, a pesar de que la codificación de las señales de audio y video resulta en flujos de información de ancho de banda variable.

### 1.1.1.2 Proveedor de Red IP

Es un sistema de transporte que permite que los datos vayan desde el núcleo (*core*) de la red conectado a la cabecera de video hasta el borde (*edge*) de la red (que se conecta directamente a los OLT o DSLAM de la red de acceso). En esta red los canales fluyen como *streams* de datos codificados, los cuales pueden consistir en datos enviados con transmisión unicast, multicast o broadcast.

### 1.1.1.3 Red de Acceso

También conocida como la conexión de primer kilómetro, se encarga de conectar a las premisas de los usuarios con el backbone de la red operada por el proveedor del servicio. Existen varias tecnologías para la red de acceso, tales como xDSL, VDSL y tecnologías PON. La red de acceso (en particular con tecnología xDSL) resulta ser el punto más limitante en la red IPTV, y por lo tanto, se deben manejar cuidadosamente. Como parte fundamental de este trabajo, la red de acceso, será tratada de manera más extensa en la **sección 1.2**.

### 1.1.1.4 Red del Hogar

Es responsable de la distribución de los servicios de IPTV en el hogar. IPTV requiere de una red del hogar muy robusta, la que actualmente se encuentra en etapa de evolución de un equipo Ethernet cableado a un Ethernet inalámbrico (que proporciona tasas de datos de hasta 100Mbps) y *HomePlug*<sup>4</sup> audiovisual (que proporciona tasas de datos de hasta 200Mbps). Los equipos terminales de la red del hogar son: computadores, teléfonos y STBs.

## 1.1.2 Escenarios de Distribución de Contenidos de IPTV

Basado en [1], [15] - [17] se puede afirmar que IPTV plantea dos escenarios de distribución de contenidos, tal como se muestra en la **Figura 1.2**.

### 1.1.2.1 Distribución de Televisión Broadcast

Son servicios de difusión similares a los de la CATV, que consisten básicamente en la distribución de señales en la modalidad Broadcasting (por ejemplo un canal de TV de noticias) y que no pueden valerse de la capacidad de difusión del protocolo IP ya que las redes se coparían de tráfico innecesario, por lo cual se recurre a la multidifusión (multicast) de acuerdo al IGMP (*Internet Group Multicast Protocol*). En este escenario se encuentran la broadcast TV y los servicios de *pay per view* de eventos.

Cada canal de TV seleccionado por el suscriptor se difunde en modo multicast como un único flujo de información a cada *Digital Subscriber Line Access Multiplexer* – DSLAM (al utilizar una red de acceso ADSL) o a cada *Optical Network Terminal* –ONT (al utilizar una red de acceso PON), y desde el DSLAM o en el ONT se difunde a los módems conectados que demanden dicho canal.

<sup>3</sup> Variable Bit Rate (Tasa de Bits Variable)

<sup>4</sup> Conexiones de datos por medio de la infraestructura eléctrica, también conocida como PLC (Power line Communications)

La selección de canal se realiza desde el STB, eligiendo éste el grupo de multicast al cual se unirá. Una vez que el STB este unido a cierto grupo de multicast (proceso de JOIN), recibirá el flujo de paquetes IP que se distribuye en este grupo, y a partir del flujo de paquetes recuperará la señal de video codificada.

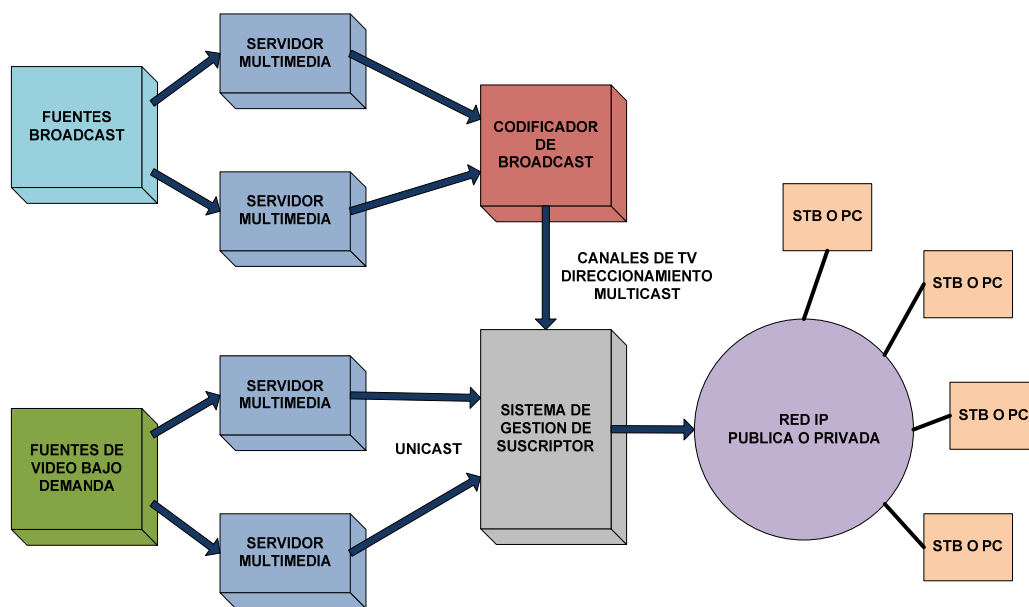


Figura 1.2. Escenarios de distribución de contenido IPTV [1].

En una red de CATV todos los canales llegan al domicilio del usuario a través del cable coaxial, donde un selector extrae el canal que se desea visualizar, función que no implica interactividad, ya que la mayoría de las redes de CATV operan sin canal de retorno. En IPTV cambiar de canal implica que el STB debe seleccionar el grupo de multicast del canal correspondiente, solicitándose al DSLAM u ONT que sirve a la red de acceso, que a su vez solicitan a la cabecera de video el flujo multicast correspondiente, o si ya hay otro usuario visualizando el mismo contenido, simplemente copia el flujo de paquetes IP correspondiente (el cual ya está recibiendo) al acceso que lo solicitó.

IPTV sin multicast sería inviable, pues obligaría a implementar un flujo de video entre la cabecera de video y los STB por cada canal que esté visualizándose en un TV (tal como lo hace la TV sobre Internet).

La velocidad de cambio de canales (*zapping*) en IPTV es más lenta que en el servicio de TV cable tradicional puesto que se superponen dos efectos: primero, la necesidad de que el STB seleccione un grupo multicast (proceso de "leave" y "join" de un grupo de multicast a otro), lo cual puede implicar varias centenas de milisegundos; y segundo, la detección de las tramas de video comprimido que permiten reconstruir la imagen, lo que puede ocurrir cada varios segundos, siendo este el mayor contribuyente a la lentitud del proceso de "*zapping*", ya que el video comprimido MPEG es eficiente si la información que se envía en el stream permite reconstruir el cuadro de imagen en función de información acumulada (incremental).

En la **Figura 1.2** se observa que cada fuente de *Broadcast* tiene entrada a un codificador de *Broadcast*, el cual empaqueta el stream de video, incluyendo la fijación del número de canal y la dirección de grupo multicast al que se asociará el STB. Los servidores multimedia soportan la distribución multicast y unicast (para VoD). El Sistema de Gestión del Suscriptor se encarga de la facturación de los servicios de IPTV, de la transmisión EPG y del soporte interactivo para un STB.



### 1.1.2.2 Distribución de VoD

Son servicios para un solo terminal (unicast), como pueden ser los de VoD y los relacionados con almacenamiento selectivo de información por medio del *Personal Video Recorder* (PVR), donde cada terminal accede a un flujo específico de video y necesita un canal de banda ancha dedicado mientras dura la descarga.

El VoD de IPTV permite al cliente realizar la repetición o salto limitados para determinadas secuencias, y requiere de servidores de VoD especiales en donde es esencial tener un control sobre la probabilidad de demanda en cada momento. El cliente dispone de una lista de películas, eventos en vivo, etc., desplegada por el Sistema de Gestión del Suscriptor, de las cuales puede elegir la que desee (el costo de la misma se le carga a su cuenta) para ver en el momento deseado.

El sistema consta de un almacén de datos de Medios Continuos (*Continuos Media - CM*) del cual toma los datos el Servidor de VoD que los retiene en un buffer propio y los distribuye adecuadamente a los buffers de los distintos clientes. La existencia de buffers en cada cliente es usada para proveer de alguna tolerancia en las variaciones de tráfico en la red y en los índices de consumo de datos. En este tipo de servicio existen dos variantes:

- **Real VoD:** el cliente que solicita una película, la recibe inmediatamente, ocupando el ancho de banda necesario para la transmisión entre el servidor de video y el cliente. Éste carga a la red de transporte en forma directamente proporcional al número de clientes.
- **Near VoD:** es una variante del anterior, pero se limita el comienzo de las películas a horas predeterminadas, limitando a la vez el ancho de banda requerido en la red, y así todos los clientes que comenzaron a ver la película a la misma hora ocupan en la red solamente el ancho de banda de una película.

### 1.1.3 Componentes Hardware de IPTV

#### 1.1.3.1 Set top Box (STB)

De [1], [16], [18], [19] se extraen las características y funciones más importantes relacionadas con el STB. El STB convencional o Equipo de Premisa de Usuario (*Customer Premises Equipment - CPE*) es un equipo que permite la recepción de señales procedentes de un solo medio de transmisión, es decir, satélite, cable, o televisión terrestre, y típicamente representa una interfaz entre la televisión y el proveedor del servicio para decodificar las señales, suministrar la EPG y grabar programas. El STB de IPTV permite adicionalmente aplicaciones de información, juegos, mensajes con nivel de interactividad y medios de navegación que facilitan la personalización de contenidos, para lo cual se requiere de redes dedicadas de banda ancha (cable, xDSL, PON).

Gracias a los avances de la tecnología moderna los fabricantes han desarrollado STBs con un enfoque multiplataforma que integran el acceso a diferentes medios físicos, que ofrecen unas capacidades y funcionalidades más avanzadas, concentrando el control y las comunicaciones de otros aparatos electrónicos del hogar.

Los STB presentan una interfaz Ethernet hacia la red de datos, que generalmente está conectada a un módem, o en algunos casos los STB tienen el modem integrado. También presentan una interfaz de conector RCA (*Radio Corporation of America*) o coaxial hacia el televisor, algunos además tienen interfaces de datos hacia el usuario. Típicamente cuentan con un control remoto, y en algunos casos con un teclado inalámbrico para navegar por Internet desde la TV.

A diferencia de los STB convencionales, el STB de IPTV trabaja con el protocolo de Datagramas de Usuario (*User Datagram Protocol – UDP*), y a través de software maneja las transmisiones unicast (para VoD) y multicast (para *Broadcast TV*).

Este dispositivo cuenta con un pequeño procesador que corre la aplicación de EPG, generalmente sobre plataformas Linux o Windows CE, para soportar aplicaciones como el browser de configuración del servicio, suscripción a canales, orden de películas de VoD, visualización del catálogo de películas, control de acceso, etc.

### 1.1.3.2 *Media Center (Centro Multimedia)*

Representa un componente con un sintonizador de televisión que permite a los usuarios ver televisión en tiempo real mientras realiza las operaciones tradicionales de un computador. Dependiendo de los permisos asociados con el contenido digital y el software del sistema operativo, los usuarios pueden grabar videos en el disco, quemar un DVD, así como también conectar el media center a uno o más televisores. Algunos media center cuentan con *plug-ins* que incluyen un software para desplegar y distribuir un caller ID sobre otros dispositivos conectados a la red del hogar [1]. Existen extensiones que son dispositivos utilizados para distribuir información a cualquier lugar de la red del hogar a través de conexiones de Ethernet cableado e inalámbrico.

### 1.1.3.3 *Servidores*

El STB, el media center y sus extensiones son dispositivos que se encuentran localizados en el hogar. En el extremo opuesto de la red se encuentran una serie de servidores que adquieren el contenido, lo formatean para su distribución y lo transmiten sobre la red IP hacia los suscriptores. Algunos servidores son utilizados de acuerdo a las ofertas de cada proveedor, y a la cantidad de usuarios, cuando el número de usuarios es pequeño se usa únicamente un software, pero a medida que el número de usuarios incrementa se usan servidores por separado para implementar ciertas funciones. Los diferentes tipos de servidores se describen a continuación [1], [16], [18].

#### 1.1.3.3.1. *Servidor de Cabecera*

Es un servidor muy importante en el entorno IPTV, y se ubica en la instalación central del proveedor de servicio. Se encarga de la captura directa de los streams de video Broadcast que son transmitidos vía satélite, por medio de radio frecuencias terrestres o por sistemas de cable, para luego convertirlos en streams de datos multicast usando asociaciones preseleccionadas de los canales de televisión para su posterior transmisión sobre la red IP.

El proceso incluye la conversión de las tramas de *Broadcast* recibidas a un formato digital (MPEG-2 o MPEG-4), y su posterior envío por medio de direccionamiento multicast. Éste servidor es equivalente al servidor multimedia (*media server*) y al decodificador broadcast (*Broadcast decoder*) que se muestra en la **Figura 1.2**.

#### 1.1.3.3.2. *Servidor Broadcast*

Es similar al servidor de Cabecera, pero con funciones adicionales usadas en un entorno empresarial y está destinado principalmente a la transmisión en vivo de video, audio y presentaciones a direcciones IP seleccionadas. A diferencia del servidor de Cabecera, éste servidor no convierte los streams *Broadcast* en múltiples transmisiones multicast ni tampoco trabaja en conjunto con uno o más STB. En su lugar, genera un suministro único a la vez, el cual es visto a través del uso de una operación de navegación en un computador o una gran pantalla.

#### 1.1.3.3.3. Servidor de Video digital (DVS)

Puede ubicarse en la cabecera del sistema de transmisión, o en algún punto de la red. Soporta la captura, edición, almacenamiento y transmisión del video digital. Permite crear contenido que es desplegado dentro de un área predefinida (aeropuerto, escuelas, librerías, hoteles, museos y empresas), por lo cual es un servidor más pequeño y menos poderoso que el dispositivo de cabecera, es usado en un sistema IPTV cerrado y la mayoría de sus funciones pueden ser incluidas en un media server genérico. A diferencia de un DVS convencional, cuyas transmisiones aparecen igual en todas las pantallas, éste DVS apto para IP puede transmitir diferentes tramas a diferentes direcciones IP.

#### 1.1.3.3.4. Servidor VoD

Funciona como una unidad del almacenamiento para el contenido de VoD, al cual puede acceder el suscriptor y por el cual hay un precio asociado. Las tres diferencias con los servidores *Broadcast* o el de Cabecera son:

- **Accesibilidad.** Los servidores de Cabecera y *Broadcast* transmiten los programas a tiempos predefinidos, en cambio el servidor VoD transmite la información almacenada en respuesta a la solicitud específica de un suscriptor.
- **Método de transmisión.** El servidor de Cabecera o el de *Broadcast* transmite cada stream de video como mensajes multicast a un grupo de suscriptores, mientras que el servidor VoD transmite el contenido directamente al suscriptor que ha hecho la solicitud como una secuencia de datagramas unicast.
- **Costo.** El suscriptor debe pagar una tarifa adicional para adquirir contenido VoD.

#### 1.1.3.3.5. Servidor de Archivos

Dado que el contenido de video ocupa una mayor capacidad de almacenamiento que los datos, capacidad de la cual pueden carecer los servidores de Cabecera y de VoD, se han diseñado los servidores de archivo para almacenar una gran cantidad de contenido en línea (en el rango de los terabytes). Normalmente almacenará el video usando un RAID (*Redundant Array of Independent Disc*), el cual puede ser conectado a la mayoría de servidores, pero es particularmente útil en un servidor de archivo en un entorno IPTV. Puede funcionar como respaldo a otro tipo de servidores, sirviendo como almacenamiento auxiliar para los servidores multimedia o media server genéricos.

#### 1.1.3.3.6. Servidor Timeshift Broadcast

El *timeshifting* es la posibilidad de pausar un video o una señal de televisión que está siendo transmitido en vivo, para verlo en otro momento; y aunque pueda ser ejecutado por medio de software en el servidor de Cabecera, Broadcast o VoD, algunas veces el proveedor del servicio de IPTV adquiere y almacena el video en este servidor separado de los otros para la transmisión a un tiempo específico. Puede almacenar programación de canales *Premium* (en definición estándar o en alta definición) para su transmisión a tiempos predefinidos y para permitir su retransmisión.

#### 1.1.3.3.7. Servidor de gestión y Facturación

La verificación (en el servicio de VoD), facturación y otras funciones de gestión son llevadas a cabo en un servidor por separado, y dado que son operaciones críticas para el servicio de IPTV, usualmente son implementadas en un sistema con procesador dual conectado a un RAID que suministra un alto grado de tolerancia de fallas. Generalmente se usan servidores duales

interconectados para soportar este sistema. Este servidor es equivalente al Sistema de Gestión del Suscriptor de la **Figura 1.2** y cumple las siguientes funciones:

- Verifica el estado de cuenta del suscriptor y le genera mensajes a éste cuando existe deuda o retraso en el pago del servicio.
- Crea una factura mensual con los datos capturados y se la envía al suscriptor vía e-mail o correo convencional.
- Acepta pagos a través de una transferencia electrónica o de tarjetas de crédito seleccionadas, por lo cual este sistema puede incluir conexiones de telecomunicaciones con organizaciones de tarjetas de crédito y la banca electrónica.

## 1.1.4 Componentes Software de IPTV

### 1.1.4.1 Middleware (MW)

De acuerdo a [16], [19], [20] es el sistema que soporta la entrega de servicios de IPTV, se encarga de definir y coordinar la forma en que el usuario interactúa con éste servicio, constituyéndose en una plataforma de gestión de aplicaciones que interactúa con la red de acceso, la cabecera y los STBs para permitir el aprovisionamiento y la distribución de servicios de televisión interactivos.

Es una parte crítica de la solución IPTV extremo a extremo, ya que provee las herramientas y tecnologías necesarias a los proveedores de servicios de banda ancha para ofrecer servicios de video haciendo uso de su infraestructura. El MW interactúa con los STB por lo que ambos deben contar con aplicaciones diseñadas en la modalidad cliente (STB)/servidor (MW). Además, debe asegurar la completa interoperabilidad del servicio de video, y no está limitado a una única operación en el sistema, siendo capaz de comunicarse directamente con cada componente para proveer soluciones de video y realizar el control y la operación de la red (gestionando los servicios, los usuarios, etc.).

Otras de sus funciones son, controlar la autenticación de los usuarios, manejar la información necesaria para la tarificación de los servicios, generando registros de consumo que serán procesados por otra entidad o sistema de facturación del operador.

El MW suministra a los usuarios una interfaz gráfica amigable y configurable, para acceder y controlar los servicios y funcionalidades mencionados. Así mismo podrá contar con interfaces hacia el resto de los componentes de la solución.

### 1.1.4.2 Sistema de Control de Derechos y de Acceso Condicional (DRM/CAS)

Es importante que una solución IPTV cuente con un sistema de control de derechos DRM (*Digital Rights Management*), que se encargue de la encriptación de los contenidos de modo que no se vulneren los derechos de propiedad intelectual de los contenidos al ser transmitidos en la red para los servicios de Broadcast TV y de contenidos bajo demanda. El DRM implica un cierto cifrado del contenido multimedia, el cual luego puede ser reproducido si el receptor cuenta con la licencia correspondiente que consiste en una clave para descifrar el contenido, para así evitar la copia de este. Si un suscriptor copia el contenido digital que recibe a otra persona, si ésta no cuenta con la clave para descifrar el contenido no podrá reproducirlo en su sistema [19] - [22].

## 1.2 Red de Acceso

Se define como la infraestructura que conecta los clientes residenciales, comerciales o empresariales con la Oficina Central (CO – *Central Office*) del proveedor de telecomunicaciones,

también se conoce como red de acceso o bucle de abonado. La CO también se conoce como cabecera (*Headend*) y es el edificio donde se encuentra el equipo que conecta la red de acceso con el núcleo de las redes metropolitanas (MAN - *Metropolitan Area Networks*) y las redes de largo alcance (WAN – *Wide Area Networks*) [23].

En la década pasada se ha presenciado un desarrollo significativo en las redes de Telecomunicaciones ópticas. Avances como la Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*), los amplificadores ópticos, el enrutamiento óptico, los multiplexores *add-drop* de longitud de onda y la conmutación de alta velocidad, encuentran su campo de acción en las redes WAN, resultando en un incremento sustancial de la capacidad de ancho de banda de estas redes.

Al mismo tiempo un importante número de hogares y empresas tienen computadores y diferentes dispositivos electrónicos, los cuales se interconectan mediante redes de área local (LAN – *Local Area Network*) de 100 Mbps (*Fast Ethernet*) o 1.000 Mbps (*Gigabit Ethernet*) y redes inalámbricas (WLAN – *Wireless Local Area Network*), a bajo costo y con una velocidad significativa, permitiendo compartir recursos como impresoras, discos de almacenamiento y conexiones a Internet.

El primer kilómetro es un mercado importante debido a la actual incompatibilidad de la velocidad en las soluciones de acceso y las necesidades de los clientes, los cuales tienen redes capaces de soportar cientos de megabits, el núcleo de las redes tiene gigabits de ancho de banda, mientras que las redes de acceso proveen velocidades de cientos de kilobits.

Esta limitación de las redes de acceso se conoce como cuello de botella (*bottleneck*), un problema ampliamente conocido en el campo de las Telecomunicaciones, en el cual el ancho de banda disponible en las redes de núcleo (*backbone*) es desaprovechado debido a las limitantes de tecnología en las soluciones de primer kilómetro (*First Mile*), dificultando el despliegue de nuevos servicios en las redes de datos [24], [25].

### 1.2.1 Soluciones en Redes de Acceso

Las soluciones tecnológicas de primer kilómetro más desplegadas en la actualidad son la Línea Digital de Abonado (DSL – *Digital Subscriber Line*) y las redes de Cable Modem (CM) o Híbrido Fibra – Coaxial (HFC – *Hybrid Fiber Coaxial*), las cuales superan la velocidad de 56kbps obtenidas mediante módems de banda vocal en las líneas telefónicas, pero aún así son incapaces de proveer suficiente ancho de banda para los servicios de video, datos y voz de nueva generación, información detallada de este tipo de redes se encuentra en el **Anexo A.4** y **A.5**, además en la **sección A.6**, se muestra un estudio del crecimiento del tráfico de datos en el mundo y en especial en América Latina y Colombia<sup>5</sup>. Para superar estas limitantes es necesario implementar redes de acceso de fibra óptica utilizando arquitecturas FTTx.

#### 1.2.1.1 Fibra Hasta la X (Fiber to the X - FTTX)

Para satisfacer las demandas de las aplicaciones presentes y futuras, en el campo de las telecomunicaciones, es necesario proveer el ancho de banda necesario requerido por todos los servicios. La fibra óptica proporciona la única solución capaz de terminar con el cuello de botella de las redes de acceso actuales, suministrando un ancho de banda suficiente para las necesidades en diferentes escenarios, como Hogares, Oficinas, Negocios y Entidades Gubernamentales.

La tecnología óptica provee gran capacidad de transferencia de datos a velocidades altas permitiendo a los proveedores de servicios brindar un amplio rango de servicios y nuevas aplicaciones sobre sus redes tales como Voz sobre IP (VoIP), Televisión (IPTV), Video bajo demanda (VoD), Internet de alta velocidad y servicios de valor agregado [25].

<sup>5</sup> [www.internetworldstats.com](http://www.internetworldstats.com)

Los proveedores de redes de acceso pueden realizar una oferta *Triple-play* (Voz, Video y Datos) utilizando redes de fibra óptica con o sin combinación con otras tecnologías. Una red de fibra óptica está compuesta por cableado de fibra óptica y dispositivos ópticos pasivos o activos como *splitters*, amplificadores y acopladores que distribuyen las señales a todos los dispositivos dentro de la topología escogida.

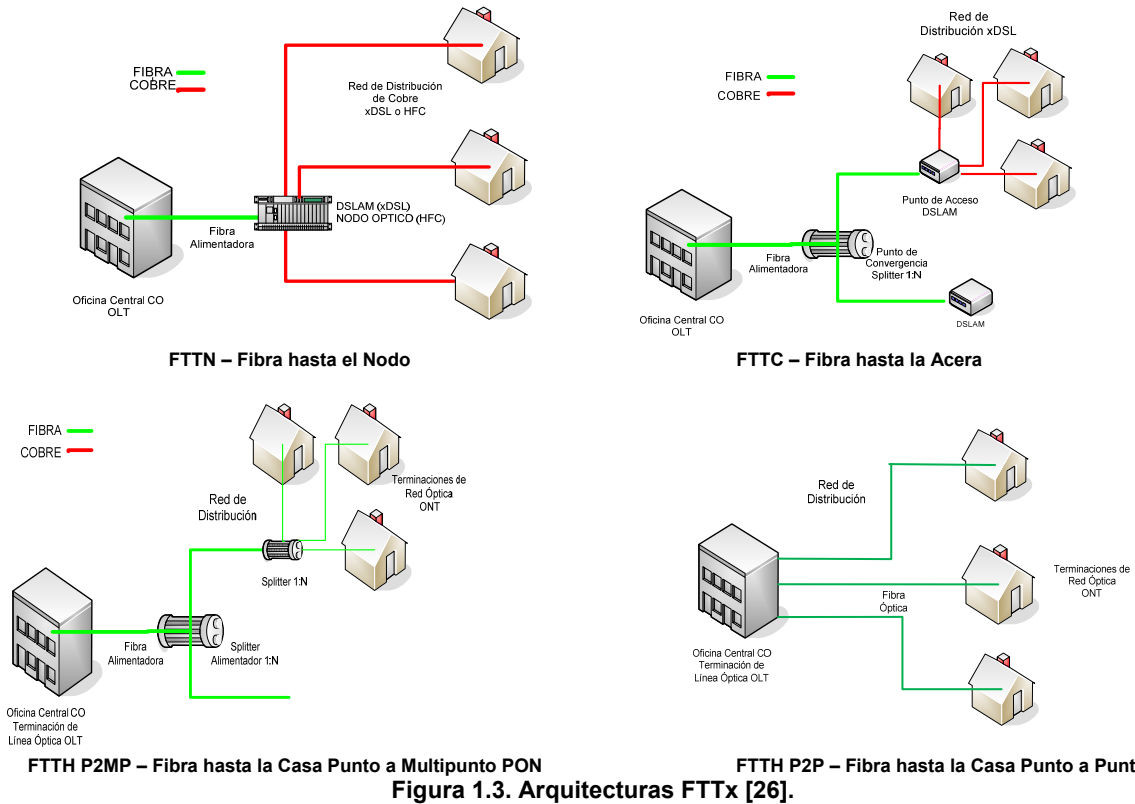
Algunas de las ventajas del uso de sistemas de fibra óptica son: alto ancho de banda, resistencia a interferencias externas, largo alcance, bajos costos de mantenimiento, alta durabilidad en dispositivos, alta confiabilidad [26].

### 1.2.1.1.1. Arquitecturas FTTX

Hay diferentes arquitecturas para el desarrollo de una red óptica, entre las que podemos incluir:

- Fibra hasta la Casa punto a punto → *Fiber to the Home* (FTTH P2P)
- Fibra hasta la Casa punto a multipunto → *Fiber to the Home* (FTTH P2MP)
- Fibra hasta la Acera → *Fiber to the Curb* (FTTC)
- Fibra hasta el Nodo → *Fiber to the Node* (FTTN)

Todas estas arquitecturas pueden enmarcarse en una sola, llamada FTTx. En la **Figura 1.3** se resumen las arquitecturas más importantes dentro de las FTTx, algunas de ellas combinan medios de transmisión existentes como el cobre y tecnologías de acceso como DSL o HFC, con fibra óptica y redes ópticas pasivas (PON) [26].



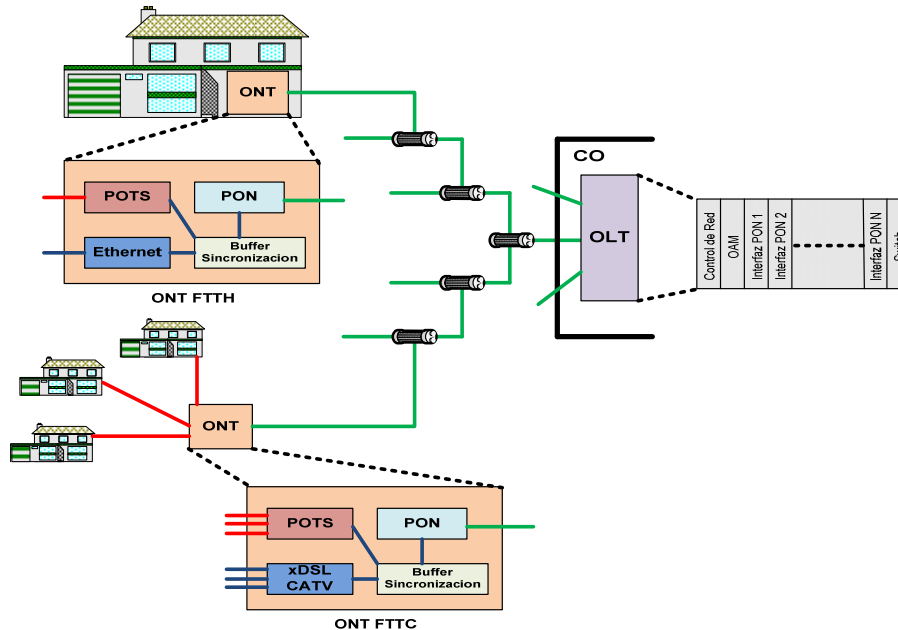
Las redes EPON utilizan arquitectura FTTH P2PM por lo cual son mas económicas y representan una alternativa muy interesante para el despliegue de servicios de nueva generación.

### 1.3 Redes ópticas pasivas Ethernet (EPON)

Como se muestra en la **Figura 1.4**, una red óptica pasiva está conformada por fibras ópticas en topología bus o árbol que interconectan múltiples equipos de usuario (ONT - *Optical Network Terminal*) con un único equipo en la oficina central (OLT - *Optical Line Terminal*). Para FTTH el ONT se encuentra en la ubicación del usuario, este ONT provee de diferentes servicios al usuario, desde puertos Ethernet hasta puertos de telefonía convencional (Plain Old Telephone Service - POTS), a su vez puede servir de sintonizador de IPTV y de enrutador. Para arquitecturas diferentes a FTTH el ONT tiene funcionalidades de DSLAM para sistemas DSL o de Nodo óptico para redes CATV.

El OLT consiste de un número de interfaces PON, un *switch* para los servicios de datos y un controlador de administración, operación y gestión (OAM).

Los sistemas PON envían la información por la misma fibra, para lo cual utilizan diferentes longitudes de onda, así: 1490nm para *downstream* y 1310nm para *upstream*, esto es beneficioso ya que los equipos con láser de 1310nm son más económicos. En algunos sistemas se envía la información de video RF en la banda de 1550nm y la información de *downstream* en la longitud de onda de 1490nm [27].



**Figura 1.4. Arquitectura de una red PON [25].**

Este tipo de redes utiliza Ethernet en la red de acceso (*Ethernet in the First Mile – EFM*) para la transmisión de información ya que es muy efectivo en cuanto a costos de implementación porque remueve convertidores de protocolo y elementos de red y reduce la complejidad de la arquitectura. La filosofía de Ethernet promueve la fabricación de altos volúmenes a bajos costos de diseño, beneficiando tanto a los operadores como a los usuarios finales [28].

En Noviembre de 2000 el grupo de trabajo en Ethernet 802.3 del IEEE formo un grupo de estudio para EFM conocido como "IEEE 802.3ah EFM Task Force". Este grupo formado por más de 100 empresas y 200 ingenieros, se encargó de la estandarización de Ethernet punto a punto en fibra y cobre, punto a multipunto sobre fibra (EPON) y operación y gestión de los enlaces [25].

La **Figura 1.5** muestra el alcance del grupo de estandarización de EFM 802.3ah dentro del modelo de interconexión de sistemas abiertos (*Open System Interconnection - OSI*).

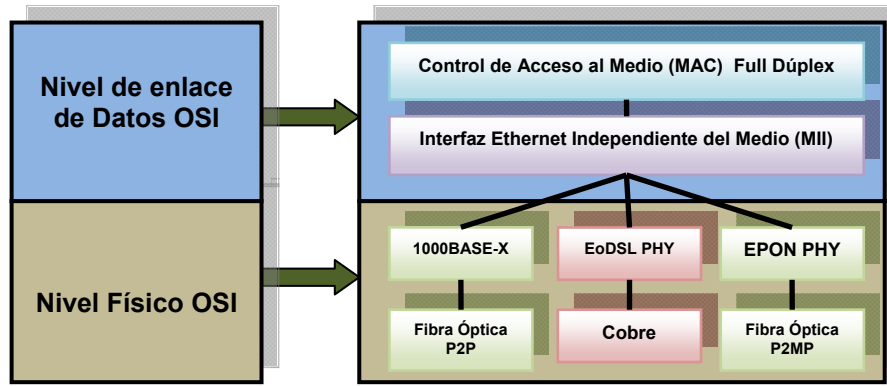


Figura 1.5. Correspondencia EFM con el modelo OSI [25].

La ventaja económica de las EPON se debe a que la fibra óptica es el medio de transporte más eficiente para tráfico de datos, video y voz, además ofrece un ancho de banda virtualmente ilimitado [23].

Debido a que implementar una solución de fibra punto a punto entre la CO y cada uno de los usuarios finales, instalar elementos activos en ambos extremos de la fibra y realizar la gestión de cada una de las fibras desde la CO, representa un costo muy elevado, las redes EPON se constituyen como una solución adecuada ya que hacen uso de la topología punto multipunto para la conexión entre la CO y los usuarios, lo cual elimina los componentes electro-ópticos activos, tales como: regeneradores, amplificadores y diodos láser de la planta exterior y reduce el número de láser en la CO. En la **Tabla 1.1** se muestra una comparación entre las implementaciones de soluciones fibra punto-punto y de redes EPON [23].

Fibra Punto – Punto	Redes EPON
Arquitectura Punto a Punto	Arquitectura Punto – Multipunto
Componentes electro-ópticos activos son necesarios al final de cada fibra y fuera de la CO.	Solo utiliza componentes ópticos pasivos fuera de la planta, tales como divisores y acopladores, los cuales son más simples y fáciles de mantener y tienen una vida útil más larga.
Cada suscriptor necesita un puerto de fibra separado en la CO	Puede acoplar el tráfico de varios usuarios en una sola fibra, que va desde un punto cercano a ellos directamente a la CO
Elementos activos costosos son destinados a cada usuario	El costo de los componentes activos es compartido entre varios usuarios
Baja escalabilidad	Alta escalabilidad y eficiencia

Tabla 1.1. Fibra Punto - Punto vs. EPON [23].

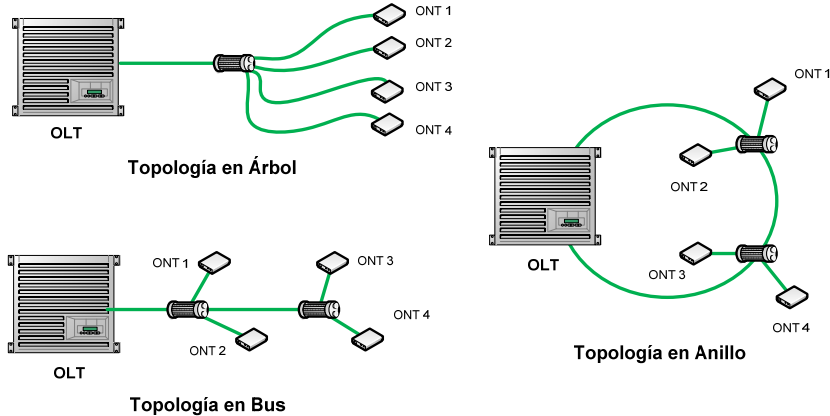
Además EPON ofrece otros beneficios [23], [25]:

- Reduce la inversión inicial en equipos y los costos de operación.
- Facilidad de despliegue porque requiere hardware de menor complejidad y no necesita planta electrónica externa, lo cual reduce la necesidad de técnicos expertos.
- Provisión flexible y reconfiguración rápida.
- Ofrece seguridad multicapa tal como las LAN Virtuales (VLAN) y soporta redes privadas virtuales (VPN), seguridad IP (IPSec) y túneles.
- Las empresas pueden incrementar sus ingresos explotando el amplio rango de servicios ofrecidos por una arquitectura EPON (Ancho de banda escalable desde 1Mb hasta 10Gbps, servicios de valor agregado, tráfico de voz, VPN, e IPTV).



### 1.3.1 Topologías EPON

Muchas topologías pueden ser implementadas en las redes EPON, en la **Figura 1.6** se observan algunas de ellas, de las cuales la más utilizada en ambientes residenciales es la topología en árbol, la topología en bus se utiliza en edificaciones o campus universitarios y la topología en anillo se utiliza en ambientes empresariales.

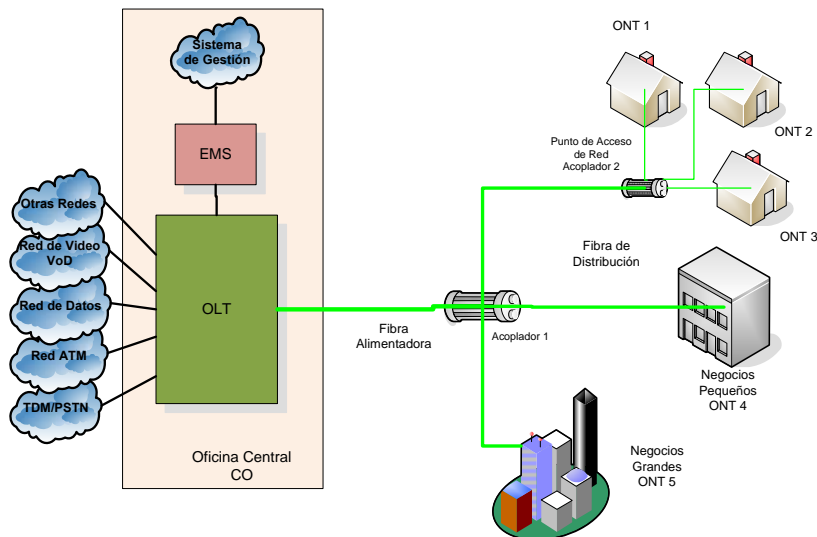


**Figura 1.6. Topologías de las redes PON [25].**

Algunos despliegues críticos requieren protección, que puede ser implementada utilizando técnicas como diversidad de trayecto o redundancia 1+n o 1:n, en toda la PON o en lugares estratégicos, como el tronco del árbol o el bus, dependiendo de la topología [25].

### 1.3.2 Arquitectura EPON

Los elementos pasivos en una red EPON están localizados en la red de distribución óptica (conocida como la planta exterior), esto incluye: cable de fibra óptica mono modo, splitters/acopladores, conectores y empalmes ópticos pasivos.



**Figura 1.7. Arquitectura EPON [23].**

Los elementos de red activos como la OLT (*Optical Line Terminal*) y las ONT (*Optical Network Terminal*) están localizados en los extremos de la PON. Las señales ópticas que viajan a través de

la PON son divididas entre múltiples fibras o combinadas en una sola fibra mediante los splitters/acopladores ópticos. La **Figura 1.7** ilustra los elementos de la arquitectura EPON. Los elementos activos de la arquitectura EPON como son: Bastidor de CO, OLT, ONT y el sistema de gestión (*Element Management System* - EMS) se detallan en el **Anexo A.7**.

### 1.3.3 Modelo de Capas de EPON

El trabajo del comité IEEE 802.3ah está confinado a los dos primeros niveles del modelo de referencia OSI, nivel físico y nivel de enlace de datos. Cada una de esas capas está dividida en subcapas e interfaces. La **Figura 1.8**, muestra el modelo de capas de 802.3 para velocidades de 1Gbps en EPON. Las subcapas del modelo de capas y sus respectivas funciones se mencionan a continuación [24], [25], [28]:

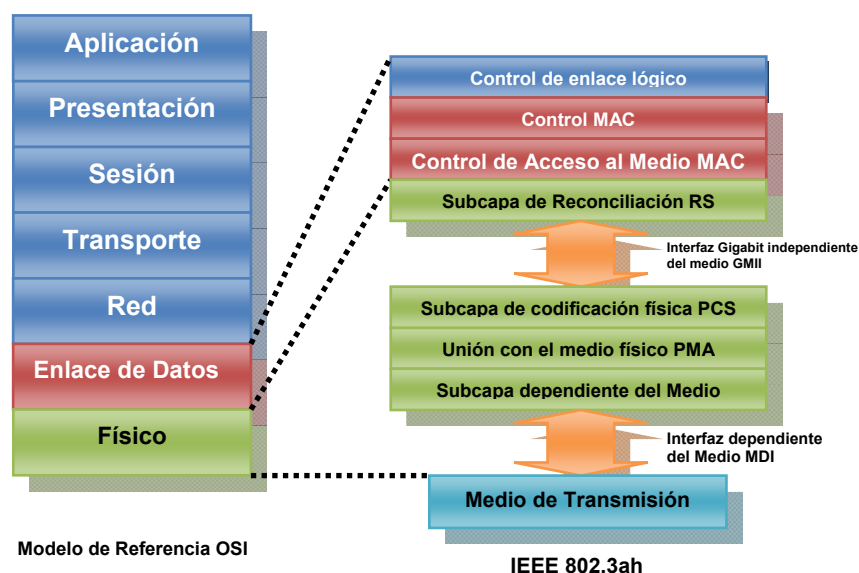


Figura 1.8. Modelo de Capas EPON [25].

#### 1.3.3.1 Capa Física

La tasa de transmisión de los sistemas EPON es de 1Gbps. Los datos son codificados usando código 8B/10B, resultando en una tasa de transmisión de señal en el medio de 1.25Gbps. La señal es transmitida usando una única fibra monomodo desde la CO hasta el *splitter* donde la señal es dividida en relaciones 1:8, 1:16, 1:32, 1:64, dependiendo de la implementación. Las señales de *downstream* son transmitidas con láser trabajando a 1490nm, mientras que las señales *upstream* son transmitidas con láseres más económicos trabajando en la ventana de los 1310nm. Las distancias máximas son de 10 a 20 kilómetros, dependiendo de la PMD seleccionada [25]. Esta capa está dividida en las siguientes subcapas:

- **Subcapa de Interfaz dependiente del medio MDI:** Especifica las señales que son enviadas al medio de transmisión y las interfaces eléctrico – ópticas entre el medio de transmisión y los elementos de la capa física.
- **Subcapa Dependiente del medio físico PMD:** Es la responsable de la interfaz con el medio físico, se localiza sobre la MDI. Esta subcapa cumple con los siguientes objetivos y esta detallada en la cláusula 60 del estándar 802.3ah [28].

- Soporte punto-multipunto sobre fibra óptica.
  - 1000 Mbps hasta 10 km en fibra monomodo con una relación de división hasta de 1:64.
  - 1000 Mbps hasta 20 km en fibra monomodo con una relación de división hasta de 1:64.
  - Relación de bit erróneo (BER) mejor o igual que  $10^{-12}$  en el nivel físico.
- **Subcapa de unión con el medio físico PMA:** Tiene las funciones de transmisión, recepción, recuperación de reloj y alineación de fase.
  - **Subcapa de codificación física PCS:** Tiene la función de codificar los bits de datos en grupos de código que pueden ser transmitidos por el medio físico. Para evitar transmisiones espontáneas de ONT's cercanas que dañen la señal de ONT lejanas, el láser del transmisor debe ser apagado entre transmisiones. Esta subcapa se encarga del control del funcionamiento del láser, para detectar datos provenientes de capas superiores y encenderlo y apagarlo en los momentos apropiados. Se define un tiempo de láser *on-off* de 512 ns y un ajuste de ganancia de 400 ns negociables Esta capa también especifica un mecanismo de corrección de errores FEC que incrementa la distancia de transmisión de la fibra, usando codificación Reed Solomon y 16 bytes de paridad, los cuales son usados para corregir errores en el receptor [25], [27].
  - **Subcapa de interfaz gigabit independiente del medio GMII:** Especifica la interfaz entre la interfaz MAC y la capa física. El objetivo principal de esta subcapa es interconectar diferentes tipos de equipos terminales de datos (*Data Terminal Equipment – DTE*) con diferentes especificaciones de medios de transmisión.
  - **Subcapa de Reconciliación RS:** Realiza el mapeo de las señales provenientes de la GMII hacia las definidas por la capa de control de acceso al medio MAC. La arquitectura IEEE 802.3 asume que todos los dispositivos conectados a un mismo medio pueden comunicarse unos con otros directamente, sin embargo debido a las propiedades direccionales de los splitters una ONT no es capaz de comunicarse con otra en la misma PON de manera directa. Para evitar este problema y que la red sea compatible con otras redes Ethernet se creó esta capa, que hace una emulación de un medio punto a punto y asigna una etiqueta, conocida como identidad de enlace lógico LLID (*Logical Link ID*), a cada ONT conectada a la PON. Estas etiquetas son enviadas en el preámbulo de cada transmisión, permitiendo la comunicación entre ONT's dentro de la misma PON [25], [27].

### 1.3.3.2 Capa de enlace de datos

Consiste de diferentes subcapas citadas de abajo hacia arriba:

- **Subcapa de control de acceso al medio (Medium Access Control – MAC):** tiene la función de transferir datos desde y hacia la capa física independientemente del medio de transmisión. En general la subcapa MAC define el encapsulamiento de los datos (direccionamiento, definición de la trama y detección y corrección de errores) y el acceso al medio (detección de colisiones y retardos).
- **Subcapa de control MAC:** Se encarga del control y la operación en tiempo real de la subcapa MAC.

- **Subcapa de control de enlace lógico (Logical Link Control – LLC):** define una subcapa perteneciente a la capa de enlace de datos independiente del medio que esta fuera del alcance del estándar 802.3ah, esta capa está definida en el estándar 802.3 Ethernet como tal y es compatible con las especificaciones de EPON.

### 1.3.4 Funcionamiento de las redes EPON

#### 1.3.4.1 Manejo de tráfico Downstream y Upstream

La **Figura 1.9** ilustra cómo es transmitida la información desde la OLT hacia múltiples ONT's en paquetes de longitud variable de hasta 1.518 bytes, de acuerdo con el protocolo IEEE 802.3. Cada paquete tiene un encabezado que lo identifica como perteneciente a la ONT-1, ONT-2 u ONT-3, algunos paquetes pueden pertenecer a todas las ONT's (broadcast) o a un grupo de ONT's (multicast). En el splitter el tráfico es dividido en tres diferentes señales que llegan a cada uno de los ONT, es allí donde se selecciona el paquete correspondiente y se descartan los demás paquetes [23].

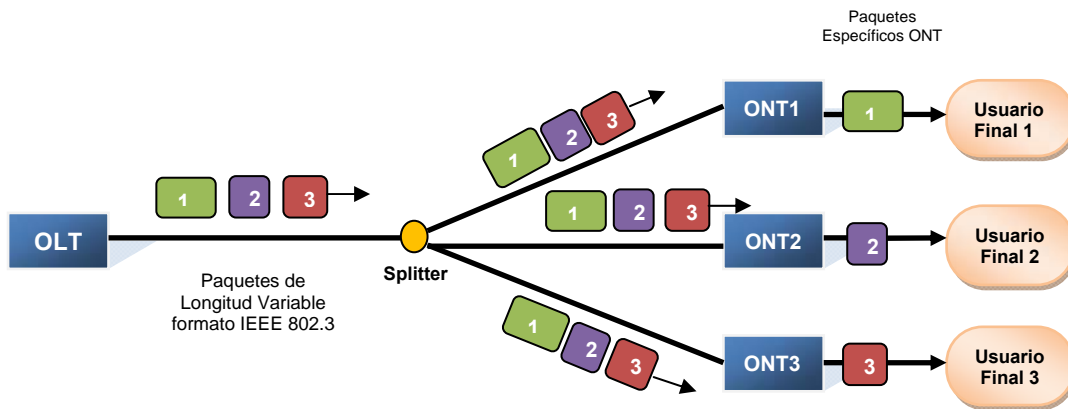


Figura 1.9. Tráfico downstream en EPON [23].

La **Figura 1.10** ilustra cómo es manejado el tráfico upstream utilizando la técnica de acceso múltiple por división de tiempo TDMA, en donde un slot de tiempo es dedicado para cada ONT. Los slots de tiempo están sincronizados, de tal manera que los paquetes no interfieran con los dedicados a otras ONT una vez que los datos son acoplados en una sola fibra.

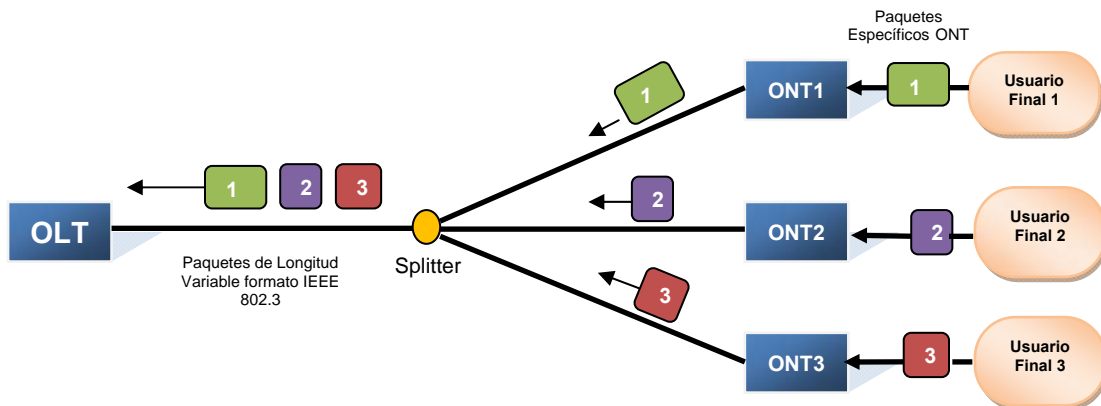


Figura 1.10. Tráfico upstream en EPON [23].

Para evitar colisiones en la recepción de datos se dispone de una banda de guarda. Para calcular la banda de guarda es necesario tener en cuenta la distancia a la cual se encuentra el ONT, esto lo realiza de forma automática el OLT, calculando el tiempo de viaje de cierta información dentro de la PON.

### 1.3.4.2 Formato de trama EPON

Al ser EPON una tecnología Ethernet tiene el mismo formato de trama de datos, únicamente se realizaron modificaciones en el campo preámbulo. La **Figura 1.11** ilustra un ejemplo de una transmisión *downstream* desde la OLT a la ONT con paquetes de longitud variable. El tráfico es segmentado en intervalos fijos, cada uno de los cuales posee paquetes de longitud variable. Se incluye información de sincronización en el inicio de cada trama. El marcador de sincronización es un código de un byte que es transmitido cada 2ms para sincronizar el OLT con la ONT. También se incluyen un campo de detección de errores y de encabezado para direccionamiento [23].

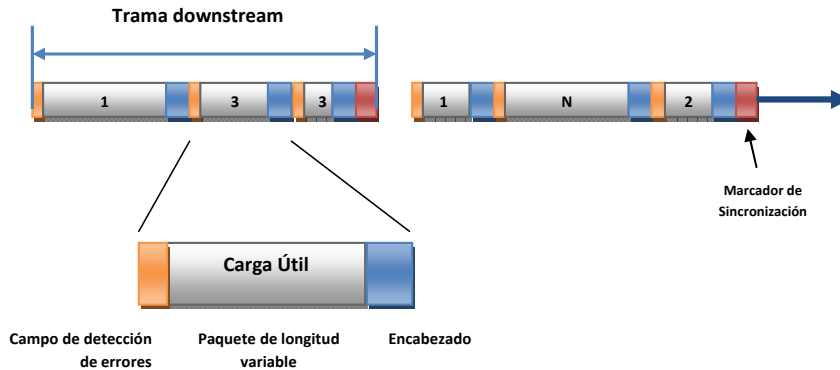


Figura 1.11. Trama downstream en EPON [23].

La **Figura 1.12** muestra como es la trama *upstream* en una EPON, las tramas upstream son segmentadas en tramas dedicadas exclusivamente a cada ONT en un slot de tiempo determinado, el encabezado identifica el comienzo de cada trama.

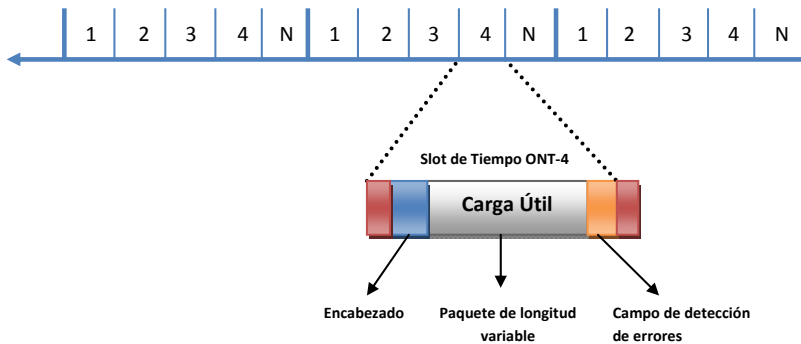
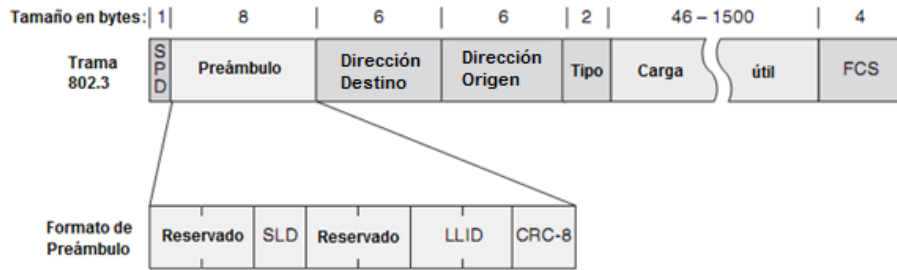


Figura 1.12. Trama upstream en EPON [23].

El campo preámbulo es un legado del método CSMA/CD de los primeros días de Ethernet y quedó obsoleto después de la implementación de las transmisiones full dúplex, por este motivo se modificó en EPON para darle un buen uso [25]. La **Figura 1.13** muestra el formato de trama Ethernet y detalla el preámbulo de EPON.



**CRC:** Comprobación de Redundancia Cíclica.

**FCS:** Secuencia de verificación de Trama (*Frame Check Sequence*).

**LLID:** Identificador de 2 bytes de la MAC de cada ONT. Es único para cada ONT y puede estar asociado a un grupo de ONT's para la transmisión de tráfico multicast.

**SLD:** Delimitador del LLID, tiene el valor de 0xD5 en hexadecimal.

**SPD:** Delimitador de inicio del Preámbulo (*Start Preamble Delimiter*).

**Figura 1.13. Formato de trama Ethernet y del preámbulo en EPON [25].**

Después de considerar los puntos más importantes tanto de EPON como de IPTV y de sentar una base teórica que ayude a construir en los capítulos siguientes los criterios de dimensionamiento de este tipo de redes y servicios, se pasa al **Capítulo 2**, en donde se abordan a fondo algunos conceptos fundamentales para llevar a cabo la simulación de la red de acceso EPON para la prestación de un servicio IPTV y por ende el cumplimiento del objetivo principal del proyecto.

## 2. CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN UN SISTEMA DE IPTV SOBRE REDES EPON.

---

Dando cumplimiento al objetivo específico, **literal a**, del anteproyecto: “**Definir los parámetros de desempeño más relevantes para la implementación de una red de acceso EPON en la que se preste el servicio de IPTV**”, en este apartado se hace referencia a los parámetros técnicos, de desempeño, códecs, protocolos, estándares, recomendaciones mínimas de calidad y medidas de eficiencia más importantes a tener en cuenta en el dimensionamiento de una red de acceso EPON para prestar un servicio IPTV. Para empezar, se hace una recopilación de los códecs de video más utilizados con el fin de soportar teóricamente la selección del códec más apropiado; seguidamente, se hace una descripción teórica de los protocolos más relevantes utilizados en la difusión de IPTV; además, se hace énfasis en los principales parámetros de calidad que debe cumplir este servicio. Continuando con el estudio, se analiza el funcionamiento de las redes EPON, las medidas de eficiencia, parámetros de calidad y desempeño que se deben considerar para este tipo de redes. Finalmente, y como una parte importante de la simulación del **Capítulo 4**, se hace un estudio del diagrama del ojo en sistemas de comunicación óptica, ya que éste resulta útil en la interpretación de los resultados de dicha simulación. Además este capítulo contribuye a generar directrices para proponer los criterios para la implementación de este tipo de redes tratados en el **Capítulo 3**, aportando al cumplimiento del objetivo general del anteproyecto: “**Dimensionar una red de acceso EPON en la que se preste el servicio IPTV en Colombia**”.

### 2.1. Protocolos de Codificación de Señales de Video

---

En la actualidad los sistemas de video digital se encuentran ampliamente estandarizados, siendo los estándares más aceptados por la industria los especificados por el grupo MPEG (*Moving Pictures Experts Group*) de la ISO (*International Standards Organization*), cuya principal fortaleza está en la especificación de la codificación y decodificación del contenido multimedia, siendo los códecs MPEG-2 y MPEG-4, los de mayor aceptación en la industria. A continuación se hace una reseña de las principales características de los mismos [1], [29] - [31].

#### 2.1.1. MPEG-2

---

Este estándar permite un flujo de transmisión tanto para imagen como para sonido de hasta 40 Mbps, con lo cual se soluciona el problema de la baja calidad de video del estándar MPEG-1. Presenta mejoras en la compresión, codificación entrelazada (además de progresiva) y gran flexibilidad debido a la utilización de diferentes perfiles y niveles. MPEG-2 está constituido por 3 partes o estándares:

- ISO/IEC 13818-1 Sistemas MPEG-2 (Rec. H.222).
- ISO/IEC 13818-2 Vídeo MPEG-2 (ITU-T Rec. H.262).
- ISO/IEC 13818-3 Audio MPEG-2.

H.262 trabaja con codificación de vídeo de alta calidad con posible vídeo entrelazado de NTSC<sup>6</sup> (*National Television System Committee*), PAL<sup>7</sup> (*Phase Alternating Line*) o Televisión de Alta Definición (HDTV). Tiene un amplio rango de aplicaciones, velocidades, resolución, calidad de las señales y servicios, incluyendo todas las formas de medios de almacenamiento digital, televisión (incluyendo HDTV), broadcasting y comunicaciones. Además, es capaz de codificar SDTV a tasas de datos desde 3 hasta 5 Mbps y HDTV desde 15 hasta 30 Mbps.

Pese a que MPEG-2 es una recomendación compleja y con una amplia lista de combinaciones, cuenta con un pequeño grupo de combinaciones que son indicadores de las variaciones en la calidad de compresión (definidas a partir de perfiles y niveles) con el propósito de que el estándar se ajuste a cada sistema en particular y que los fabricantes cuenten con una referencia de éste estándar para sus productos.

### 2.1.1.1. Niveles

Describen las capacidades cuantitativas de MPEG-2 tales como el tamaño de la memoria, resolución (definiendo los máximos y mínimos para la imagen), máxima tasa de bits, muestras Y por segundo (luminancia), y el número de capas de audio y vídeo usadas en los perfiles. MPEG-2 tiene 4 niveles cuyas características se detallan en la **Tabla 2.1**, y donde cabe destacar que el nivel bajo cuenta con capacidad para baja resolución, el nivel principal tiene capacidad definición estándar (SD), el nivel Alto y el Alto-1440 cuentan con un formato de alta definición (HD).

Nivel	Ancho de Cuadro (Píxeles)	Altura de Cuadro (Píxeles)	Tasa de Cuadros (Hz)	Tasa de Bits (Mbps)	Tamaño de Buffer (Bits)
Bajo	352	288	30	4	475136
Principal	720	576	30	15	1835008
Alto -1440	1440	1152	60	60	7340032
Alto	1920	1152	60	80	9781248

Tabla 2.1. Niveles de MPEG-2 [1], [31].

### 2.1.1.2. Perfiles

Representa el grado de complejidad esperado en la codificación, por lo cual constituyen implementaciones de protocolos y acciones para usar las capacidades necesarias requeridas por aplicaciones específicas, por lo tanto se encargan de definir la escalabilidad, resolución del espacio de colores y subconjuntos con características de sintaxis. Hay cinco perfiles, cada uno más sofisticado y con más herramientas que el anterior (por ende más costoso), pero con la particularidad de ser compatibles (un alto perfil puede decodificar perfiles simples).

- **Perfil Simple**, ofrece video para equipos con ancho de banda limitado y no permite el uso de tramas bidireccionales.
- **Perfil Principal**, posee herramientas mejoradas del perfil simple y predicción bidireccional, además de una mejor calidad para la misma velocidad binaria que el perfil simple. Suministra servicios de televisión estándar, y es usado en aplicaciones de televisión broadcast.
- **Perfil Escalable SNR y Perfil Escalable Espacial**, permiten codificar datos de vídeo que sean particionados dentro de una capa base y una o más señales (que pueden tratar tanto la proporción S/N -SNR escalable- o la resolución -escalable espacial-) para mejorar el desempeño de una señal de video. Suministra video variando el ancho de banda de acuerdo a las necesidades.

<sup>6</sup> Sistema de codificación y transmisión de Televisión a color analógica desarrollado en Estados Unidos.

<sup>7</sup> Sistema de codificación empleado en la transmisión de señales de televisión analógica en color en Europa, Asia y África.



- **Perfil Alto**, incluye las herramientas de las versiones anteriores y mejoradas. Puede codificar diferencias de color entre líneas simultáneamente. Es usado para HDTV.
- **Perfil 4:2:2**, ofrece video a color de alta calidad y es usado para producciones de estudio y distribución de servicios.

De lo anterior es posible concluir que SDTV requiere idealmente de una combinación del perfil principal y nivel principal (MP@ML), mientras que HDTV requiere del perfil alto y nivel alto-1440.

En cuanto al audio, MPEG-2 ofrece seis canales de audio que se pueden usar para distribuir tres pares de estéreos (o seis canales mono) para aplicaciones multilinguaje o para crear un sistema estereofónico multicanal.

MPEG-2 puede soportar relaciones de aspecto de 4:3<sup>8</sup> y 16:9<sup>9</sup>, así como múltiples canales de audio y video en el mismo tren binario. En MPEG se encuentran imágenes codificadas intracuadro tipo "I" e imágenes predichas intercuadro tipo "P". La primera imagen de un grupo debe ser una imagen "I" para poder arrancar la decodificación, el número de imágenes situadas entre dos imágenes "I" se denomina Grupos de Imágenes (*Group of Pictures – GOP*). MPEG define también imágenes bidireccionales "B" que pueden predecirse desde imágenes posteriores o anteriores, con lo cual se alcanza una mejor aproximación al valor real.

Aunque MPEG-2 es ampliamente utilizado en la mayoría de sistemas de broadcasting de Televisión digital, en el formato de almacenamiento SVCD, DVD, transmisión DVB y ATSC, está siendo reemplazado paulatinamente por MPEG-4 Part 10/H.264/AVC.

### 2.1.2. MPEG-4 Y H.264/AVC

MPEG-4 (ISO/IEC-14496) es un estándar mucho más versátil y complejo que sus predecesores MPEG-1 y MPEG-2, al trabajar con numerosos algoritmos y variantes para la compresión de video (a altas y bajas tasas de bits), audio y gráficos, así como también la composición de escenas 3D interactivas a partir de objetos. En cuanto a la codificación de video (parte 2 de éste estándar conocido como MPEG-4 Visual), incorpora mejoras importantes de calidad frente a MPEG-1 y MPEG-2. La compresión y descompresión son diferentes dado que las imágenes están divididas en componentes de Objetos de Video (*Video Objects Component - VOC*) y componentes de Objetos de Audio (*Audio Objects Component - AOC*) que se manejan independientemente y donde deben definirse relaciones entre los mismos. MPEG-4 ofrece las siguientes ventajas: un sistema independiente del formato de representación para que pueda ser usado sobre varios entornos para la entrega de los datos, un ancho de banda desde 5 Kbps a 10 Mbps, calidad de audio desde telefonía hasta calidad CD estéreo, resolución de video que soporta HDTV y objetos sincronizados en las funciones de rebobinado y pausa.

MPEG-4 se encarga del encapsulamiento de cada tipo de objeto (codificado y comprimido en base a normas existentes) para luego enviarlo a través de redes de distinta tecnología y ancho de banda, obteniendo una mayor eficiencia final (hasta un 50% mayor) que con MPEG-2 ya que reduce los requerimientos de ancho de banda. Para tomar provecho de estas ventajas los contenidos se deben fragmentar en objetos.

Dado que MPEG-4 es un estándar más complejo que MPEG-2, define un mayor número de perfiles. De todos ellos los más usados para codificación de video natural en aplicaciones de distribución o video bajo demanda son el Perfil Simple (*Simple Profile - SP*) y el Perfil Simple Avanzado (*Advanced Simple Profile - ASP*) que definen exclusivamente video rectangular (no tienen soporte para objetos de video). Además, el ASP incorpora sobre el SP una serie de técnicas adicionales que le permiten una reducción mayor del ancho de banda usado.

<sup>8</sup> Aspecto normal (pantallas estándar).

<sup>9</sup> Aspecto panorámico o *widescreen*.

Al igual que MPEG-2, MPEG-4 se compone de varias partes, de las cuales se destacan:

- La parte 6, que define un protocolo opcional llamado *Delivery Multimedia Integration Framework* (DMIF), que es capaz de manejar sesiones para una gran diversidad de protocolos de transporte.
- La parte 8, que especifica el transporte de MPEG-4 sobre una red IP.
- La parte 10, que constituye una parte muy importante al especificar el H.264.
- La parte 14, en donde a diferencia de MPEG-2, MPEG-4 si realiza una especificación de almacenamiento en disco.

### 2.1.2.1. H.264

El estándar H.264 fue comenzado por el grupo de trabajo *Video Coding Experts Group* (VCEG) de la ITU-T y las últimas etapas fueron llevadas a cabo por la *Joint Video Team* (JVT) conformado por los grupos VCEG y el MPEG. El estándar final fue publicado en conjunto en 2003, por MPEG como la parte 10 del estándar MPEG-4 y por ITU-T como H.264. Es necesario aclarar que MPEG-4 y H.264 no son sinónimos, ya que H.264 (también llamado H.264 *Advance Video Coding -AVC*) corresponde a la parte 10 del estándar MPEG-4.

Aunque MPEG-4 Visual y H.264 son contemporáneos, el primero se enfoca en la flexibilidad comprendiendo la gran mayoría de sistemas de video digitales posibles, mientras que el segundo se centra en la eficacia en la compresión y la confiabilidad de la transmisión.

H.264 es similar a MPEG-2 en cuanto a la codificación y decodificación, e incluso puede usar tecnologías de transporte que son compatibles, simplificando la evolución de MPEG-2 a H.264. Sin embargo una diferencia significativa radica en que H.264 no requiere de hardware propietario de codificación y decodificación que resulta más costoso, facilitando un despliegue de soluciones más rápido usando sistemas de procesamiento, servidores y STB basados en estándares.

Al igual que MPEG-2, H.264 presenta diferentes grados de calidad y resolución definidos como perfiles y niveles (para los cuales utiliza también la misma nomenclatura). Actualmente existen siete perfiles en el estándar: *Baseline Profile* (BP), *Extended Profile* (XP), *Main Profile* (MP), *High Profile* (HiP), *Hi 10 Profile* (Hi10P), *High 4:2:2 Profile* (Hi422P) y *High 4:4:4 Profile* (Hi444P). De éstos el más utilizado es el perfil alto HiP.

H.264 hace una mejora de MPEG-2 referida al formato de codificación, en donde se separa la codificación de la transferencia. El formato de salida del codificador se llama *Video Coding Layer* (VCL) que corresponde a una secuencia de bits representando video codificado, constituyéndose en una parte especial de H.264 al permitir la encapsulación del stream para la transmisión sobre una red TCP/IP.

Para IPTV la capacidad estimada para un canal de SDTV utilizando MPEG-4 AVC está entre 1.5 y 3 Mbps, y para un canal de HDTV está entre 8 y 12 Mbps.

### 2.1.2.2. Transmisión

No existe un sistema oficial de transporte para la transmisión definido para MPEG-4 y H.264, pero con la enmienda 3 de MPEG-2 se puede transportar MPEG-4 y en particular H.264 con los transportes que se definen en el mismo: *Program Streams* (conocido como MPEG-2 PS o simplemente MPEG-PS) y *Transport Streams* (conocido como MPEG-2 TS o simplemente MPEG-TS).

Por su parte, la IETF ha actualizado su estándar *Real Time Protocol* (RTP) para la transmisión de MPEG-4 y H.264. H.264 hace una mejor abstracción que MPEG-2 y separa completamente el transporte de la codificación en lo que llama *Network Abstraction Layer* (NAL), cuya estructura fue pensada para un empaquetamiento más eficiente dentro de paquetes RTP.

Aunque actualmente los sistemas de video digital como la televisión digital por cable, terrestre y satelital o el formato DVD utilizan el estándar MPEG-2, se está iniciando por parte de la industria una clara adopción de MPEG-4 y en especial de H.264/AVC en sistemas de video digital de alta resolución y despliegue de nuevos sistemas de video digital, como las redes de IPTV (que en su mayoría han elegido H.264), proporcionando también una forma eficiente de comprimir video para streaming. Por lo tanto, es de esperar que con el paso del tiempo los distintos sistemas de transmisión de video migren a este formato reemplazando los tradicionales H.262/MPEG-2, sobre todo para que los niveles de producción alcancen la escala necesaria para mejorar la fijación del precio del componente. A continuación a manera de conclusión se mencionan los beneficios de la adopción de H.264 para IPTV:

- Reduce los costos de despliegue y operación comparados con MPEG-2, ya que al contar con una compresión de video más eficiente, recorta los costos de transmisión sobre enlaces satelitales o terrestres. Además, cuenta con nuevas plataformas tecnológicas de H.264 basadas en estándares y en hardware de procesamiento no propietario disponible comercialmente
- Dobra la eficiencia de compresión, reduciendo las tasas de bits a la mitad de los requerimientos de MPEG-2 para video de alta calidad y reduciendo la capacidad de almacenamiento necesaria, mientras mantiene la calidad de difusión para HDTV y VoD.
- Incorpora un NAL que ofrece flexibilidad en el transporte de paquetes, permitiendo una mejora de las soluciones de entrega basadas en MPEG-2.
- Mantiene un alto nivel de la experiencia de usuario en las redes de paquetes e inalámbricas.
- Usa una serie de tecnologías entre móvil e IPTV: streaming TCP/UDP + H.264.
- Las capacidades de interactividad de MPEG-4 permiten ofrecer servicios interactivos de valor añadido embebidos en streams de video.

## 2.2. Protocolos para la transmisión de video en una Red IP

Gracias a los adelantos en la capacidad de procesamiento, tecnologías de compresión y dispositivos de almacenamiento de gran ancho de banda, es posible transportar servicios multimedia, ya sean video en vivo o almacenado previamente. En las redes IP, las técnicas para transmisión de video se conocen como mecanismos de streaming que consiste en el envío de flujos de datos a los usuarios con la particularidad de que la reproducción es inmediata (transmisión en vivo de audio y video), lo que significa que el video no se almacena en ningún dispositivo sino que se decodifica y reproduce tal y como se recibe. Si un usuario hace un avance o un rebobinado, sólo se modifica el modo en que se envían las tramas de video en el streaming. Éste mecanismo es muy importante para servicios de VoD dado que a cada cliente se le envía un flujo de video personalizado que maneja a su voluntad.

A continuación se abordan los protocolos más importantes en el contexto de IPTV, enfatizando en la capa de red y transporte (capa 3 y 4 respectivamente del modelo OSI de la ISO). Los protocolos de red y transporte que se abordan a continuación se basan en [1], [16], [32], [33].

### 2.2.1. Pila de Protocolos de TCP/IP

La pila de protocolos de TCP/IP consta de dos protocolos que pertenecen a la capa 4 del modelo OSI (capa de transporte): TCP y UDP y se define una pila de protocolos en 5 niveles similar al modelo de referencia OSI (*Open System Interconnection*) de 7 niveles de la ISO (*International Standards Organization*), tal como se muestra en la **Figura 2.1**.

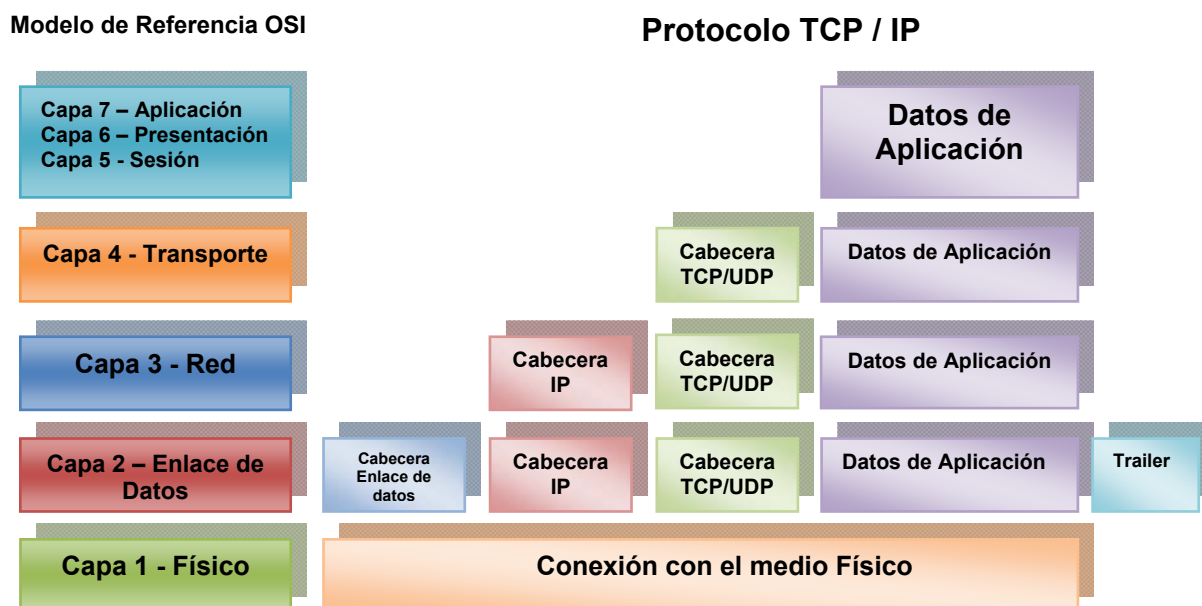


Figura 2.1. Modelos OSI y TCP/IP [1].

Los tres niveles superiores del modelo OSI (Aplicación, Presentación y Sesión) son considerados simplemente como el nivel de aplicación en el conjunto TCP/IP. Como TCP/IP no tiene un nivel de sesión unificado sobre el que los niveles superiores se sostengan, estas funciones son típicamente desempeñadas (o ignoradas) por las aplicaciones de usuario.

La suite de protocolos de TCP/IP no define un nivel físico, pero en su lugar define una serie de protocolos de resolución de direcciones que permite la localización de los niveles de red para operar con el nivel MAC soportado por una red particular.

Tanto los encabezados de TCP como de UDP incluyen puertos de origen (16 bits) y de destino (16 bits), los cuales identifican el proceso de aplicación que está siendo transportado.

### 2.2.2. Protocolo de Red (*Internet Protocol - IP*)

IP constituye un protocolo no orientado a la conexión para la comunicación a través de una red de paquetes conmutados. Aunque los paquetes se envían con información adicional para llevar a cabo funciones de seguridad mediante datos de *checksum* en el encabezado, no es garantía alguna de que los datos realmente lleguen a su destino. Por lo tanto, de ésta tarea se deben encargar los protocolos de las capas superiores.

IP es por excelencia el protocolo de red de Internet y de los sistemas IPTV, donde la IPv4 es la versión más usada. En el momento en que se despliega una red IPTV, se debe tener especial cuidado al escoger las direcciones IP multicast que se van a asignar a cada canal con el propósito de que éstas no se solapen al mapearse a la dirección MAC multicast.

### 2.2.3. Protocolos de Transporte

Los protocolos de transporte pertenecen a la capa 4 del modelo OSI, y tienen como función principal la transmisión entre origen y destino libre de errores. Los protocolos UDP y TCP se ocupan del multiplexado, control de errores o control de flujo. Inicialmente, multiplexan los flujos de datos de las diferentes aplicaciones corriendo en la misma máquina con la misma dirección IP, para luego realizar un control de paridad y así detectar los errores de bit, y en caso de existir error TCP/UDP descartan el paquete para que la capa superior (RTP) no lo reciba.

Los protocolos UDP y TCP proporcionan las funciones básicas de transporte, mientras que los protocolos RTP y RTCP (que se tratan más adelante) corren encima de estos. A continuación se hace una descripción de UDP y TCP.

### **2.2.3.1. User Datagram Protocol - UDP**

UDP es un protocolo de transporte de la pila de protocolos de TCP/IP que no está orientado a la conexión, proporcionando por lo tanto servicios del tipo “mejor esfuerzo” donde no se da garantía ante pérdidas o duplicación de paquetes. Igualmente cuenta con mecanismos de *checksum* de datos. Dado que UDP no asegura la entrega, el receptor debe confiar en la capa superior (RTP) para detectar las pérdidas de paquetes.

UDP se distingue por su simplicidad que reduce la cantidad de overhead y permite una rápida inicialización, por lo cual es tradicionalmente usado para el streaming de video en vivo y sistemas de videoconferencia o interactivos, en los que la retransmisión de paquetes se considera improductiva debido a que llegaría fuera de tiempo ante los requerimientos de tiempo real.

### **2.2.3.2. Transmission Control Protocol - TCP**

A diferencia de UDP, TCP es orientado a la conexión y utiliza mecanismos de retransmisión para recuperar los paquetes descartados, por lo cual este protocolo se considera de transmisión confiable, para lo cual también utiliza control de flujo para adaptar la tasa de transmisión de acuerdo al nivel de congestión de la red. En el caso de transmisión de stream, cuando se pierden paquetes la retransmisión aumenta el retardo y el consumo del ancho de banda provocando que se vacíe el buffer del reproductor (por ende la interrupción de la reproducción del stream) y perjudicando las aplicaciones que son en tiempo real.

En redes como Internet, en donde no existen mecanismos para asegurar la calidad de servicio, el streaming se hace sobre TCP debido a que la existencia de pérdidas esporádicas de paquetes altera la calidad percibida de forma mucho menos sensible en TCP que en UDP. Por el contrario, en redes IPTV donde existe calidad de servicio y no hay congestión, el mecanismo de streaming se basa en UDP, en el cual la detección y corrección de errores, secuencia de paquetes y otras acciones se le dejan a los niveles superiores. Además, UDP es más usado para streaming de video dado que las retransmisiones de TCP provocan demoras. Los paquetes de este protocolo van dentro de los paquetes del protocolo de red (IP).

### **2.2.4. Protocolo Para Multidifusión: Internet Group Management Protocol (IGMP)**

IGMP es un protocolo de nivel de red fundamental en el proceso de multicast dada la necesidad de utilizar la estrategia más eficiente para el envío de los mensajes sobre cada enlace de la red (para ahorrar ancho de banda), utilizando cada enlace a lo sumo una vez para cada paquete a ser difundido y creando copias cuando los enlaces en los destinos se dividen. IGMP maneja el proceso en el cual los suscriptores se asocian a un grupo multicast, lo que significa que permite el control de cualquier contenido que vaya a cualquier usuario y la cantidad de datos que se envíen a través de la red a cualquier hora. En un sistema IPTV, IGMP es el encargado de manejar los cambios de canal y su objetivo principal es permitir a los equipos terminales (“*host group*” o grupo de suscriptores que desean recibir un programa en particular) comunicarle al enrutador IP Multicast que quieren recibir cierto grupo de multicast a través de la red local o red de acceso; a su vez los enrutadores periódicamente preguntan cuales grupos siguen activos o no en cierto segmento de red. En IPv4 el rango de direcciones del grupo multicast va desde 224.0.0.0 a 239.255.255.255 [15], [19], [32], [35]. De manera más clara IGMP maneja cuatro funciones básicas que son:

- **JOIN:** un cliente (“*host*” IGMP o STB) indica que desea recibir información de un grupo multicast.
- **LEAVE:** un cliente indica que ya no desea seguir recibiendo información de un grupo multicast.
- **MEMBERSHIP REPORT:** un cliente informa a que grupos pertenece. Los mensajes de *Membership Report* se envían a todos los enrutadores con la dirección multicast de destino 224.0.0.2.
- **QUERY:** un enrutador IGMP puede preguntar a los clientes de cuales grupos son miembros, con el fin de verificar que grupos de multicast siguen activos y cuáles no (JOIN/LEAVE) o para verificar las condiciones de error. Si el mensaje es genérico, la dirección de grupo es 0.0.0.0. Si el mensaje es específico, se indica el grupo al cual se quiere hacer referencia. Cuando un enrutador recibe un mensaje *Leave* de un “*host*”, envía una petición de *Membership Report* específica para cerciorarse si hay otro “*host*” que aún continúe en ese grupo multicast. En caso de no haber respuesta, cuando el temporizador del enrutador expira deja de enviar tráfico a ese grupo.

En una red IPTV, cada canal de televisión broadcast es un grupo multicast IP. IGMP cuenta con tres versiones. La primera versión no se utiliza en IPTV porque no cuenta con la capacidad explícita de LEAVE, mientras que la versión 2 y 3 si pueden ser usadas para IPTV.

Con IGMPv2 el cliente puede especificar el grupo multicast al que desea unirse y recibir el tráfico con la dirección multicast especificada independientemente de quien este enviando el tráfico. Adicionalmente, esta versión implementa un mecanismo de supresión de reportes con el propósito de reducir el tráfico. La mayoría de clientes o STB de IPTV soportan IGMPv2.

IGMPv3 introduce una mejora en relación a la versión 2, enfocada en el soporte para Multidifusión de fuentes específicas (*Source Specific Multicast - SSM*), en donde los mensajes de los hosts para juntarse a un grupo no sólo especifican la dirección multicast de ese grupo sino también las fuentes de tráfico desde donde quieren recibir el tráfico, lo que permite enrutar multicast especificando la fuente, eliminando así el tráfico indeseado. IGMPv3 es compatible con la versión 2. .

## 2.2.5. Protocolos de Streaming

En las redes de IPTV se utiliza el conjunto de protocolos de tiempo real estandarizados por la IETF. A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos [1], [16], [32], [33].

### 2.2.5.1. Real-Time Transport Protocol (RTP)

Es un protocolo de transporte desarrollado para streaming, que cuenta con datos extras que no están en TCP, tales como marca de tiempo (*timestamp*) que permite la sincronización de paquetes y el cálculo del jitter, y número de secuencia (*sequence number*) que ayuda a detectar paquetes perdidos y a reordenarlos, lo que contribuye al transporte en forma continua. También hay datos de control que permite al servidor realizar el *streaming* a una tasa correcta, y además, el uso de RTP no implica una cantidad excesiva de overhead. No maneja la reservación de recursos ni garantiza la QoS para datos en tiempo real.

UDP utiliza RTP para suministrar el nivel de aplicación que identifique la carga útil que se está transportando y para proveer un número de secuencia para cada paquete.

### 2.2.5.2. Real Time Transport Control Protocol (RTCP)

Es usado en conjunto con RTP para la recepción de reportes estadísticos, además suministra información acerca de los participantes en una sesión en progreso y mecanismos para monitorear

la QoS. La información que suministra puede ser usada para determinar donde están los cuellos de botella cuando hay *multicasting*, facilitando el proceso de solución al problema. Permite por ejemplo: la detección de fallas en el árbol de distribución de multicast, número de paquetes perdidos y estadísticas de jitter. Existen reportes enviados por el emisor (que corresponden a acumulativos de tramas o cantidad de bytes) y reportes enviados por el receptor (tramas perdidas, tasa de tramas entregadas).

Una característica particular de éste protocolo es que para amortizar el overhead del encabezado se pueden reunir varios mensajes RTCP y enviarlos en un mensaje RTCP compuesto. Los paquetes RTCP se transportan sobre datagramas UDP.

RTCP no permite encriptación, autenticación y autorización. Una actualización con estas funcionalidades las posee el estándar *Secure Real-time Transport Protocol* (SRTCP).

### **2.2.5.3. Real-Time Streaming Protocol (RTSP)**

Realiza control sobre datos multimedia de tiempo real y brinda la posibilidad de interactividad con el reproductor al permitir: reproducir, pausar, adelantar y retroceder. También puede reaccionar a congestiones en la red y reducir el ancho de banda.

El RTSP fue inspirado en HTTP 1.1 pero con la mejoría de mantener el estado de la conexión (HTTP no mantiene estado) y que tanto cliente como servidor pueden realizar peticiones. Además soporta RTP como protocolo de transporte.

Una de sus utilidades es brindar una forma inicial de escoger el canal de distribución óptimo hacia el cliente. Por ejemplo algunos clientes pueden tener filtrados en su firewall los paquetes UDP por lo que el servidor de streaming debería proveer la posibilidad de escoger entre diferentes protocolos de transporte como UDP o TCP o UDP multicast.

### **2.2.5.4. MPEG Transport Stream (MPEG TS)**

MPEG TS es un protocolo que brinda un mecanismo para multiplexar (combinar) los streams de audio y video para transmitirlos por la red. Es muy utilizado en los sistemas de video digital de televisión por cable.

Un Flujo Elemental (*Elementary Stream* - ES) es básicamente la salida del codificador, existiendo ESs de dos tipos: los stream de video (VES) y los de audio (AES). Para manejar los diferentes ESs, se dividen en paquetes de diferente tamaño, según las características de la aplicación y del decodificador. Al proceso de partición en paquetes del ES se le llama Paquetización (*Packetized Elementary Streams* - PES), donde varios PES pueden ser transmitidos de forma conjunta en un mismo stream TS (proceso llamado multiplexación).

El MPEG-TS no brinda simplemente una forma adecuada de realizar la multiplexación de los diferentes ES, sino que también ataca el problema de recrear el reloj de la fuente en cada uno de los receptores, para lograr así una correcta decodificación y sincronismo del audio y del video.

## **2.3. Requerimientos de Calidad del Servicio (QoS)**

A lo largo de este estudio, se tratan todos los parámetros y aspectos de calidad del servicio y de la experiencia necesarios para desplegar una red IPTV [29], [32], [38]. Para tal propósito se deben tener en cuenta las 3 capas que se relacionan con la calidad: la capa de servicio, que está expuesta al usuario, y en donde se definen y miden las variables que contribuyen a una calidad de experiencia satisfactoria; la capa de aplicación, donde se configuran los diferentes parámetros de la aplicación (tipo de codificación, tasa de bits, etc.) requeridos para una calidad de experiencia satisfactoria; y la capa de transporte, donde se deben aplicar mecanismos de calidad de servicio y corrección de errores para ajustar los parámetros requeridos por el servicio.

En IPTV es esencial verificar y mantener la QoE, puesto que la red de acceso y transporte pueden cambiar dinámicamente su capacidad, sobre todo si transporta convergentemente múltiples servicios en una Red de Nueva Generación (*Next Generation Network - NGN*).

Algunos de los parámetros de calidad de servicio que se consideran en la red son: latencia, *jitter*, periodo de pérdida<sup>10</sup>, distancia de pérdida<sup>11</sup>, tasa promedio de pérdida de paquetes IP y tasa de bits constante (*Constant Bit Rate- CBR*). La tasa de bits constante es requerida por las diferentes aplicaciones individualmente, y en condiciones de concurrencia de tráfico según las condiciones de dimensionamiento. Todos los flujos multimedia se asumen CBR desde el punto de vista de la red del operador.

Las **Tablas 2.2 a 2.5** detallan de acuerdo a [29] los requerimientos para obtener una calidad de video adecuada en una red IP en función de la técnica de compresión de video y su respectivo ancho de banda, estos parámetros son aplicables a redes de acceso ópticas.

Tasa de bits de video stream (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Máxima duración de un solo error (ms)	Periodo de pérdida	Distancia de pérdida	Tasa promedio de pérdida de paquetes IP
3.0	<200	<50	<=16	6 paquetes IP	1 error por hora	<=5.85E-06
3.75	<200	<50	<=16	7 paquetes IP	1 error por hora	<=5.46E-06
5.0	<200	<50	<=16	9 paquetes IP	1 error por hora	<=5.26E-06

**Tabla 2.2. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios SDTV codificados con MPEG-2 [29].**

Tasa de bits de video stream (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Máxima duración de un solo error (ms)	Periodo de pérdida	Distancia de pérdida	Tasa promedio de pérdida de paquetes IP
1.75	<200	<50	<=16	4 paquetes IP	1 error por hora	<=6.68E-06
2.0	<200	<50	<=16	5 paquetes IP	1 error por hora	<=7.31E-06
2.5	<200	<50	<=16	5 paquetes IP	1 error por hora	<=5.85E-06
3.0	<200	<50	<=16	6 paquetes IP	1 error por hora	<=5.85E-06

**Tabla 2.3. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios SDTV codificados con MPEG-4 AVC o VC-1 [29].**

Tasa de bits de video stream (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Máxima duración de un solo error (ms)	Periodo de pérdida	Distancia de pérdida	Tasa promedio de pérdida de paquetes IP
15.0	<200	<50	<=16	24 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.17E-06
17	<200	<50	<=16	27 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.16E-06
18.1	<200	<50	<=16	29 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.17E-06

**Tabla 2.4. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios HDTV codificados con MPEG-2 [29].**

Tasa de bits de video stream (Mbps)	Latencia (ms)	Jitter (ms)	Máxima duración de un solo error (ms)	Periodo de pérdida	Distancia de pérdida	Tasa promedio de pérdida de paquetes IP
8	<200	<50	<=16	14 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.28E-06
10	<200	<50	<=16	17 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.24E-06
12	<200	<50	<=16	20 paquetes IP	1 error por cada 4 horas	<=1.22E-06

**Tabla 2.5. Recomendaciones mínimas de los parámetros en el nivel de transporte para satisfacer la QoE en servicios HDTV codificados con MPEG-4 AVC o VC-1 [29].**

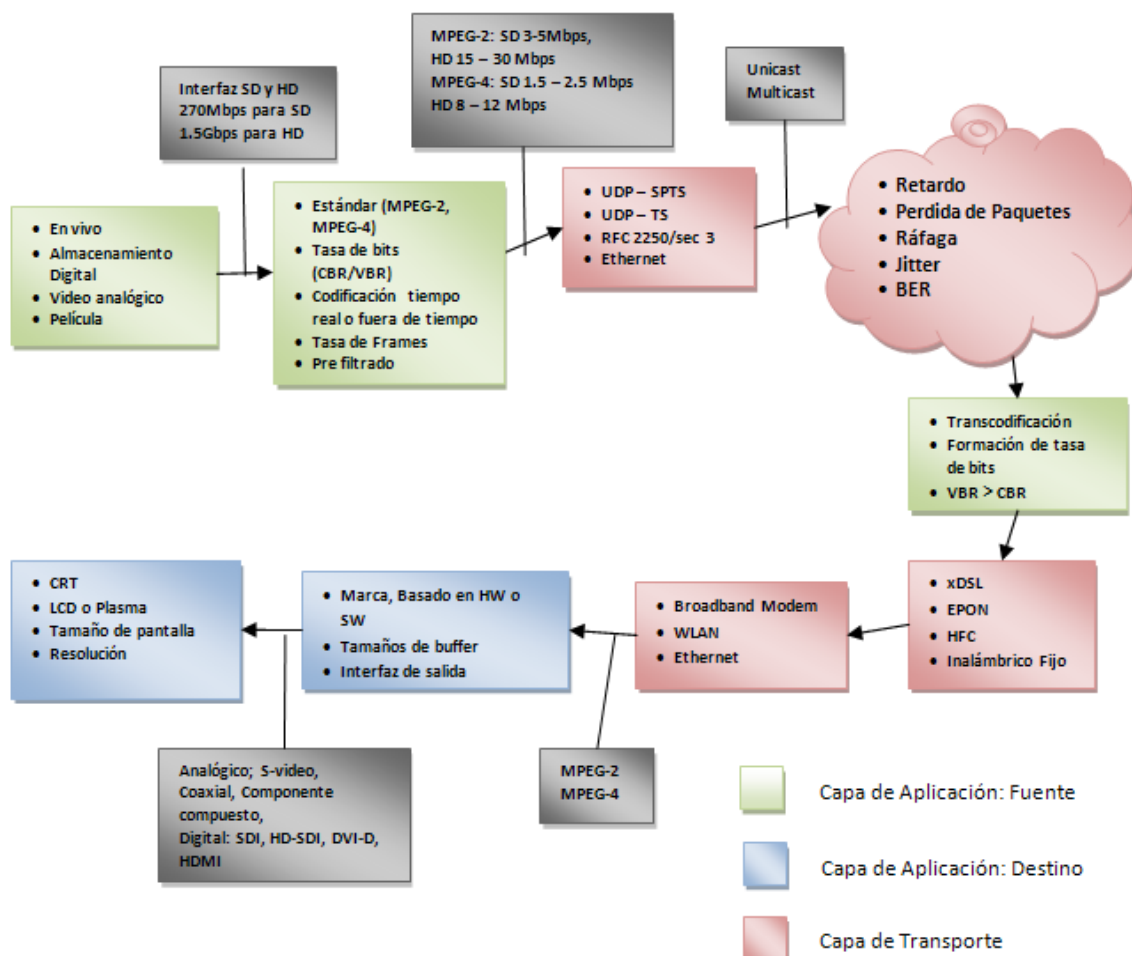
<sup>10</sup> Hace referencia a la duración de una pérdida o evento de error y al número de paquetes que se pierden en esta duración.

<sup>11</sup> Es básicamente una medida del espaciamiento entre pérdidas de paquetes de red consecutivos o eventos de error.



Los elementos de la solución de IPTV deben gestionar la distribución de los contenidos multimedia de modo unicast o multicast requeridos por la misma, ya que la red del operador simplemente transporta los distintos flujos de información entre la cabecera y los STB.

La **Figura 2.2** muestra un diagrama genérico de alto nivel para la distribución de video de extremo a extremo [38].



**Figura 2.2. Diagrama de distribución de video [38].**

Los recuadros verdes (adquisición de video y codificación) y azules (decodificación y despliegue en pantalla) muestran los factores que influyen en la Capa de Aplicación. Los cuadros rojos (paquetización y transporte) muestran los elementos que influyen en la capa de transporte.

### 2.3.1. Parámetros en la Capa de Servicio

A nivel de capa de servicio se cuenta con dos formas de medir la calidad del video: la forma subjetiva, con el método MOS (*Mean Opinion Score*), y la forma objetiva, basado en modelos que simulan la visión humana (*Video Quality Experts Group – VQEG*).

En base a la categorización de las aplicaciones de la ITU-T, en esta capa se recomiendan los retardos máximos que se muestran en la **Tabla 2.6**. Para cumplir con los mismos se deben ajustar varios parámetros en las capas de aplicación y transporte.

Acciones de Usuario	Funcionalidades	Tipo	Retardo máximo admitido
<b>Interfaz con el sistema</b>	Navegación en el EPG Acción de controles de VoD (Pause, FFWD, RWD, etc.)	Interactiva	200 ms
<b>Cambio de canal</b>	Tiempo desde que se da la orden al control remoto hasta que se recibe en el TV el canal solicitado en forma estable	Respuesta	2s
<b>Tiempo de inicio</b>	Tiempo desde que se enciende el STB hasta que se encuentran disponibles los canales	Temporal	10s

Tabla 2.6. Retardos máximos según la categorización de la acción del usuario [29].

### 2.3.2. Parámetros en la Capa de Aplicación.

Existen varios parámetros que afectan a la calidad tanto a nivel de plano de control como de plano de datos de la capa de aplicación.

#### 2.3.2.1. Plano de control

- **Velocidad de cambio de canal en señales de difusión (BTV) y para Control de VoD.**
  - Tiempo de procesamiento de comandos en el STB (tiempo entre el cual se aprieta la tecla del control remoto y se envían efectivamente los mensajes, ya sean mensajes para unirse/salir de IGMP a la red en el caso de BTV, o mensajes del control de RTSP a la red y servidores de video en el caso de VoD).
  - Tiempo de procesamiento de los paquetes IP recibidos por el STB hasta que se los envía al decodificador MPEG, incluyendo tiempos de procesamiento por descrición o acceso condicional.
  - Para el caso de VoD, el tiempo de procesamiento de los comandos RTSP y el tiempo de generación de la señal requerida (adelantar o atrasar la señal de video).
  - Retardo que existe entre que el buffer de jitter del STB se completa hasta que se envía la señal para decodificación.
  - Retardo de decodificación de MPEG.
- **Tiempo de inicialización del sistema**, incluyendo el tiempo de inicialización del STB, del *Middleware*, tiempo de autenticación, y cualquier otro tiempo asociado a una actualización de *firmware*, *software* y otros.
- **Respuesta de la interfaz de navegación de la guía EPG.** Tiempo requerido para actualizar en la pantalla la información de la tecla que se presionó.

#### 2.3.2.2. Plano de datos

Los aspectos más relevantes relacionados con la compresión que inciden en la calidad son:

- **Calidad del material de origen**, ya que las técnicas de compresión introducen pérdidas de información, por lo cual no es posible recuperar una copia idéntica a la original luego del proceso de compresión.
- **Estándar de codificación utilizado** (MPEG-2, MPEG-4, SMPTE VC-1).
- **Tasa de bits.** Las señales de tasa de bits variable (VBR) tienen una calidad constante ya que la tasa de bits puede variar para acompañar la variación en la complejidad de la señal de origen. Sin embargo, los proveedores de telecomunicaciones utilizan señales de tasa de bits constante (CBR) para simplificar la ingeniería y el diseño de red. Las señales CBR tienen calidad variable ya que muchas veces la tasa de bit es insuficiente para acomodar la complejidad de la señal de video.

- **Estructura de los grupos de imagen (Group of Picture – GOP).** El GOP indica la distancia entre cuadros I, los cuales no necesitan de otro cuadro de referencia para reconstruir la imagen. Los grupos de imagen más cortos mejoran la calidad (asociada a un menor tiempo de cambio de canal) pero permiten una compresión menor y por lo tanto requieren una tasa de bits mayor. Los grupos de imagen más largos mejoran la compresión pero aumentan el tiempo de cambio de canal (ya que hay que esperar más tiempo por los cuadros I) y además las pérdidas de paquetes producen pérdidas de señal por mayor tiempo. Existen mecanismos dinámicos de grupos de imagen pero no son siempre soportados o bien implementados.
- **Rango de búsqueda de vectores de movimiento (Motion Vector Search Range).** Las búsquedas más amplias mejoran la calidad pero agregan complejidad a la codificación e introducen más retardos. En los casos de señales con contenidos de gran movilidad (ej. deportes) necesariamente se requieren rangos de búsqueda más amplios.

Las **Tablas 2.7 y 2.8** detallan las tasas de bits mínimas para diferentes señales de video según el estándar de codificación utilizado.

Tipo de señal	MPEG-2 (MP@ML)	MPEG-4 (MP@L3)
Broadcast - SD	2.5 Mbps	1.75 Mbps
VoD y Premium - SD	3.18 Mbps	2.1 Mbps

**Tabla 2.7. Tasa de bit mínima para señal de video SD con tasa de bits constante (CBR) [29].**

Tipo de señal	MPEG-2 (MP@HL)	MPEG-4 (MP@L4)
Broadcast - HD	15 Mbps	10 Mbps

**Tabla 2.8. Tasa de bit mínima para señal de video HD con tasa de bits constante (CBR) [29].**

La **Tabla 2.9** muestra las tasas de bits mínimas para señales de audio según el estándar de codificación utilizado.

Tipo de señal	MPEG Layer II	Dolby Digital	AAC	MP3
Estéreo - SD y HD	128 kbps	128 kbps	96 kbps	128 kbps
5.1 - SD y HD	-	384 kbps	-	-
5.1 – VoD y Premium SD	-	384 kbps	-	-

**Tabla 2.9. Tasa de bit mínima para señal de audio en SD, VoD y Premium SD, y HD [29].**

Teniendo en cuenta que la sincronización entre la imagen de video y el audio es fundamental, los desfases máximos aceptables son:

- El audio puede adelantarse a la señal de video en 15 ms máximo.
- La señal de video puede adelantarse a la señal de audio en 45 ms máximo.

La sincronización puede ser controlada solamente a nivel de capa de aplicación y no de capa de transporte.

### 2.3.3. Parámetros en la capa de Transporte

Se deben tener en cuenta los parámetros que afectan a la calidad tanto a nivel de plano de control como de plano de datos.

#### 2.3.3.1. Plano de control

Está relacionado con los siguientes aspectos:

- Tiempo de procesamiento de IGMP en los nodos de acceso y nodos de agregación.
- Encolamiento de la señal de bajada de video.

- Proceso de entrelazado en la línea.
- Tiempo que se demora en recibir el primer cuadro I, lo cual depende del largo del GOP.

### 2.3.3.2. Plano de datos

Los parámetros a tener en cuenta son:

**Retardo o latencia:** es el tiempo que tarda un paquete en ir de un extremo al otro de la red. Tiene varias componentes: el retardo de codificación (que depende del estándar utilizado), el retardo de serialización (el cual depende de las interfaces de los equipos, siendo menor este retardo cuanto mayor sea la velocidad de la interfaz), el retardo de propagación (que depende del medio físico que se utilice y la distancia recorrida), el retardo de encolamiento o *buffering* (es el tiempo que un paquete está en una cola esperando a ser transmitido) y retardos de conmutación o *switching* (es el tiempo que demora un switch o un enrutador en poner los paquetes en una cola y decidir por cual interface se los va a transmitir).

**Jitter o variación del retardo:** es uno de los principales problemas en la entrega de video en tiempo real sobre una red IP, y consiste en la medida de tiempo entre el momento en que se espera que un paquete llegue y efectivamente llega, o dicho de otra forma es la variación o diferencia de retardo entre paquetes. Ya que cada paquete se almacena en buffers en la red y durante diferente tiempo (a causa de la carga de la red en los diferentes nodos), algunos paquetes se atrasan más que otros. En general el *jitter* es compensado a nivel del STB almacenando cierta cantidad de paquetes en un *buffer* (denominada *jitter buffer*) y sacando posteriormente los paquetes a una tasa constante. El retardo entre paquetes aparece aleatoriamente en un rango de 0 a 0.002 segundos.

El retardo y el jitter máximo soportado en la red de transporte dependen del buffer del STB, el cual en general puede almacenar entre 100 y 500 ms de video, por lo que teóricamente los parámetros de la red deberían poder variar en ese rango, pero no es deseable tener mucho almacenamiento en el STB porque esto aumenta el tiempo de cambio de canal. Los valores recomendados de extremo a extremo (o sea desde la cabecera al STB) son: retardo menor a 200 ms y *jitter* menor a 50 ms.

**Pérdida de paquetes:** aunque no es deseable es inevitable debido a la dificultad en predecir el tráfico, tal como en los casos de congestión donde los *switches* y enrutadores deban descartar paquetes por desborde de sus *buffers*. En aplicaciones que no son en tiempo real, que usan TCP son más tolerantes a la pérdida de paquetes por contar con capacidad de retransmisión, pero las aplicaciones en tiempo real, basadas en UDP y RTP son más sensibles a la pérdida de paquetes por no contar con facilidades de retransmisión (ya que no sería útil porque el paquete retransmitido llegaría demasiado tarde) y al aumentar el número de usuarios también aumenta la probabilidad de pérdida de paquetes. Es importante que los paquetes de señalización y control no se pierdan, por lo que se deben configurar parámetros de calidad de servicio para priorizar algunos paquetes que aseguren su transmisión en caso de congestión.

La señal de video es muy sensible a la pérdida de paquetes, dependiendo además del tipo de datos que se pierden. Por ejemplo la pérdida de un cuadro I o un cuadro P produce una pérdida de calidad de imagen mayor y por mayor tiempo que la pérdida de un cuadro B.

Los efectos de la pérdida de paquetes pueden ser compensados con diferentes mecanismos a nivel del STB. Para minimizar los efectos de las pérdidas de paquetes se recomienda enviar los paquetes corruptos a la capa de procesamiento de MPEG ya que esto es mejor que descartar los paquetes.

### 2.3.4. Calidad en la Integración.

La calidad en la integración se refiere al desempeño del sistema evaluado desde el punto de vista de los suscriptores y tomando en cuenta las condiciones de funcionamiento a nivel del servicio de extremo a extremo. Mientras no se definan estándares de aplicación general de IPTV, los proyectos sobre el mismo se desarrollan integrando varias tecnologías de carácter propietario, siendo de gran importancia para un servicio de este tipo la integración para las plataformas de servicio de IPTV, y cuyo funcionamiento se debe controlar independientemente de la calidad de los contenidos que la solución distribuya en su fase de producción, y de las características de la TV del suscriptor. Los contenidos, en lo posible, deben ser diseñados para verificar el desempeño y calidad requerida de extremo a extremo de una solución de IPTV y de todos sus servicios, excluyendo las fuentes de contenido que alimentan a la red en su fase comercial.

La **Figura 2.3** corresponde a una clasificación del retardo realizada por la ITU-T G.1010. Para servicios de tipo interactivo que deberían ser percibidas por los usuarios como “instantáneos”, el retardo debe ser muy inferior a un segundo. El estudio de cierto número de factores humanos ha demostrado que para que una acción se perciba como instantánea debe recibirse alguna realimentación entre los 50 y 200 ms. El *zapping* (cambio de canal) generalmente es asumido como una acción de tipo “respuesta” por lo que puede soportar retardos de hasta 2 segundos.

<b>Tolerancia de error</b>	<b>Voz / Video Conferencia</b>	<b>Voz / Video Mensaje</b>	<b>Audio y video Streaming</b>	<b>Fax</b>
<b>Intolerancia de error</b>	Control / Comandos (Telnet, Juegos Interactivos)	Transacciones (Comercio, acceso email, Búsqueda WWW)	Mensajería / Descargas (FTP, imágenes)	Tráfico de fondo (Background)
	Interactivo Retardo << 1seg	Respuestas Retardo ~2seg	Puntual Retardo ~10seg	No-crítico Retardo >> 10seg

**Figura 2.3. Clasificación de los retardos en las diferentes aplicaciones según la ITU G.1010 [29].**

En una red IPTV es necesario contar con señales patrón que permitan verificar la calidad de los transcodificadores de video, y la calidad de la señal de video generada por los STB. La calidad de la imagen obtenida en los STB, considerando el uso de contenidos adecuados, debe ser al menos comparable con la que se obtiene de un reproductor de DVD comercial de gama media en caso de SDTV, y no debe haber efectos que deterioren la señal visualizada si la red proporciona la calidad de servicio requerida en su diseño. Así mismo, la sincronización del audio con el video resulta fundamental (de acuerdo a las recomendaciones mencionadas anteriormente), y el sistema debe ser capaz de reproducir audio de alta calidad (con calidad comparable a un disco compacto).

## 2.4. Protocolo de Control Punto a Multi Punto (*Multi point Control Protocol - MPCP*)

Este protocolo, definido en el estándar IEEE 802.3ah, se encarga del control de las transmisiones en sentido *upstream* y está implementado en la subcapa de control MAC de la arquitectura EPON, este protocolo se encarga de detener la transmisión de datos hasta que la ONT reciba el mensaje de control que le permita utilizar el medio de transmisión, momento en el cual dispone de un determinado tiempo para realizar la transmisión de los datos, esto con el fin de evitar colisiones en la OLT [28]. El protocolo MPCP tiene dos modos de operación:

- **Modo de asignación de ancho de banda:** Se utiliza para garantizar un determinado tiempo a cada ONT para su comunicación con la OLT. En este modo se realiza la transmisión *upstream*.
- **Modo de auto descubrimiento:** Se utiliza para descubrir nuevos ONT conectados a la red EPON, este modo es iniciado por la OLT periódicamente.

El funcionamiento de los modos de asignación de ancho de banda y de descubrimiento de EPON se extrae de [25], [27], [28], [38].

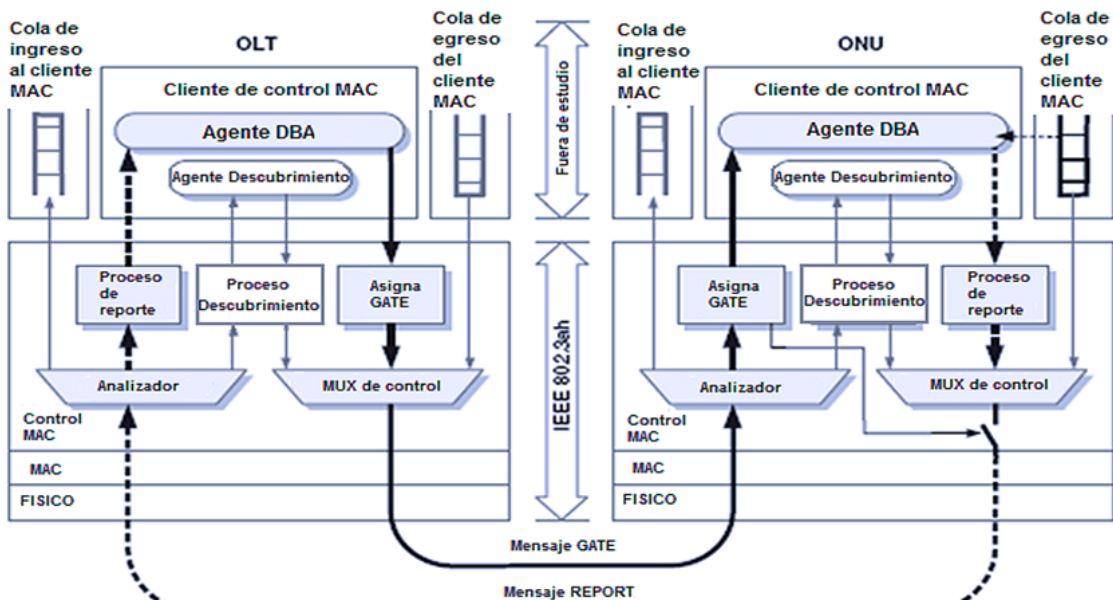
#### 2.4.1. Modo de asignación de ancho de banda

Este mecanismo se basa en mensajes Conceder (*Grant*) y Pedir (*Request*) conocidos como GATE y REPORT respectivamente, que son tramas de control MAC.

Un mensaje GATE se envía desde el OLT a cada ONT y se usa para asignar un determinado espacio de tiempo (*timeslot*) para la transmisión de datos de dicho ONT. El *timeslot* está determinado por los valores {Tiempo-Inicio, Longitud} que son asignados por el Agente de Asignación de Ancho de Banda Dinámico (*Dynamic Bandwidth Assignment Agent - DBA*) o por el planificador (*scheduler*), localizado en el cliente de control MAC, que se encuentra fuera del dominio de 802.3ah.

Los valores Tiempo-Inicio y Longitud, del mensaje GATE, son analizados por el ONT que mediante su modulo planificador asigna el orden de las tramas que serán enviadas y la duración de la transmisión, para acomodarse a la ventana de tiempo asignada por el OLT.

El mensaje REPORT es un mensaje de retroalimentación, que indica al OLT el tamaño del buffer de transmisión del ONT para que este asigne determinado *timeslot* en la siguiente transmisión basándose en las peticiones de los diferentes ONT's en la red. Este mensaje es iniciado en el agente DBA y solo puede ser enviado en un timeslot pre asignado. Los mensajes REPORT son analizados por el agente DBA del OLT, quien asigna los timeslots en la siguiente transmisión de mensajes GATE. El proceso esta detallado en la **Figura 2.4**, el formato de las tramas GATE y REPORT se muestra en la **Figura 2.5**.



**Figura 2.4.** Proceso de asignación de ancho de banda en MPCP [25].

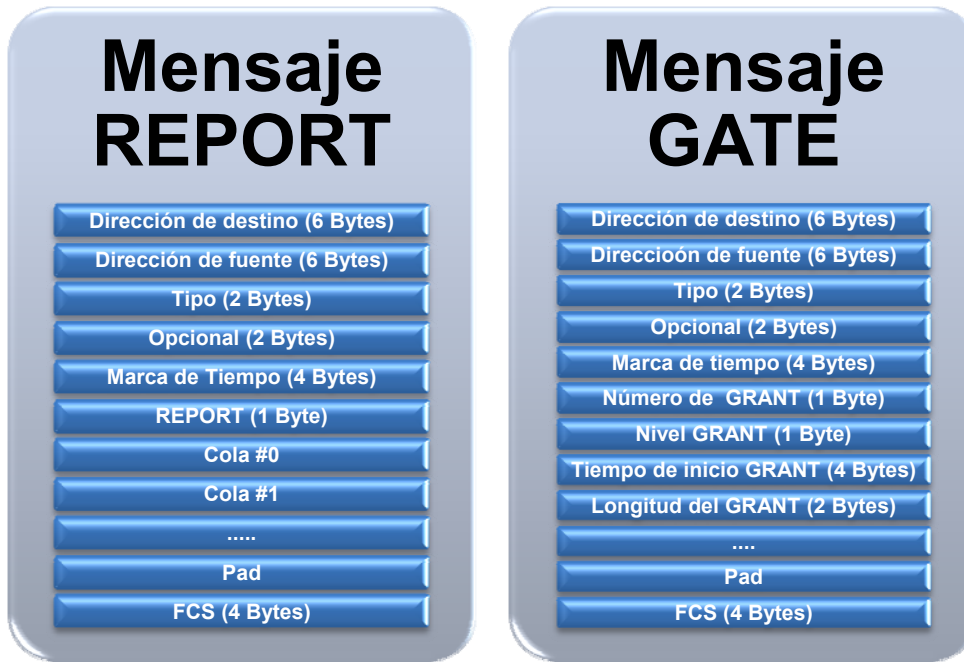


Figura 2.5. GATE y REPORT en MPCP [38].

Para hacer más eficiente la red, se asigna el ancho de banda de forma “pipelined” que consiste en enviar los mensajes GATE justo antes que el mensaje proveniente de la ONT comience a ser transmitido, de esta manera se previenen colisiones y se evita pérdidas de tiempo mientras el mensaje GATE llega a las ONT’s, este proceso se detalla en la **Figura 2.6**, para realizar esto es necesario conocer el tiempo de viaje de cada ONT, proceso que se realiza en el modo de auto descubrimiento de MPCP.

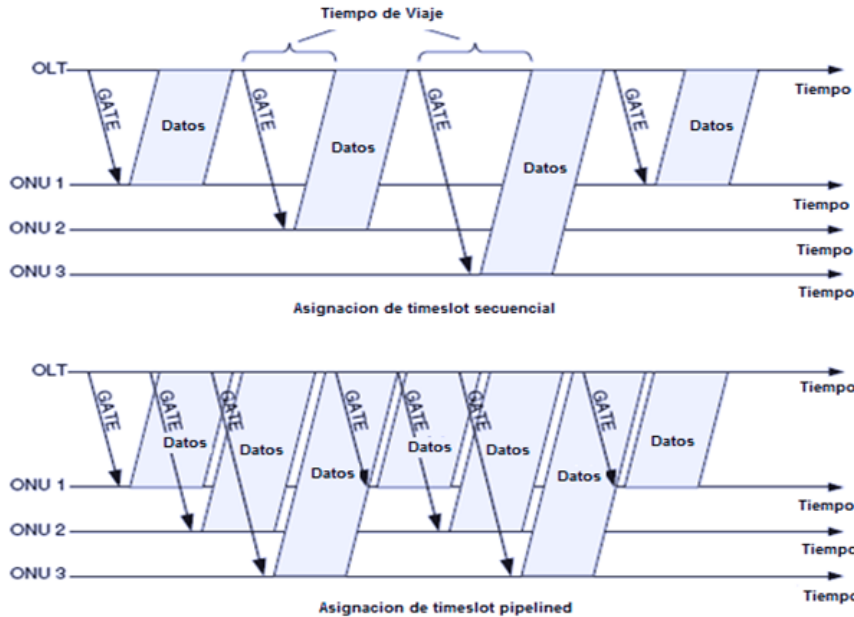


Figura 2.6. Asignación secuencial Vs Asignación Dinámica [25].

### 2.4.2. Modo Auto descubrimiento

Este modo es usado para detectar ONTs que se han conectado recientemente a la red EPON y calcular su tiempo de viaje. Este proceso es controlado por el Agente de Descubrimiento tanto en

el OLT como en el ONT y utiliza cuatro mensajes MPCP: GATE, REGISTER\_REQ, REGISTER, y REGISTER\_ACK.

Como se puede ver en la **Figura 2.7**, el proceso de descubrimiento consta de 4 pasos, así:

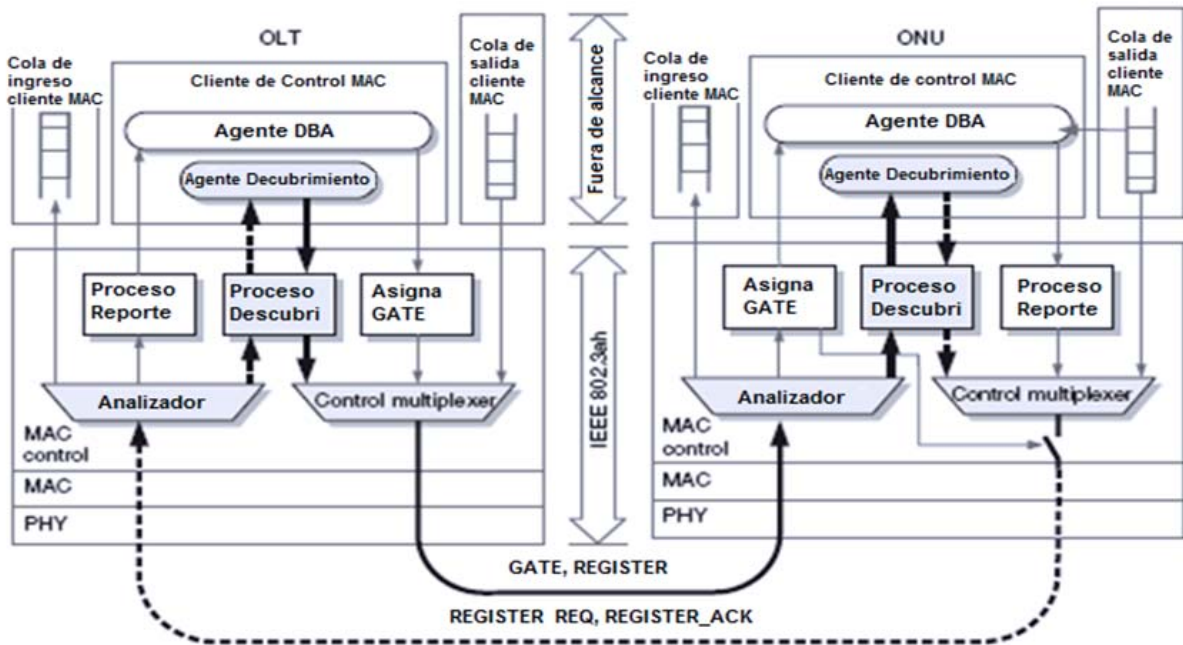
**Paso 1:** El agente de descubrimiento en el OLT inicia una ronda de descubrimiento y reserva una ventana de descubrimiento. Se envía hacia los ONT un mensaje GATE especial llamado *discovery* GATE

**Paso 2:** Solo las ONT sin inicializar pueden responder al mensaje *discovery* GATE. A partir del momento indicado por el Tiempo-Inicio el ONT espera un tiempo aleatorio (para evitar colisiones con otras ONT no inicializadas) después del cual envía un mensaje REGISTER\_REQ (Dirección MAC, Tiempo local) con el cual la OLT reconoce la nueva ONT y se calcula el tiempo de viaje, como se explica en la **Figura 2.15**, que es igual a:

$$RTT = T_{downstream} + T_{upstream} = T_{respuesta} - T_{espera} = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0) = t_2 - t_1$$

**Paso 3:** Después de analizar y verificar el mensaje REGISTER\_REQ el OLT envía el mensaje REGISTER hacia la nueva ONT, este mensaje contiene el LLID, seguidamente el OLT envía un mensaje GATE normal a la misma ONT.

**Paso 4:** Después de recibir el REGISTER y el GATE la ONT envía el mensaje REGISTER\_ACK (en el intervalo GATE asignado en el paso 3), dando a conocer a la OLT que el proceso de registro fue exitoso.



**Figura 2.7. Proceso de autodescubrimiento en MPCP [25].**



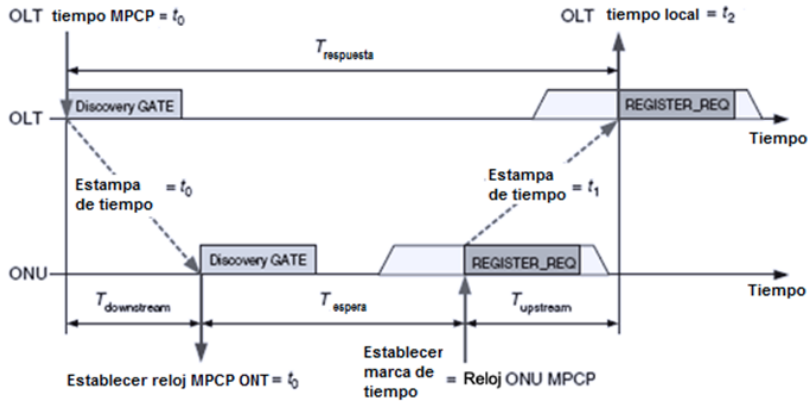


Figura 2.8. Medición del tiempo de viaje [27].

Los mensajes REGISTER\_REQ pueden colisionar si varias ONT no inicializadas tratan de conectarse al mismo tiempo, si esto sucede la ONT debe esperar a la próxima ventana de descubrimiento para tratar de inicializarse. La Figura 2.9, muestra el proceso de descubrimiento y la presencia de una colisión.

Los componentes ópticos en la red EPON deben ser capaces de operar en modo ráfaga (burst), esto significa que el láser de transmisión en la ONT debe ser encendido y apagado rápidamente mientras la ventana de transmisión está abierta y que el receptor en el OLT debe ser capaz de detectar y decodificar las señales de las ONT que tienen diferentes potencias debido a la variación en la distancia a la cual están ubicadas.

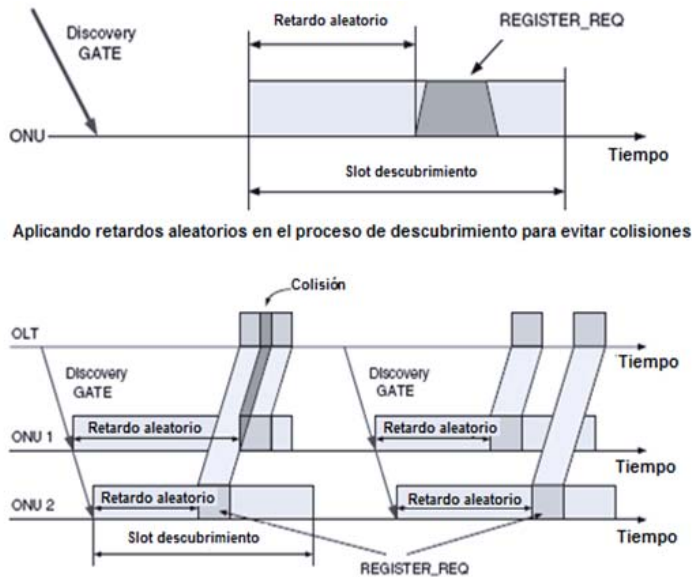


Figura 2.9. Proceso de descubrimiento y presencia de una colisión [25].

## 2.5. Función de Control del Láser en EPON

Aún en ausencia de transmisión de datos, los láseres generan ruido espontáneo. Este ruido acumulado con el generado por las demás ONT que no transmiten, puede perjudicar la señal de la ONT que este transmitiendo en ese momento, es por esto que el láser debe ser apagado entre transmisiones. Esta función fue delegada a la capa PCS del protocolo EPON, la cual monitorea los datos y decide cuando encender o apagar el láser, esta función se denomina Detector de datos.

### 2.5.1. Detector de datos

El detector de datos está localizado después de la codificación 8b/10b, por lo tanto opera sobre datagramas de 10bits y es en esencia, una cola FIFO que impone un atraso de tiempo constante a todos los datagramas que pasan por la capa PCS. El propósito de crear esta línea de retraso es la de darle a la capa física suficiente tiempo para encender el láser y generar la secuencia de sincronización, antes de transmitir los datos. La secuencia de sincronización consiste en un código requerido por el receptor para ajustar la ganancia del receptor óptico o Intervalo de Control Automático de Ganancia (*Automatic Gain Control - AGC*) y sincronizar el reloj o Intervalo de recuperación de reloj y datos (*Clock and Data Recovery - CDR*). El tiempo de encendido del láser es de 512ns mientras que el tiempo de AGC debe ser menor que 412ns [25]. El funcionamiento del detector de datos se detalla en la **Figura 2.10**.

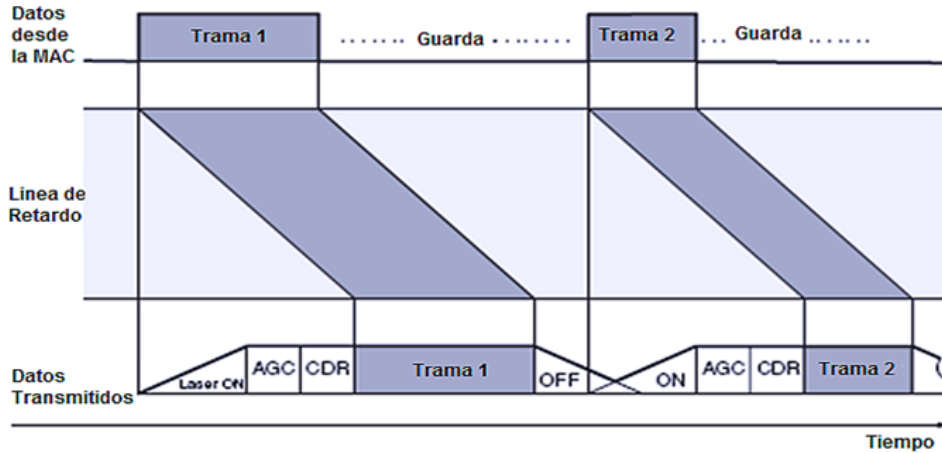


Figura 2.10. Funcionamiento del control de láser [25].

## 2.6. Métodos de asignación de ancho de banda en redes EPON

### 2.6.1. Asignación Estática de Ancho de Banda

La asignación estática de ancho de banda (*Static Bandwidth Assignment - SBA*), garantiza una ventana de transmisión de datos fija a cada ONT en la red en cada ciclo de servicio, este tipo de asignación trabaja como el Acceso Múltiple por División de Tiempo (*Time Division Multiple Access - TDMA*), donde cada intervalo de transmisión es fijo y no se tiene en cuenta el tráfico de la red. Este método es fácil de implementar pero no es eficiente, ya que una ONT tiene un intervalo de transmisión así no tenga datos para transmitir, desperdiciando el medio de transmisión. En la **Figura 2.11**, se detalla este caso [40].

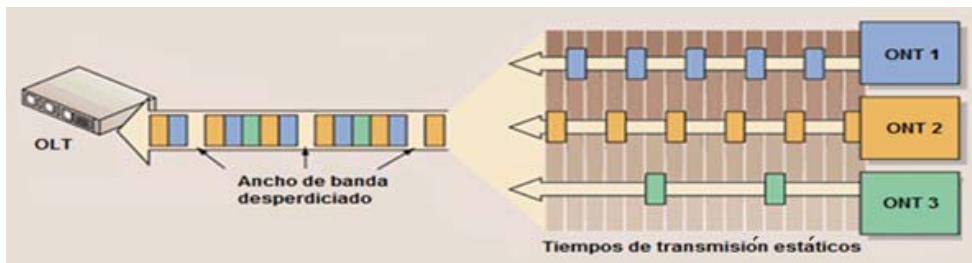


Figura 2.11. Asignación estática de ancho de banda [40].

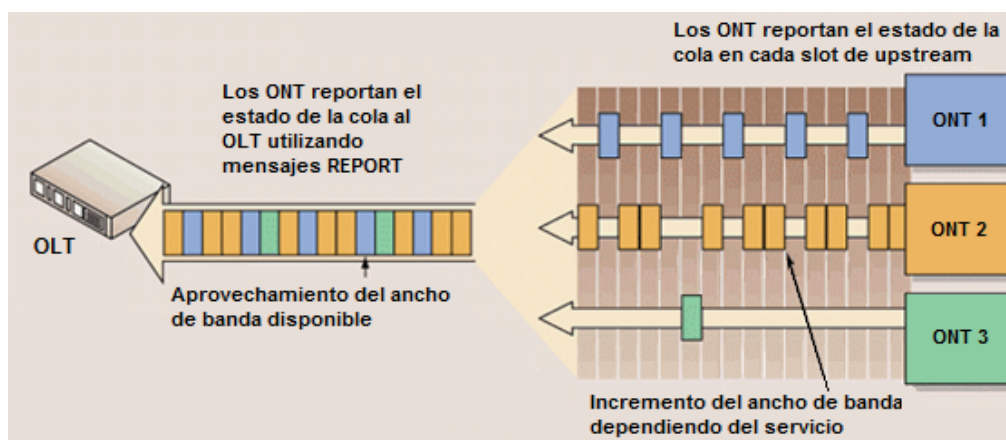
## 2.6.2. Asignación Dinámica de ancho de banda

La Asignación dinámica de ancho de banda (DBA), es una técnica en la cual el ancho de banda en un medio de transmisión compartido, es asignado bajo demanda y con justicia entre todos los usuarios del medio. También es conocido como multiplexación estadística o gestión de ancho de banda y funciona adaptando la capacidad del medio de transmisión a los requerimientos de tráfico instantáneo de los diferentes usuarios conectados [25].

DBA toma ventaja de los siguientes atributos de las redes con medio de transmisión compartido:

- No todos los usuarios están conectados todo el tiempo a la red.
- Si estuvieran todos conectados, no todos transmitirían la misma cantidad de datos a la vez.
- La mayor parte del tráfico es en ráfagas y las ventanas de transmisión entre dichas ráfagas pueden ser utilizados para transmisiones de otros usuarios.

La **Figura 2.12**, explica la forma de trabajo de DBA.



**Figura 2.12. Funcionamiento de DBA [40].**

Con DBA los proveedores pueden ofrecer integración de servicios, que combinan tráfico sensible al tiempo como voz y video con tráfico asíncrono como los datos, bajo la misma infraestructura de red. También permite a los operadores flexibilizar la oferta de servicios e implementar diferentes acuerdos de nivel de servicio (SLA).

Existen diferentes métodos de asignación de ancho de banda dinámico pero los más importantes son IPACT y BGP.

### 2.6.2.1. IPACT - Sondeo Intercalado con ciclo de tiempo adaptativo (Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time)

Es un algoritmo diseñado especialmente para redes EPON que utiliza los mensajes GATE y REPORT del protocolo MPCP para asignar el ancho de banda a los diferentes ONT de la red. Si el OLT asigna un ancho de banda a cierto ONT y espera hasta que la transmisión de este termine para enviar el GATE del siguiente ONT, todo el tiempo de viaje (RTT) del mensaje se desperdicia. IPACT elimina este tiempo de espera enviando el mensaje GATE al siguiente ONT mientras recibe el mensaje del ONT que está transmitiendo, esto se hace calculando el tiempo en el cual las comunicaciones con el ONT que transmite terminarían [40].

### 2.6.2.2. BGP - Sondeo de ancho de banda garantizado (*Bandwidth Guaranteed Polling*)

Es un algoritmo desarrollado en la Universidad de Singapur, el cual divide la ventana de transmisión en intervalos de tamaño fijo, los cuales se asignan a cada ONT, dependiendo del SLA. Si un ONT no utiliza todo el intervalo asignado le informa al OLT, quien decide a que ONT asignarle esta ventana de transmisión dependiendo de la carga de tráfico que tenga. Este protocolo no es del todo compatible con MPCP [41].

En las redes EPON se utiliza IPACT, ya que es compatible con MPCP, está más desarrollado y ofrece mejor rendimiento.

## 2.7. Eficiencia en redes EPON

La eficiencia puede ser tomada como el rendimiento (*throughput*) que tiene la red, es decir, que tantos datos de nivel de aplicación puede transportar la red en determinado tiempo. En redes EPON esto se mide calculando los componentes de overhead que se le añaden a la transmisión, los cuales se dividen en encapsulamiento y planificadores [42].

### 2.7.1. Overhead de encapsulamiento

Resulta de la adición de 8 bytes de preámbulo, 14 bytes de encabezado Ethernet, 4 bytes del campo FCS a las tramas provenientes de la capa MAC. Adicionalmente, al menos 12 bytes de guarda entre tramas (*Inter Frame Gap* - IFG), los cuales deben ser colocados entre dos tramas adyacentes, por lo tanto el overhead absoluto debido a encapsulamiento es de 38 bytes constantes o 7.42% [28].

### 2.7.2. Overhead de planificadores

Está conformado por el overhead de mensajes de control, de bandas de guarda, de descubrimiento y de delimitación de trama.

El overhead relacionado con los mensajes de control, representa el ancho de banda utilizado en el envío de mensajes GATE y REPORT, la cantidad de overhead depende del número de ONT's y del tiempo de ciclo de transmisión. La **Tabla 2.10** muestra el porcentaje de overhead para 16 y 32 usuarios, con ciclos de transmisión de 1ms y 750us, estos valores se cumplen tanto para upstream como para downstream.

Número de ONT's	Ciclo de 1ms	Ciclo de 750us
16	1.08%	1.43%
32	2.15%	2.87%

Tabla 2.10. Overhead de control [42].

El overhead concerniente con las bandas de guarda depende de parámetros como el tiempo de encendido y apagado del láser, el tiempo de control automático de ganancia y el tiempo de recuperación de reloj y datos. Los valores de AGC pueden ser cuatro: 96ns, 192ns, 288ns o 400ns, el tiempo de encendido y apagado de láser es de 512ns, adicionalmente se tiene una zona muerta de mínimo 128ns, como se muestra en la **Figura 2.13**.

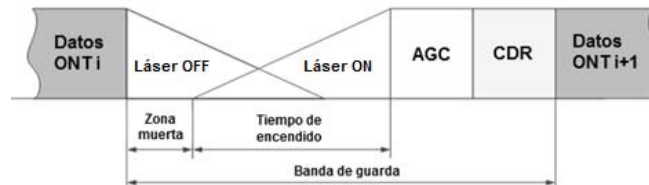


Figura 2.13. Estructura de las bandas de guarda [42].

La **Tabla 2.11** muestra el overhead relacionado con los tiempos de guarda para diferentes configuraciones de parámetros.

Parámetros	Ciclo de 1ms	Ciclo de 750µs
<b>16ONT</b> AGC = 400ns CDR = 400ns	1.33%	1.77%
<b>16ONT</b> AGC = 96ns CDR = 96ns	2.30%	3.07%
<b>32ONT</b> AGC = 96ns CDR = 96ns	2.66%	3.55%
<b>32ONT</b> AGC = 400ns CDR = 400ns	4.61%	6.14%

**Tabla 2.11. Overhead por bandas de guarda [42].**

El overhead de descubrimiento está relacionado con el proceso de descubrimiento de nuevos ONT's conectados en la red. La ventana de descubrimiento debe ser tan grande como el tiempo de viaje más grande (300us), la frecuencia con la cual el OLT envía tramas de descubrimiento puede ser muy grande, del orden de 1 segundo, por ende el overhead no es mayor de 0.03% [25].

El overhead por delineación de trama se debe al hecho de que los paquetes de longitud variable, no siempre llenaran por completo el ciclo de transmisión asignado, por lo tanto se añade un overhead de ancho de banda inutilizado con los porcentajes de la **Tabla 2.12**.

Ciclo 1 ms	Ciclo 750 µs
<b>0.48%</b>	<b>0.63%</b>

**Tabla 2.12. Overhead por delineación de tramas [42].**

### 2.7.3. Eficiencia absoluta en EPON

La eficiencia absoluta es simplemente la combinación de los diferentes porcentajes de overhead que se presentan en una red EPON, estos valores se detallan en la **Tabla 2.13** tanto para downstream como para upstream.

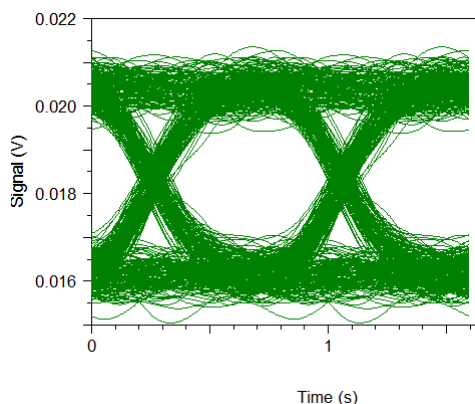
	Downstream	Upstream
<b>Eficiencia Mínima</b>	89.92%	83.63%
<b>Eficiencia Máxima</b>	91.58%	89.88%
<b>Throughput mínimo</b>	899.2 Mbps	863.3 Mbps
<b>Throughput máximo</b>	915.8 Mbps	898.8 Mbps

**Tabla 2.13. Eficiencia absoluta en EPON [42].**

## 2.8. Análisis de parámetros de desempeño utilizando el Diagrama del Ojo

Es sabido que existen varias técnicas y sistemas de medición de desempeño (medición de la BER, obtención de la relación señal a ruido del enlace (SNR), obtención de la atenuación de una señal entre el transmisor y el receptor, entre otros) para analizar y obtener las características propias de los enlaces de transmisión, pero en ciertos casos cuando se presentan diversos problemas en la comunicación, éstos no resultan aptos para determinar el origen del problema, por lo cual es importante contar con un análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el enlace con el fin de observar sus formas, desfases (*jitter*), niveles de ruido, potencias de las señales, entre otras varias. El diagrama o Patrón de Ojo, muy utilizado en las telecomunicaciones, se encarga del análisis de todas estas características reunidas en un diagrama, además de proporcionar una buena ayuda visual para observar el promedio y el peor caso del comportamiento

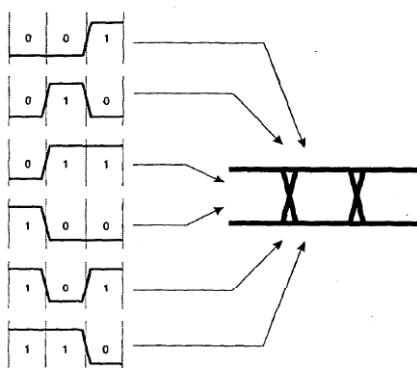
de las formas de onda a la salida de un sistema [43] - [45]. La **Figura 2.14** muestra un diagrama del ojo generado en OptSim.



**Figura 2.14.** Diagrama del ojo obtenido con OptSim.

El diagrama del ojo muestra esencialmente la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados como se muestra en la **Figura 2.15**. Con las señales transmitidas por el enlace es posible obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación (par trenzado, coaxial, fibra óptica, enlaces satelitales u otros).

Los diagramas de ojo son conocidos como patrones multi-valores, gracias a su capacidad de representar la superposición de varias señales simultáneamente, y a diferencia de las señales medidas normalmente en un osciloscopio, cada punto en el eje del tiempo tiene asociado múltiples niveles de voltaje.



**Figura 2.15.** Diagrama del ojo para una secuencia de 3 bits [43], [44].

**Análisis de los parámetros del diagrama del ojo:** como se menciona en [43] existen dos métodos de análisis de los diagramas del ojo, el primero orientado al análisis de las características de la forma de onda del pulso tal como el tiempo de elevación o subida, tiempo de caída, *overshoot*<sup>12</sup> y *undershoot*<sup>13</sup> como se muestra en la **Figura 2.16** que están referidas a cuatro propiedades fundamentales del ojo como son el nivel cero, nivel uno, cruce de amplitud y cruce en el tiempo detalladas en la **Figura 2.17**.

El segundo método está orientado a la comparación de la máscara medida directamente en el patrón de ojo con una máscara preestablecida que define regiones específicas en el diagrama del

<sup>12</sup> Sobrepasso del nivel máximo de la señal.

<sup>13</sup> Puede interpretarse como un reflujos o como una porción de la señal debajo del umbral de cero.

ojo, en las que los pulsos no deben introducirse, lo cual es útil en el diseño de enlaces, ya que si la señal se introduce en dichas regiones es posible observar problemas y errores en la transmisión.

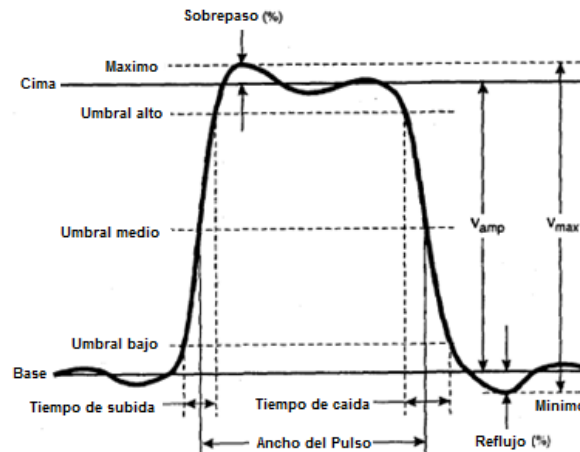


Figura 2.16. Parámetros del pulso en un patrón de ojo [43].

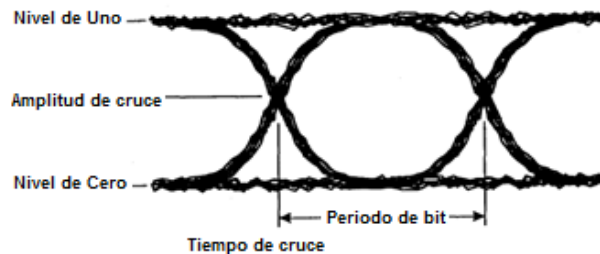


Figura 2.17. Parámetros fundamentales del ojo [43].

- **Tiempo de subida/Tiempo de caída:** se ubican los niveles cero y uno, se obtiene el tiempo relacionado entre el 10% y 90% del valor máximo de amplitud del pulso (nivel uno), y el tiempo entre ambos rangos es el tiempo de subida. Así mismo, se obtiene el tiempo de caída en el extremo del descenso del pulso.
- **Nivel de uno:** es la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico, dado que el diagrama del ojo utiliza métodos estadísticos en la construcción del patrón generando un histograma con los distintos valores del pulso para luego considerar una angosta zona del ancho del pulso, y así obtener el promedio del nivel uno de dicho pulso.
- **Nivel de cero:** es la medida del valor promedio del nivel cero lógico. Utiliza las mismas técnicas de medición del nivel uno.
- **Cruces:** conformado por el cruce de tiempo en el que se produce la abertura del ojo y su posterior cierre, y por el cruce de amplitud o nivel de voltaje en el que se produce la apertura y posterior cierre del ojo.
- **Periodo de bit:** es el periodo entre la apertura y cierre del ojo.

Cuando el ojo tiende a cerrarse completamente como se ve en la **Figura 2.18** es debido a efectos del jitter y de presencia de ISI (interferencia inter-símbolos), ya que el jitter produce un desplazamiento de las señales que componen el pulso que por ende se mezclan imposibilitando el reconocimiento de los niveles respectivos de la señal en el receptor. De la misma manera si el ojo está totalmente abierto, indica una muy baja probabilidad de error [46]

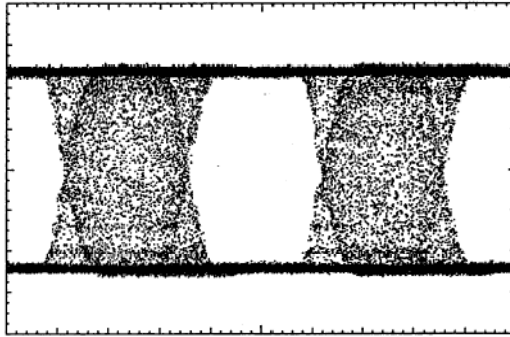


Figura 2.18. Diagrama del ojo con efectos producidos por el *jitter* [43].

Es importante destacar, que al utilizar fibra óptica, las tasas de transmisión son muy grandes (orden de los Gbits), por lo tanto los patrones tienden a deteriorarse, la tasa de errores aumenta y se dificulta el reconocimiento de los niveles intermedios a medida que se aumenta la tasa de transmisión.

En este capítulo, además de cumplir con el objetivo específico del literal a del anteproyecto, se responde en parte a una de las preguntas de investigación planteadas (el complemento a la respuesta se da en el **Capítulo 4**): “**¿Cuáles son los parámetros de desempeño a evaluar en el dimensionamiento de una red EPON, y cuál es la respuesta de dichos parámetros en condiciones de tráfico IPTV?**”, abordando los parámetros técnicos relacionados con el servicio IPTV, como son los protocolos de transporte, los códecs más importantes para transmisión de video digital y los requerimientos relacionados con la calidad de servicio y de la experiencia de este tipo de servicios; así como también tratando los aspectos fundamentales de las redes EPON, como el funcionamiento del protocolo MPCP, los algoritmos de asignación de ancho de banda y aspectos relacionados con la eficiencia. Estos parámetros son fundamentales para realizar la propuesta del sistema y la simulación descrita en el **Capítulo 4**.



### 3. CRITERIOS Y REGLAS DE INGENIERÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE ACCESO EPON PARA PRESTAR EL SERVICIO IPTV

---

Mediante el proceso teórico llevado a cabo en los capítulos previos, es posible contar con las herramientas necesarias para elaborar a manera de propuesta, las reglas de implementación de una red IPTV/EPON, dando cumplimiento al objetivo específico del **literal c** del anteproyecto: **“Definir y proponer reglas de ingeniería para la implementación de redes de acceso EPON que presten el servicio de IPTV en diferentes esquemas de prestación de servicio”**, mediante el establecimiento de unas etapas de planeación de una red de acceso y la definición de los diferentes criterios que deben ser tenidos en cuenta al momento de implementar un sistema IPTV/EPON para diferentes esquemas de prestación de servicio, haciendo énfasis en los criterios tecnológicos. También se menciona el estado de la implementación de este tipo de servicios en la región y particularmente en Colombia.

Estas reglas son de gran importancia, dado que pueden servir como pautas de diseño de redes de telecomunicaciones con convergencia de servicios para diversos operadores de este sector que ven en el servicio IPTV una gran oportunidad de mercado debido al desarrollo de servicios de nueva generación que demandan redes de acceso de mejor desempeño y mayor capacidad para superar el problema del cuello de botella. Además, pueden servir de referencia para el estudio de otro tipo de redes de acceso como xDSL, HFC, redes móviles e inalámbricas.

#### 3.1 Etapas de Planeación de una red de acceso

---

En la planeación<sup>14</sup> de una red de acceso, la definición y la planificación<sup>15</sup> deben ser tratadas como un aspecto clave. Enfatizar en una buena definición del escenario y en las actividades de planificación hace que los resultados se vean reflejados en la operación y en la optimización de la red. En este proceso ha de garantizarse que se cumplan los criterios de capacidad, cobertura y calidad de servicio en el área de interés en la que se realizará el despliegue. Una vez desplegada la red acceso, la fase de optimización complementa las labores de planificación, comprobando que en todo momento la red esté dando las mejores prestaciones posibles en función del tráfico requerido [47].

En general, el proceso de planeación de las redes de acceso ópticas se puede dividir en cuatro fases (**Figura 3.1**), consistentes en:

1. Una definición, que incluye la obtención de los requisitos de la red y el correspondiente dimensionamiento.
2. Una planificación con mayor nivel de detalle de la red de acceso.
3. Implementación de la red, que abarca la obra civil y la instalación de la fibra alimentadora y la de distribución.

---

<sup>14</sup> Trazar o formar el plan de una obra. Hacer planes o proyectos.

<sup>15</sup> Plan general, metódicamente organizado y frecuentemente de gran amplitud, para obtener un objetivo determinado.

#### 4. La etapa de operación y mantenimiento de red.



Figura 3.1. Planeación de Redes de Acceso [47].

### 3.2 Dimensionamiento de la red de acceso

El objetivo del dimensionamiento de una red de acceso es la estimación del número aproximado de elementos de red necesarios y su configuración (para cumplir con los requisitos de capacidad y cobertura en la zona de interés), así como de los enlaces entre ellos y su capacidad. Este estudio inicial proporciona una rápida evaluación de los elementos de red (de acceso, troncal y de transporte), para cumplir con las exigencias del tráfico con el fin de garantizar la QoS y la QoE requeridas, evaluando además la posibilidad de pérdida de paquetes y los retardos en las horas de mayor tráfico, en pro de completar satisfactoriamente una conexión de extremo a extremo. En este marco es posible obtener una aproximación de los costos asociados e inversión necesaria [47].

En el contexto del dimensionamiento se deben llevar a cabo tareas de determinación de la topología de la red, plan de enrutamiento, análisis de tráfico y requerimientos de QoS necesarios. Al dimensionar es importante tener en cuenta que la carga de tráfico nunca llegue a la carga total que la red está en capacidad de atender, para lo cual se debe contar con mediciones de tráfico y hacer un manejo adecuado de los recursos de la red (mantenimiento, mejoramiento, variaciones en los requerimientos), además se debe asegurar que en caso de presentarse fallas en la red el tráfico sea re-enrutado.

El servicio IPTV requiere de actividades de dimensionamiento diferentes a las que se necesitan para dimensionar enlaces de Internet de alta velocidad, ya que este servicio tiene más exigencias de ancho de banda y calidad del servicio [48].

Hoy en día el dimensionamiento de las redes de acceso está determinado por la linealidad de la programación en la TV, es decir, el usuario ve lo que los programadores emiten, sin embargo una de las premisas de IPTV es que el contenido que ve el usuario sea personalizado, por eso servicios como VoD, TSTV, PVR, multi ángulos, mosaicos y publicidad personalizada cobran gran importancia al momento de dimensionar la red de acceso, ya que estas aplicaciones envían la información haciendo transmisión Unicast, que disminuye la concurrencia y aumenta los requerimientos de ancho de banda en la red.

Existen diferentes escenarios de tráfico de IPTV que afectan directamente el dimensionamiento de la red de acceso [49], [50]:

- **Concurrencia extrema a un solo canal:** Se da cuando la mayoría de los usuarios del servicio están observando el mismo canal de broadcast, por ejemplo en un partido de fútbol importante, en este caso se presenta el menor consumo de ancho de banda ya que se transmite un solo flujo que es replicado usando IGMP.
- **Concurrencia a varios canales de broadcast:** Se presenta en el *prime time* de la programación de los canales de broadcast, donde se transmiten los programas mas populares, hay menor consumo de ancho de banda gracias al uso de IGMP.
- **Alta demanda de cambios de canal:** Se presenta cuando los usuarios cambian constantemente de canal en los comerciales de los programas o en horarios con programación poco interesante en los principales canales, esto añade gran cantidad de tráfico a la red, ya que se inician nuevos grupos multicast por cada usuario que vea un nuevo canal que no este activo.
- **Concurrencia pico en VoD:** Se presenta cuando hay nuevo contenido en los servidores de VoD, por ejemplo en el lanzamiento de una nueva película, esto incrementa en gran medida el flujo de tráfico Unicast en la red de acceso.

En este proyecto, con propósitos de simulación y con el fin de satisfacer los requerimientos de ancho de banda del peor de los casos y de aplicaciones futuras, se considera que todo el tráfico de IPTV es Unicast, con el fin de evitar negaciones del servicio (*Deny of Service – DoS*) debidas a congestión en la red de acceso.

De manera general, se consideran ciertos criterios, algunos de los cuales ya se han abordado en los capítulos anteriores y sirven como base para realizar la simulación del **Capítulo 4**. Dichos criterios se han clasificado de la siguiente manera [51]: Tecnológico, Financiero, de Calidad y Regulatorio. A continuación se hace una descripción detallada de cada criterio, enfatizando en que el criterio tecnológico está relacionado directamente con el dimensionamiento de la red IPTV/EPON, ya que los demás criterios se ven reflejados en las etapas subsiguientes del proceso de planeación.

### 3.3 Criterio tecnológico

Aquí se incluyen los aspectos técnicos más importantes a tener en cuenta en el dimensionamiento de la red, algunos de los cuales se han cubierto previamente en los **Capítulos 1, y 2**.

#### 3.3.1 Relacionados con el servicio IPTV

Los problemas más significativos que probablemente impactan la calidad de un servicio Triple-Play (aparte de los problemas en la conexión de acceso) son los relacionados con la congestión. Las redes de acceso que proveen servicios *Triple-Play* son particularmente susceptibles a la congestión, ya que llevan tráfico que debe ser priorizado para reducir la latencia y la pérdida de paquetes, particularmente para el video. Aquí es donde cobran gran importancia la planificación de la capacidad y el desempeño [16], [52].

En general, se puede considerar que los aspectos más importantes para el dimensionamiento de los elementos que conforman un servicio IPTV son:

- Oferta de canales: la oferta de una red típica está entre 125 a 200 canales broadcast de SD y 20 canales de HD, lo cual consumiría aproximadamente 740Mbps (MPEG-4) y alcanzaría cómodamente en un sólo enlace *Gigabit Ethernet* (GbE) [53].
- Cantidad de suscriptores: éste punto está relacionado directamente con las capacidades de la red de acceso.
- El pronóstico del tráfico: las tasas de penetración del servicio representan un índice importante del tráfico de la red. La **Tabla 3.1** muestra las proyecciones de las tasas de penetración, en donde se especifica el porcentaje de grupos familiares que se suscriben anualmente al servicio de Triple Play, por un periodo de 5 años (IPTV, VoD, VoIP y *High Speed Internet* - HSI) [54].

Servicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<b>IPTV</b>	8%	17%	24%	26%	27%
<b>VoD</b>	8%	17%	24%	26%	27%
<b>VoIP</b>	13%	22%	28%	33%	37%
<b>Internet alta velocidad</b>	13%	22%	28%	33%	37%

**Tabla 3.1. Tasas de penetración del servicio triple play [54].**

- El número de señales en vivo: por satélite, locales (por ejemplo los canales de TVD terrestre), de televisión por pago (PPV) ya sea en formato de de alta definición (HDTV) o en definición estándar SDTV [64].
- Para VoD, se debe tener en cuenta la concurrencia en porcentaje de suscriptores (para dimensionar la capacidad concurrente de los servidores), y cantidad de horas de almacenamiento de contenidos (tamaño de la videoteca) [1], [16], [18].
- Para el PVR, se debe considerar la capacidad de horas almacenadas por suscriptor, el porcentaje de penetración del servicio en relación al número de suscriptores, el número de reproducciones por contenido (para determinar la capacidad de streaming) y la caducidad del contenido almacenado [18], [19].
- La codificación de las señales de video para SDTV y HDTV. Actualmente hay una clara tendencia hacia el uso de MPEG-4 por el aprovechamiento de los recursos de red que ofrece.

De manera más puntual se especifican los criterios tecnológicos de los elementos y parámetros más importantes en el momento de hacer el dimensionamiento de un servicio IPTV.

### 3.3.1.1 *Middleware (MW)*

Las principales características a tener en cuenta para este tipo de elemento son [16], [19], [20]:

- El MW debe contar con APIs para desarrollar nuevas funciones y permitir el tránsito de datos entre sistemas de terceras partes o ya existentes en la red del operador.
- Debe soportar los servicios básicos de Broadcast TV, EPG, Pay per View, VoD, y servicios más avanzados como suscripción de VoD (sVoD), caller ID y PVR, gestión y rastreo de clientes, auto-configuración de los STBs, entre otros.
- Escalabilidad para el soporte de clientes e interoperabilidad con diferentes STB.
- Ya que es una entidad que varía mucho de un fabricante a otro, es importante analizar que funciones incluye cada uno, por ejemplo, en algunos casos incluye un servidor DHCP, en otros se comunica con uno.

### 3.3.1.2 Codificador

Habitualmente, los sistemas de IPTV utilizan equipamiento hardware de propósito específico, dedicado, costoso, de alta disponibilidad y calidad para hacer la codificación. La decodificación se realiza en el STB mediante hardware dedicado, a diferencia de la televisión por Internet, en donde se decodifica por software [6], [15], [19]. Se deben hacer las siguientes consideraciones:

- Tener en cuenta la capacidad de streaming que posee, lo cual implica una solución que compromete la cantidad de canales difundidos con la codificación utilizada.
- La capacidad de su interfaz de red, que se relaciona con el punto anteriormente mencionado.
- Dimensionar la capacidad de entrada y el tipo de las mismas (cantidad de flujos DVB, cantidad de entradas analógicas).

### 3.3.1.3 Criterios mínimos generales de SD y HD para video

Las **Tablas 2.7 y 2.8** contienen las recomendaciones mínimas de desempeño para video a nivel de MPEG-2 y MPEG-4, tanto para *Broadcast SD* y HD, VoD y contenido *Premium SD*.

Es necesario notar que el VoD y el contenido Premium en el formato SD tienen factores de desempeño similares al broadcast regular, pero las expectativas de los suscriptores pueden ser más altas debido a las tarifas adicionales que pagan por este contenido y a la comparación con otras alternativas de entrega (como TV cable, DVD, VCD, etc.) [29].

### 3.3.1.4 Resolución de video HD

La pantalla HDTV utiliza una relación de aspecto panorámico 16:9. La alta resolución de las imágenes, 1920 píxeles × 1080 líneas (1808p/i) o 1280 píxeles × 720 líneas (720p), permite mostrar mucho más detalle en comparación con la televisión analógica o de definición estándar (*Standard Definition*, de 720 píxeles × 480 líneas según el estándar NTSC)<sup>16</sup>.

Las imágenes HDTV son hasta 5 veces más definidas que las de la televisión de definición estándar, comparando el formato NTSC con la resolución HDTV más alta (1080i/p), como se muestra en la **Figura 3.2**.

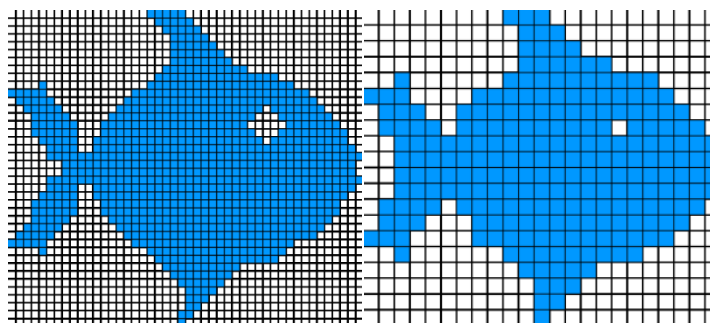


Figura 3.2. Comparación resolución de video HD<sup>17</sup> vs. SD<sup>18</sup>.

La resolución 1920x1080 suele estar en modo entrelazado, para reducir las demandas del ancho de banda, modo en el cual las líneas son escaneadas alternadamente 60 veces por segundo, de forma similar al entrelazado a 60 Hz en NTSC. Este formato se denomina 1080i.

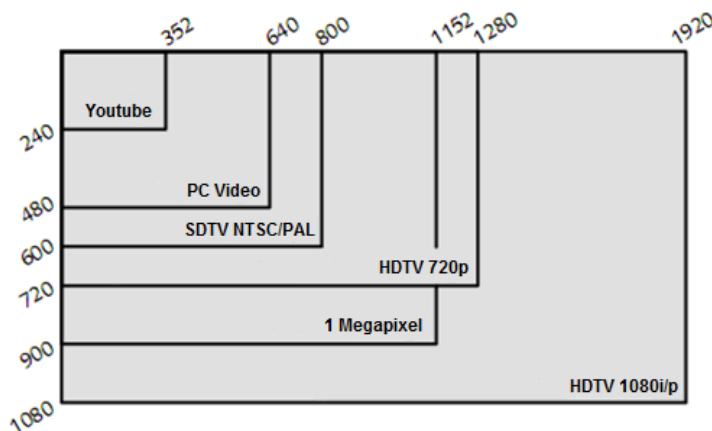
También son utilizados los formatos de escaneo progresivo en el cual se refresca el cuadro cada vez con una velocidad de 60 cuadros por segundo. El formato 1280x720 en la práctica

<sup>16</sup> [http://www.cnet.com/4520-7874\\_1-5137915-1.html](http://www.cnet.com/4520-7874_1-5137915-1.html).

<sup>17</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Raster\\_graphic\\_fish\\_40X46squares\\_hdtv-example.png](http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Raster_graphic_fish_40X46squares_hdtv-example.png).

<sup>18</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Raster\\_graphic\\_fish\\_20x23squares\\_sdtv-example.png](http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Raster_graphic_fish_20x23squares_sdtv-example.png).

siempre es progresivo y es denominado 720p, el formato 1080 progresivo es llamado 1080p [56]. La **Figura 3.3**, muestra una comparación entre las diferentes resoluciones de video digital. Hay que decir que a mayor resolución de video, mayor consumo de ancho de banda y si el escaneo es progresivo, también aumenta el ancho de banda requerido.



**Figura 3.3. Comparativa de resoluciones de video digital [56].**

### 3.3.1.5 Servidores de Video

Como se mencionó en el **Capítulo 1**, estas entidades son las que almacenan la información que luego se distribuirá a los distintos clientes, por lo cual deben poseer una gran capacidad de almacenamiento, el cual regularmente se hace en arreglos de discos para brindar redundancia. Los principales parámetros de dimensionamiento para esta entidad son:

- La capacidad de almacenamiento medida en unidades de volumen de información, GB o TB. Típicamente utilizando una codificación MPEG-2 a 3Mbps se necesita 1.6GB por hora de contenido. Un servidor de tamaño medio tiene una capacidad de 300 horas y 485 GBytes de almacenamiento, mientras que uno de gran tamaño cuenta con una capacidad de 1940 GBytes equivalente a 1200 horas. Estos valores están evolucionando rápidamente.
- La capacidad de las interfaces o streaming, lo cual determina la cantidad de usuarios en el caso de video a demanda y que en general está vinculada con la cantidad de usuarios de *broadcast* TV. Un servidor de video de tamaño medio típicamente cuenta con una capacidad de 200 streams de 3Mbps, mientras que uno de gran tamaño tiene 400 streams de 3Mbps, es decir 1200 Mbps.
- Desde el punto de vista de los costos de inversión la escalabilidad del servidor de video es muy importante, tanto en capacidad de almacenamiento como de *streaming*. En algunos casos es un equipo compacto y sólo se puede crecer agregando otro y haciéndolos funcionar conjuntamente administrados por otra entidad, que además realiza balanceo de carga, etc. En otros casos, se trata de chasis a los que simplemente se le van agregando placas de modo que aumente la capacidad.

Como se acaba de mencionar, para calcular adecuadamente la cantidad necesaria de almacenamiento para un servidor de VoD, se deben tener en cuenta tanto el número de horas de contenido que se va a almacenar, como la tasa de bits nominal de la señal de video [57].

Si se considera una hora de la señal de video (incluyendo el audio) que corre a una tasa de bits de 2.5 Mbps, y teniendo en cuenta que hay 8 bits en un byte y 3600 segundos en una hora, se puede obtener que el total del archivo será de 1.125 billones de bytes, o casi 1.05 GB. Este es un

valor aproximado, puesto que el formato exacto del archivo en el disco duro será diferente. Además, una pequeña cantidad de *metadata* se añade al archivo para dar una descripción de el video y hacerlo más fácil de transmitir en copias múltiples.

Otros ejemplos del tamaño del servidor de video de acuerdo a la cantidad del contenido son:

- 200 horas de contenido SD a 2.5 Mbps = 210 GB.
- 500 horas de contenido SD a 4 Mbps = 900 GB.
- 10000 horas de contenido SD a 2 Mbps = 9 TB.
- 300 horas de contenido HD con MPEG-2 a 14 Mbps = casi 2 TB.
- 500 horas de contenido HD con H.264 a 6 Mbps = 1.35 TB.

### 3.3.1.6 Distribución del contenido

Debido a que el contenido bajo demanda consume muchos recursos de la red, es conveniente almacenarlo lo más próximo a los clientes. Las soluciones proponen un sistema en el cual se tienen varios servidores de video distribuidos en la red, disponiendo de un servidor de video con una gran capacidad de almacenamiento en el sitio central en donde se guardan todas las películas disponibles y a su vez distribuir por la red servidores de video de menor tamaño en los cuales se almacenan las películas más vistas.

Es necesario plantearse los siguientes interrogantes: ¿Cuál es la película más vista para ser almacenada en los servidores de video distribuidos?, ¿En qué momento corresponde cambiar esa película por otra?, ¿Coincide la película más popular en las distintas regiones? Estas tareas se pueden resolver en forma automática. El *Middleware*, en base a las estadísticas que maneja se comunica con los servidores de video para realizar en forma dinámica una correcta distribución de contenidos en la red, y además permite al operador de la red ver a los diversos servidores de video como una sola red de contenidos con lo que facilita la incorporación de nuevas películas y distribución de contenidos en la red transparentes al operador [67].

### 3.3.1.7 Gestión de PVR y TSTV

El *Middleware* utiliza los recursos de los servidores de video para implementar las funcionalidades de PVR y TSTV, las cuales deben ser cuidadosamente dimensionadas para evitar problemas de exceso de tráfico en la red.

En el caso del PVR, se pueden configurar determinados perfiles para ser comercializados, en los cuales se varía el máximo de horas posibles a almacenar por usuario, la cantidad de veces que un contenido grabado podrá ser reproducido y la caducidad de almacenamiento.

En el caso del TSTV, se puede configurar la cantidad de minutos de un programa en vivo que se almacenará para poder ver en diferido. Para evitar una posible congestión en la red algunos sistemas disponen de la posibilidad de limitar la cantidad de intentos simultáneos de utilización del TSTV. De otro modo, la posibilidad de no habilitar el uso de TSTV en algunos canales permite evitar este tipo de problemas [1], [13], [20].

### 3.3.1.8 Ancho de banda requerido para IPTV

Una característica importante del ancho de banda de IPTV es que el consumo del ancho de banda promedio esta cerca al ancho de banda pico. Esto es debido a que la televisión podría estar encendida todo el día, requiriendo un stream de video constante por las 24 horas. En contraste, aplicaciones como el correo electrónico o navegar por la red típicamente consumen un ancho de banda promedio del 1-10 % del ancho de banda pico. Esto tiene unas implicaciones importantes para el dimensionamiento de la red: las reglas típicas que recomiendan que los enlaces desde los

sistemas de acceso pueden tener reuso por un factor de 10 a 1 no son apropiadas en un despliegue de IPTV. Por ejemplo, en una sola hora un *stream* de video HD transmitirá 4.5 Gbytes de información, lo cual equivale a más de un año de correo electrónico para un usuario típico. Un sólo flujo de HDTV operando las 24 horas del día ocuparía 39 Terabytes de capacidad de almacenamiento en un año [53].

Por lo tanto, el dimensionamiento del ancho de banda en la red para IPTV es sumamente crítico debido al uso intensivo de recursos de este servicio y a la vez por la dificultad en predecir el comportamiento de los usuarios. En general, se asume cierta concurrencia de usuarios para cada servicio y adicionalmente se mantiene cierta reserva de recursos en la red para poder absorber los picos de la fluctuación de la demanda. A continuación se detallan algunas características de los servicios a ser considerados en el dimensionamiento [15], [19], [20], [64].

- **Concurrencia de canales de BTV (Broadcast TV):** se debe tener en cuenta cuántos canales están siendo vistos en simultáneo. En el caso en el que el proveedor no distribuya muchos canales, se puede asumir que todos los canales son vistos en simultáneo ya que este es el peor caso, pero además es estadísticamente muy probable, debido a las costumbres de los clientes de hacer saltos de canal en búsqueda de contenidos que les interesen. Cuando se distribuye gran cantidad de canales, en general los canales favoritos siempre están presentes, pero los canales menos populares si no están siendo usados no son distribuidos ya que el IGMP los bloquea para ahorrar recursos de la red de agregación y acceso.
- **Concurrencia de usuarios de VoD:** se debe considerar cual es la concurrencia de usuarios utilizando este servicio, ya que cada usuario recibirá una señal de unicast con el canal requerido. Regularmente con fines de dimensionamiento se asume una concurrencia pico del 10% de los usuarios, pero teniendo en cuenta que este valor puede llegar a ser del 20% en la medida que se agreguen servicios como nPVR.
- **Cantidad de canales de HD:** en cada servicio de los anteriormente mencionados se deberá considerar cuales canales son HD y cuales SD, ya que los primeros como se vio anteriormente consumen más ancho de banda.

La **Tabla 3.2** especifica la predicción de tráfico anual del contenido HD y SD para IPTV con una proyección de 5 años, y la **Tabla 3.3** detalla el número de canales SD y HD de IPTV en un periodo de 5 años. Las tasas de penetración que se especifican en las **Tablas 4.5 y 4.6** se basan en proyecciones de mercado de *Network Strategy Partners, LLC* [54].

Servicio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
IPTV SD	98%	90%	80%	70%	57%
IPTV HD	2%	10%	20%	30%	43%
VoD SD	98%	95%	90%	85%	80%
VoD HD	2%	5%	10%	15%	20%

Tabla 3.2. Distribución del contenido SD y HD de IPTV con proyección a 5 años [54].

# Canales	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Total	150	200	250	300	300
SD	147	180	200	210	171
HD	3	20	50	90	129

Tabla 3.3. Número de canales SD y HD en un periodo de 5 años [54].

- **Cantidad de señales que recibe un usuario:** se debe considerar la cantidad de señales en forma simultánea que pueden transmitirse al usuario, lo cual está dado por la cantidad de STB que pueda tener el mismo y además si están disponibles facilidades como el *picture-in-picture*



o *multi-angle viewing*. Por ejemplo un usuario con 2 STB puede estar mirando dos señales de VoD en forma simultánea.

- Utilización de soluciones propietarias para el cambio de canal:** algunos proveedores como Microsoft utilizan soluciones propietarias que permiten mejorar el tiempo de cambio de canal (denominado ICC – *Instant Channel Change*). En ese caso, mientras se está realizando el cambio de canal el envío de la señal es por unicast al usuario, agregándose al tráfico multicast del BTV el tráfico unicast de los usuarios que estén realizando cambio de canal (“zapping”). Este tráfico puede ser del orden del tráfico de VoD durante los cortes comerciales, por lo que en general se estima una concurrencia del 10% de usuarios realizando cambio de canal. Se debe considerar que en casos de programas con alto rating (por ejemplo, partido del fútbol de la copa del mundo) este porcentaje puede ser muy superior.

En los patrones de uso del servicio de VoD y PVR la mayor concurrencia ocurre en las noches. Para Colombia, el Estudio General de Medios (EGM) arroja que la audiencia en general es mayor en las noches, tanto en días laborales como los fines de semana como se aprecia en la **Figura 3.4** y en la **Figura 3.5 [72]**.

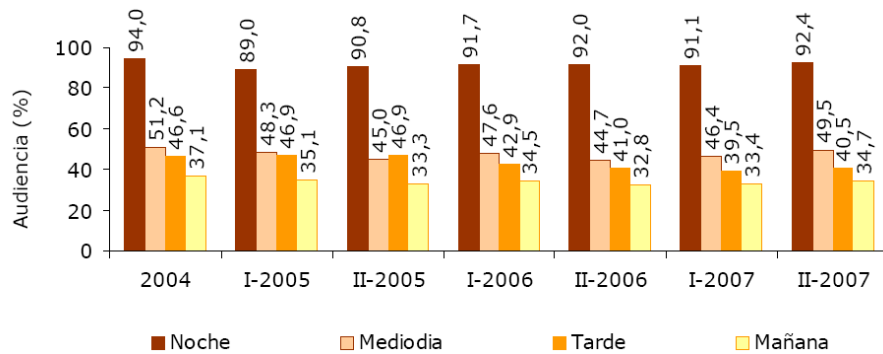


Figura 3.4. Audiencia por franjas horarias de lunes a viernes [72].

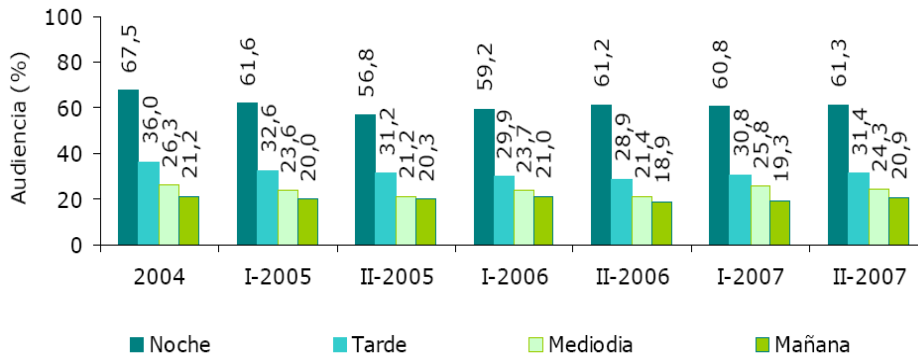


Figura 3.5. Audiencia por franjas horarias los fines de semana [72].

### 3.3.2 Criterios tecnológicos relacionados con la red de acceso EPON

#### 3.3.2.1 Tipo de fibra y topología

El estándar IEEE 802.3 define que para la PMD 1000BASE PX – 20D se utilice fibra óptica monomodo debido a factores como [25]:

- Es compatible con otras implementaciones de hardware realizadas con antelación.

- La capacidad es mucho más grande que la ofrecida por la fibra multimodo. Las investigaciones han demostrado que este tipo de fibra puede acoplar los modos de una fibra multimodo en un espectro reducido, esto ataca claramente el problema de la escalabilidad y la alta demanda de ancho de banda.
- Dentro del mercado de la fibra óptica hay diversos tipos (dependiendo de materiales y técnicas de construcción), de las cuales, las más importantes son: fibra de dispersión modificada, fibra de gran apertura efectiva, utilizadas en largas distancias (100 – 3000Km) y fibra de baja pérdida de pico de agua, que presenta menores pérdidas en la ventana de los 1400nm, esta fibra es ideal para las implementaciones de redes FTTH por su precio favorable.

Debido a que el servicio IPTV es en su mayoría de carácter residencial se recomienda utilizar la topología en árbol para la conexión de los usuarios.

### 3.3.2.2 *Atenuación, Dispersión y BER*

La atenuación y la dispersión son los factores más importantes que limitan la capacidad de un canal de fibra, por lo tanto el diseño de sistemas de fibra óptica es un ejercicio de cálculo de dispersión y atenuación en un trayecto de fibra determinado entre el transmisor y el receptor.

El receptor necesita ser suficientemente sensible para ser capaz de decodificar la señal proveniente del transmisor a la cual se le introducen pérdidas por atenuación y dispersión en la fibra, por conectores, por splitters y por otros efectos impredecibles. Estas y otras penalidades como el jitter pueden ser visualizadas como un modelo bidimensional mediante el diagrama del ojo, tratado en el **Capítulo 2**.

Las redes EPON se concentran en el aspecto económico de los componentes, de tal manera que se llegue con buen ancho de banda y calidad a los usuarios, conservando los bajos costos. La BER de la capa física en redes EPON es de  $10^{-12}$  (mucho más exigente que otros sistemas como GPON con una BER de  $10^{-10}$ ), a pesar de usar componentes más económicos [24].

### 3.3.2.3 *Plan de frecuencias*

Los dos tipos de PMD en EPON utilizan el mismo plan de frecuencias, con longitudes de onda en el rango de 1480-1600 nm (Banda S) para *downstream* y un rango de 1260 – 1360 nm (Banda O) en sentido *upstream* que intensionalmente es el mismo plan de frecuencias que utiliza GPON, esto con fines de interoperabilidad [25].

Dependiendo de la PMD, la longitud de onda central se encuentra entre 1310nm y 1490nm [27], esto se detalla claramente en la **Tabla 3.5**. Para implementaciones en las cuales el video se transmite por RF se utiliza una longitud de onda de 1550nm, solo para el video, pero este no es el caso por tratarse de una implementación de IPTV.

### 3.3.2.4 *Potencia de transmisión, sensibilidad y presupuesto de potencia*

La potencia óptica de transmisión es un parámetro muy importante en las redes EPON, y está definida por la amplitud de modulación óptica determinada por las características intrínsecas del láser utilizado. Esta potencia influye directamente en la distancia de alcance de la señal óptica. La potencia máxima para mantener la eficiencia en el consumo de energía con respecto al tamaño de láser no debe sobrepasar los 10 dBm [27], [71].

Por otro lado, la sensibilidad del receptor es la potencia requerida a la entrada del receptor, de tal manera que sea posible reconstruir la señal transmitida por el OLT. El estándar define un valor

de sensibilidad del receptor de -27dBm y en la industria se manejan valores de sensibilidad de -24dBm a -30dBm [24].

Otro parámetro a tener en cuenta es el presupuesto de potencia o “*power budget*” que es la sumatoria de las pérdidas a lo largo de trayecto debidas a la fibra, los splitters y los conectores utilizados, este valor lo especifican los fabricantes y se calcula de la siguiente forma [63]:

$$P = FCA(l) + SL + Otros$$

Donde,

**P:** Presupuesto de Potencia.

**FCA:** Atenuación de la fibra por metro (0.4dB/m para 1310nm y 0.35 dB/m para 1550nm).

**l:** Longitud de la fibra.

**SL:** Pérdidas en el *splitter*.

**Otros:** Pérdidas por conectores y empalmes.

Conociendo el valor de P de los datos del fabricante se puede obtener fácilmente la longitud máxima de la fibra, aplicando la siguiente ecuación:

$$l = \frac{P[dB] - SL[dB] - Otros[dB]}{FCA[\frac{dB}{Km}]}$$

Los valores típicos del presupuesto de potencia están entre los 20dB y 30dB. La **Tabla 3.4** muestra los valores típicos del presupuesto de potencia para las distancias definidas en el estándar de EPON y una configuración típica con 1 *splitter*, 4 conectores y empujes [63].

# ONT's	L (Km)	Longitud de onda (nm)	FCA (dB/m)	SL (dB)	Otros (dB)	Power budget requerido
16	10	1310	0.4	14.5	2.5	21
16	20	1490	0.35	14.5	2.5	24
32	10	1310	0.4	17	2.5	23.5
32	20	1490	0.35	17	2.5	26.5

**Tabla 3.4. Presupuesto de potencia [63].**

### 3.3.2.5 Ancho espectral

Representa la cantidad de potencia transmitida alrededor de la longitud de onda central. Con el uso de láseres más costosos se puede obtener un ancho espectral más pequeño [28].

### 3.3.2.6 Operación en modo ráfaga

La óptica utilizada en las redes PON debe ser capaz de operar en modo ráfaga, esto significa que el transmisor y receptor del ONT debe encenderse y apagarse rápidamente con el fin de detectar la información proveniente del OLT y no interferir en informaciones enviadas por otros ONT, esto por tener un medio de comunicación compartido. El tiempo definido para este propósito (encendido/apagado) es de 512ns y el tiempo de control de ganancia es de 400ns o menos dependiendo del fabricante [25].

La **Tabla 3.5** resume los parámetros técnicos en redes EPON y en las dos PMD definidas en el estándar IEEE 802.3ah.

Característica \ PMD	1000BASE PX 10-U	1000BASE PX 10-D	1000BASE PX 20-U	1000BASE PX 20-D
Longitud de onda nominal (nm)	1310	1490	1310	1490
Dirección de Transmisión	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>	<i>Upstream</i>	<i>Downstream</i>
Distancia (Km)	0.5 - 10	0.5 - 10	0.5 - 20	0.5 - 20
Pérdidas por inserción min (dB)	5	5	10	10
Pérdidas por inserción máximas (dB)	20	19.5	24	23.5
Potencia de Transmisión	<b>&lt;10dBm</b>			
Sensibilidad del receptor	<b>-27dBm</b>			
Tiempo de encendido y apagado del ONT	<b>512ns</b>			
Tiempo de AGC (Control de Ganancia)	<b>400ns</b>			
BER ( <i>Bit Error Rate</i> )	$10^{-12}$	$10^{-12}$	$10^{-12}$	$10^{-12}$
Relación de <i>Splitter</i>	1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64	1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64	1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64	1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64

Tabla 3.5. PMD para EPON [25], [27].

### 3.3.2.7 Ancho de banda requerido por usuario

El dimensionamiento del ancho de banda del sistema depende de tres factores: número de usuarios, requerimientos en ancho de banda de las diferentes aplicaciones, y el uso de las aplicaciones. Por ejemplo, un usuario que utilice una aplicación altamente interactiva durante 12 horas al día requiere más ancho de banda que un usuario que esporádicamente utiliza servicios de menor consumo de ancho de banda, como aplicaciones cliente-servidor y correo electrónico, peticiones HTTP, etc.

Para calcular el ancho de banda requerido por cada usuario, se asume que se presta un servicio *Triple Play*, el cual incluye: voz sobre IP (VoIP), acceso a Internet de alta velocidad y Televisión sobre IP (con diferentes formatos y servicios).

Se considera que, en el peor de los casos, todos los flujos de video, audio e Internet están activados al tiempo y operando a la tasa de bits más alta. De esta manera, el ancho de banda necesario para cada usuario en sentido downstream se calcula como se muestra a continuación:

$$BW_{usuario} = h(BW_{HDTV}) + s(BW_{SDTV}) + BW_{control} + BW_{internet} + v(BW_{VoIP})$$

Donde,

**h:** Número de flujos de HDTV.

**BW<sub>HDTV</sub>:** Ancho de banda de un flujo de HDTV ya sea en modalidad broadcast o VoD (12Mbps utilizando MPEG-4).

**s:** Número de flujos de SDTV.

**BW<sub>SDTV</sub>:** Ancho de banda necesario para transmitir un flujo de SDTV en modalidad broadcast o VoD (2.5Mbps en MPEG-4).

**BW<sub>control</sub>:** Ancho de Banda para señalización y gestión (1Mbps).

**BW<sub>Internet</sub>**: Ancho de banda para el servicio de Internet con la velocidad definida por el operador.

**v**: Número de líneas de VoIP para el usuario.

**BW<sub>VoIP</sub>**: Ancho de banda de un flujo de VoIP (Depende del tipo de códec).

### 3.3.2.8 Capacidad de usuarios por enlace EPON

Con el ancho de banda necesario para cada usuario, se calcula la capacidad de usuarios que se puede cubrir con una sola EPON, de la siguiente forma:

$$N = \frac{8(BW_{EPON})(\eta_{EPON})}{10(BW_{usuario})}$$

Donde

**N**: número de usuarios.

**$\eta_{EPON}$** : Eficiencia de la red EPON debida al overhead, la cual se aproxima al 82%.

**BW<sub>EPON</sub>**: Ancho de banda de línea de la red EPON, que es 1.25Gbps.

**BW<sub>Usuario</sub>**: Ancho de banda efectivo de los servicios del usuario (calculado en la **sección 3.3.2.7**).

La fracción 8/10 se debe a que EPON utiliza codificación de línea 8B/10B, por cada 8bits de información se envían 10 de línea, por lo tanto esta fracción corrige ese aspecto.

Por lo tanto:

$$N = \frac{8(1250[Mbps])(0.82)}{10(BW_{usuario}[Mbps])}$$

De donde:

$$N = \frac{820}{BW_{usuario}}$$

N representa el número de usuarios que pueden ser atendidos, con las características de servicio establecidas por el operador, y que en una red EPON debe ser aproximado a un número de relación splitter menor a N, con el fin de disponer de recursos adicionales en caso de aparición de nuevos servicios o mejora de los ya existentes.

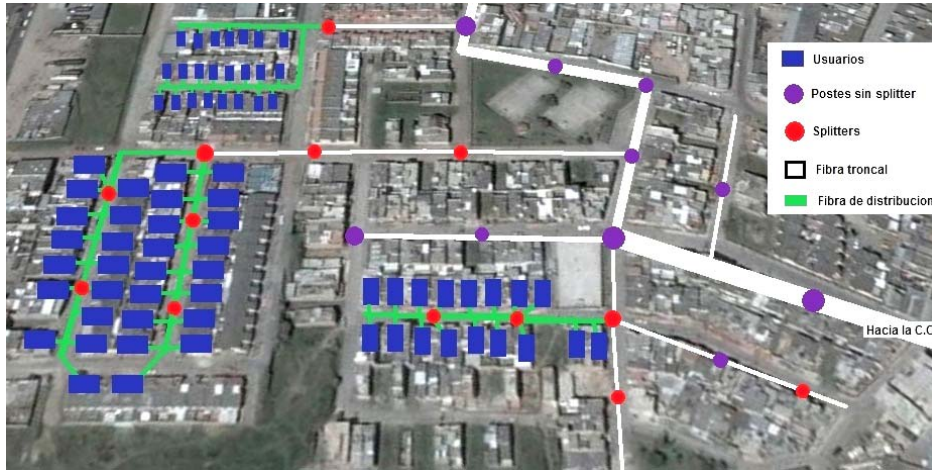
### 3.3.2.9 Planta externa

Las conexiones de fibra óptica requieren más ingeniería al momento de ser implementadas, ya que son más delicadas que las conexiones de cobre tradicionales. El diseño de la planta externa depende de la geografía y la demografía del área de instalación y en base a éstos datos se procede a ubicar los puntos donde irían ubicados los splitters de la red de distribución (pueden estar en gabinetes o en postes) y desde ahí se desprende la fibra de distribución que llega hasta los hogares. En términos de costo, es mejor diferir la construcción de la planta externa en conformidad a la demanda existente, pero esto añade un gran costo al capital de operación y degrada la eficiencia y calidad de la planta externa, por lo tanto, la recomendación es construir toda la planta física de fibras alimentadoras y diferir la construcción de la red de distribución de acuerdo a los requerimientos de la demanda [24].

En la construcción de la planta externa se pueden utilizar niveles jerárquicos de splitters, lo cual depende en gran medida del índice de acogida del servicio. Para un índice alto, el uso de jerarquías permite ahorrar fibra, sin embargo si el índice de acogida es bajo, la jerarquización no es recomendada porque eleva los costos al utilizar más equipos.

Con respecto a los conectores que se usan para unir tramos de fibra es recomendable utilizar el menor número de éstos, ya que son costosos, añaden pérdidas y son más susceptibles a los fenómenos climáticos [26].

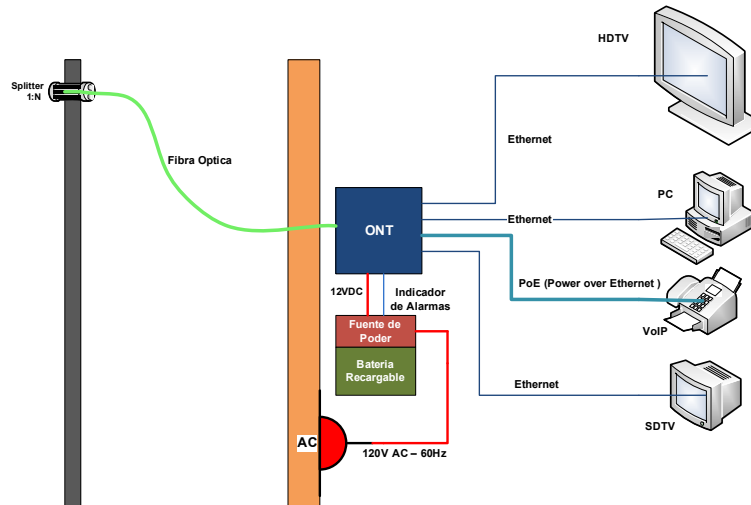
La **Figura 3.6** muestra la implementación de una red PON en un área urbana típica de Colombia, con la división en calles y carreras característica de los barrios. La red principal puede ser subterránea o aérea dependiendo de las normas y de la infraestructura presente. Por lo general, la red de distribución es aérea por medio de postes ubicados cerca de las casas.



**Figura 3.6.** Implementación de una red EPON en un entorno urbano [24].

### 3.3.2.10 Energía para los ONT

Ya que EPON utiliza únicamente elementos pasivos en la planta exterior, es necesario energizar el terminal del usuario (ONT) desde la propia ubicación de éste, lo cual dificulta la implementación de un sistema siempre encendido como las redes de teléfonos (PSTN). Para solucionar esto, se equipa al terminal del usuario con baterías que son recargadas por AC y en caso de una pérdida de energía, el ONT pasa a modo de consumo básico, con funcionalidad para servicios elementales como el servicio de datos por unos minutos y el teléfono, hasta que la batería se agote, caso en el cual se emitiría una alerta a el usuario. La **Figura 3.7** muestra el esquema de potencia y de protección en caso de fallas de energía del ONT recomendado en [24].



**Figura 3.7.** Arquitectura de energización de los elementos de la red EPON [24].

También hay otros métodos de potenciación de componentes, pero requieren mayor investigación y desarrollo para reducir sus costos, éstos son: potencia por medio de celdas solares, por energía eólica, por pares de cobre (descartado por aumento exagerado de costos) y por fibra óptica (uso de la potencia óptica de los láseres para energizar componentes electrónicos, esta tecnología se encuentra aún en investigación) [24].

### 3.4 Criterio financiero

Los costos financieros se dividen en Capital de inversión (CAPEX) que son los costo asociados con la implementación de la red, es decir la obra civil de construcción, los equipos (OLT, Fibra, ONT, etc.), las licencias, los accesos a redes de núcleo, entre otros; y capital de operación y mantenimiento (OPEX) que tiene que ver con los gastos de operación de la red y mantenimiento, es decir, pago mensual de acceso a red core y a canales de televisión, recuperación de fallas, reposición de equipos, por citar algunos.

#### 3.4.1 Relacionado con IPTV

##### 3.4.1.1 Criterio Financiero CAPEX

Construir una red IPTV es un propósito costoso, ya que requiere un significativo gasto de capital de inversión o CAPEX, que se encuentra principalmente enfocado en dos categorías: red de acceso y cabecera. El CAPEX de la red de acceso cubre los gastos de mejoramiento o construcción de una red de banda ancha calificada para IPTV (esto se trata en la **Sección 3.4.2**). El CAPEX de la Cabecera cubre los gastos de construcción de una cabecera digital [20], [67], [68]. En la **Tabla 3.6** se muestra un ejemplo del costo de inversión o CAPEX típico de IPTV tanto para un proveedor de 5000 suscriptores como para uno de 1000 suscriptores, el cual considera los siguientes aspectos:

- Mejoramiento de la red de acceso.
- Desplegar una cabecera digital MPEG-4 con 125 canales.
- Ubicación de tres STBs con MPEG-4 para cada suscriptor, 10% de los cuales tendrán capacidad de PVR.

Estos costos son para un sistema IPTV básico, y no incluye servicios adicionales y características como VoD. Los costos de CAPEX pueden variar ampliamente, dependiendo de las circunstancias, y pueden cambiar dramáticamente con el tiempo. La rápida evolución de la tecnología también afecta al CAPEX, como por ejemplo las múltiples opciones de tecnología de cabeceras disponibles.

Elemento	5.000 Usuarios (USD)	1.000 Usuarios (USD)	Nota
<b>Cabecera</b>	1.620.000	1.620.000	
<b>Middleware</b>	90.000	90.000	
<b>Adecuación de la red de acceso</b>	2.150.000	950.000	
<b>Set Top Boxes</b>	1.255.000	245.000	El costo puede ser reducido utilizando un STB para varios usuarios
<b>Total</b>	5.085.000	2.905.000	

**Tabla 3.6. CAPEX para la Cabecera de video [20].**

### 3.4.1.2 Criterio Financiero OPEX.

Los gastos de operación de una compañía u OPEX inevitablemente continúan después del despliegue de la red IPTV, y principalmente incluyen los costos de personal, contenido y mantenimiento. La **Tabla 3.7** muestra los gastos anuales OPEX típicos basados en los mismos criterios usados en los gastos CAPEX [20], [67], [68].

Elemento	5.000 Usuarios (USD)	1.000 Usuarios (USD)	Notas
<b>Cabecera</b>	88.000	88.000	
<b>Middleware</b>	22.000	4.400	
<b>Contenido</b>	1.560.000	312.000	
<b>Set Top Boxes</b>	122.000	24.000	
<b>Personal</b>	180.000	120.000	5.000 → 3 Empleados 1.000 → 2 Empleados
<b>Publicidad</b>	35.000	20.000	
<b>Administración</b>	36.000	20.000	
<b>Total</b>	2.043.000	588.400	

Tabla 3.7. OPEX para IPTV [20].

### 3.4.2 Relacionados con la red de acceso EPON

Desde el punto de vista financiero, hay que tener en cuenta tres aspectos importantes:

- La demografía del área, incluyendo el ingreso familiar, el tamaño de las familias y la distribución en edades. Estos datos son importantes para establecer las oportunidades de Mercado y definir estrategias para atacar esas oportunidades [28].
- La geografía del área de estudio, distancias, tamaño de los lotes, vías de acceso, sistema de cableado. Obviamente, las características geográficas difíciles encarecen el despliegue de la red. Estudios en Japón, donde la fibra está ampliamente extendida, demuestran que la inclinación del terreno influye en el costo de instalación [24].
- Los servicios a ser implementados, la demanda y la competencia por parte de otros operadores, con proyecciones a varios años.

En [24] se hace un análisis detallado de los costos de implementación de una red de acceso EPON/FTTH. En resumen, se puede definir el costo CAPEX de implementación así:

$$CAPEX = OLT + N(ONT) + f_{al}(d_{co}) + f_{dis} \left( \sum_{j=1}^N ds_j \right) + k(S) + Otros$$

Donde,

**OLT:** Costo del equipo ubicado en la oficina central.

**N:** Número de usuarios.

**ONT:** Costo del equipo ubicado donde el usuario, este depende de los servicios a ser implementados (PVR, STB, Enrutador, etc.), entre más complejos, más costosos.

**f<sub>al</sub>:** Costo de componentes e instalación por metro de fibra alimentadora.

**d<sub>co</sub>:** Es la distancia de la CO al Splitter.

**f<sub>dis</sub>:** Costo de componentes e instalación de fibra de distribución.

**d<sub>s</sub>:** distancia desde el splitter a la ubicación del equipo de usuario.

**k:** número de *splitters* utilizados.

**S:** costo de un *splitter*.

**Otros:** conectores, clavos, sujetadores, canales, grapas, empalmes, etc.



Se puede concluir que:

- La implementación de redes PON es por usuario 9 dólares más económica que las soluciones de fibra punto a punto [24].
- Los costos pueden variar dependiendo si se hace una nueva obra civil o se rehabilita una ya existente.

El OPEX es más complejo y depende de los servicios a ser implementados, como se vio en el caso de IPTV, se podría resumir el OPEX con la siguiente ecuación:

$$OPEX = \text{Acceso TV} + \text{Acceso Internet} + \text{Acceso Telefonía} + \text{Mantenimiento} + \text{Operación} \\ + \text{Publicidad} + \text{Administración} + \text{Licencias}$$

El valor que pagan los usuarios por el servicio viene determinado por los servicios requeridos, la estratificación, la competencia, entre otros. Actualmente una oferta empaquetada ronda los 50 dólares, con un acceso de banda ancha de alrededor de 300 kbps, telefonía local y un paquete básico de televisión<sup>19</sup>. Estos precios tienden a bajar, así como la velocidad de conexión tiende a crecer, lo cual llevaría a que tarde o temprano los operadores migren hacia soluciones de acceso por fibra óptica.

### 3.4.3 Escogencia de equipos ONT, OLT y STB

En cuanto a la escogencia de los equipos se pueden considerar los siguientes factores:

- Ambiente Físico donde se instalen los equipos (internos o externos).
- Conformidad con protocolos y estándares.
- Características de confiabilidad.
- Características de seguridad.
- Certificados regulatorios.
- Modelos de escalabilidad.
- Economía.

#### 3.4.3.1 OLT

El receptor (sentido upstream) en una red EPON debe ser capaz de detectar señales con amplitudes variables de fuentes ubicadas a diferentes distancias. Debido a la atenuación en la fibra óptica los niveles de potencia recibidos pueden variar considerablemente entre slots de tiempo, situación que es conocida como el problema “cerca – lejos”.

La mejor solución a este problema es el uso de un receptor que opere para recepción de ráfagas y que adecue sus parámetros conforme a los de la señal recibida en cada slot de tiempo. Para el estándar 802.3ah, el tiempo de control de ganancia es de 400ns o menor a criterio del fabricante [28].

#### 3.4.3.2 ONT

Se debe tener en cuenta que para no inyectar ruido en la PON el transmisor debe apagarse en ausencia de datos y encenderse cuando detecte datos y cuando tenga asignado un slot de tiempo

<sup>19</sup> <http://www.telesemana.com/entrevistas/detalle.php?id=22>.

de transmisión. El tiempo de encendido y apagado del láser en EPON es de 512ns. Además, al ONT se le pueden añadir otras capacidades como:

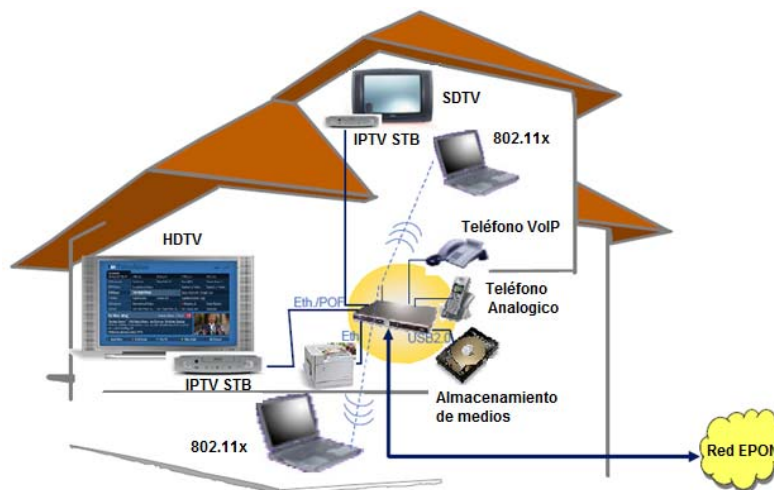
- Servir de STB para uno o varios televisores y flujos de IPTV.
- Enrutador para LAN.
- Puertos de Telefonía.
- Access Point inalámbrico.

La **Figura 3.8** muestra los servicios de un ONT multifuncional.

### 3.4.3.3 STB

En caso de no estar integrado al ONT, las principales consideraciones a tener en cuenta en un STB son las siguientes [1], [18], [20], [38]:

- Sí el STB tiene o no el disco duro incluido que se necesita en aplicaciones como el PVR para reproducir, retroceder, adelantar, pausar y eliminar publicidad no deseada. Cuando el almacenamiento para tales funciones se hace en la red, en los servidores de borde y luego se envía la información al STB, se presenta un incremento del tráfico unicast en el momento en que los suscriptores reproducen los contenidos almacenados, pero hay una reducción de los costos y es posible una administración y mantenimiento centralizados. Cuando el disco duro está incluido en el STB, el costo de éste es mayor, aunque representa una mejor opción cuando el tráfico unicast es poco viable.
- Sí el STB cuenta con módem incluido, sí tiene varias interfaces Ethernet, en este caso sí funciona como *hub* o como *switch*, sí maneja herramientas para QoS (diferenciación, priorización y limitación del tráfico de los diferentes servicios que brinde el STB a través de sus puertos).
- En algunos casos los STB cuentan con una interfaz de datos hacia el usuario con Wi-Fi, por ejemplo 802.11g de modo de que éste implemente una red interna inalámbrica.
- Es importante analizar los formatos de salida que se desean de acuerdo a los planes comerciales (s-video, RCA, RF, HDMI), y sí se desea salida de audio digital o no.
- Las funciones que se incorporen en el STB de IPTV dependen de los fabricantes, de la línea de STB más utilizada por los clientes y del estándar del producto.



**Figura 3.8. ONT multifuncional.**

### 3.5 Criterios de calidad

Los criterios de calidad son muy importantes tanto a nivel de red (QoS) como a nivel del usuario (QoE) sobre todo teniendo en cuenta las exigencias y requerimientos de un servicio como IPTV, por lo cual es necesario hacer una verificación y mantenimiento de los mismos teniendo en cuenta que las redes de acceso y transporte pueden cambiar dinámicamente su capacidad (más aún cuando se trata de servicios *Triple-play*) de acuerdo a la concurrencia de tráfico y a las condiciones de dimensionamiento. Este criterio se soporta en los requerimientos de calidad del servicio tratados ampliamente en la **sección 2.3**.

En cuanto a EPON, los criterios de calidad constituyen las características que ofrece esta red a unos niveles que satisfagan las expectativas de los usuarios de la red, para lo cual se consideran variables como:

- **Seguridad:** para evaluar la vulnerabilidad ante el acceso por parte de extraños y la posibilidad de caída de la misma.
- **Mantenimiento:** necesario para garantizar calidad del servicio. En este sentido las redes de acceso presentan grandes problemas por el gran costo que implica movilizar un equipo de técnicos para solucionar un problema. Por esto, es absolutamente necesario que cada enlace de fibra sea probado antes y después de la instalación en la ubicación del usuario. A diferencia de las redes de cobre donde los problemas suceden con el paso del tiempo, está comprobado que los problemas en las redes de fibra suceden inmediatamente después de la instalación, debido a las malas prácticas de instalación [24].
- **Gestión:** Con lo cual se hace un seguimiento efectivo de parámetros influyentes en la red y que afectan la experiencia del usuario final

### 3.6 Criterio Regulatorio

Como para todas las nuevas tecnologías, la implementación temprana de redes de acceso óptico depende de la regulación de los gobiernos. Los procesos regulatorios en Japón, Corea y Estados Unidos son buenos ejemplos de una política comprometida con el desarrollo de este tipo de redes. Las regulaciones gubernamentales deben cubrir los siguientes aspectos:

- Permitir a los proveedores de servicios de telecomunicaciones operar servicios de Televisión, tal como se les ha permitido a los operadores de CATV proveer servicios de Internet y telefonía.
- Eliminar los monopolios en las redes de acceso, ya que está demostrado que la competencia entre operadores tiene un papel muy importante en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la disminución de los costos hacia los usuarios.

En marzo de 2007 se creó el Open IPTV Forum, con el objetivo de desarrollar unas especificaciones normalizadas que permitan la utilización "*plug and play*"<sup>20</sup> de dispositivos de cualquier fabricante para la prestación de servicios finales por parte de cualquier proveedor.

El foro está constituido por 19 miembros, todos ellos fabricantes de equipos, operadores de telecomunicaciones y proveedores de servicios: Alcatel Lucent, Amino Communications, Deutsche Telekom, Ericsson, France Telecom, Huawei, LG Electronics, Nokia Siemens Networks, Panasonic,

<sup>20</sup> Tecnología que permite a un dispositivo informático ser conectado a un equipo sin tener que configurar ni proporcionar parámetros de sus controladores.

Philips, Samsung, Sony, Sun Microsystems, Telecom Italia Group, Telefónica, TeliaSonera, Tilgin, Verimatrix Inc y ZTE Corporation.

Las especificaciones desarrolladas serán dirigidas a los organismos internacionales de estandarización, con el fin de modificar los estándares actuales implicados o incorporar nuevos cuando resulte necesario.

Con respecto al tema de IPTV en Latino América, según Convergencia Latina<sup>21</sup> los mercados de Chile, Colombia, Argentina y México son los que se encuentran en mejores condiciones para desplegar este servicio y en países como Brasil y Venezuela hay que superar algunas barreras regulatorias que impiden a las empresas de telecomunicaciones brindar servicios de televisión, ya que por ahora solo les está permitido brindar servicios de VoD.

Entre 2008 y 2009, se esperan al menos 12 lanzamientos de IPTV. En Brasil, Oi y GVT esperan comenzar sus operaciones y, si se resuelve el tema regulatorio, los operadores podrían lanzarse con full IPTV sino, lo harán con VoD. Telefónica y ETB comenzarán a dar IPTV en Colombia; Andinatel lo hará en Ecuador, Telmex y Axtel en México; además de las filiales de América Móvil en Nicaragua y en República Dominicana. También habrá novedades por parte de los operadores estatales ya que CANTV (Venezuela), ANTEL (Uruguay) y COPACO (Paraguay) han manifestado su interés en ello.

El éxito de IPTV en América Latina depende principalmente de tres factores [60]:

- Un servicio que resulte atractivo y que explote todos sus beneficios técnicos aprovechando la interacción entre televisión, Internet y telefonía. Para esto, es necesario que el producto se muestre como parte de una oferta empaquetada de servicios.
- IPTV debe ofrecer contenidos exclusivos que marquen una diferencia con los otros proveedores, por ejemplo, se pueden brindar contenidos de la ciudad a la cual pertenece el abonado o derechos de transmisión exclusivos (campeonatos deportivos, conciertos, películas, etc.).
- Establecer un rango de tarifas competitivas frente a otras alternativas presentes en el mercado (CATV, TVD, TV satelital).

En Colombia existen dos entes reguladores, la Comisión de Regulación de las Telecomunicaciones (CRT) para los servicios de telecomunicaciones, y la Comisión Nacional de Televisión (CNTV) en lo que respecta a la Televisión, y la discusión sobre quién y cómo se debe regular IPTV continúa, pero hoy en día el problema de IPTV es el estado de las redes<sup>22</sup>. En unos años, cuando los operadores estén en condiciones de prestar el servicio, se espera que el marco regulatorio esté listo y si es necesario dichos operadores tendrían que adquirir licencias adicionales.

### 3.7 Reglas a seguir para la implementación de redes EPON para la prestación de servicios IPTV en Colombia

En este capítulo, además del cumplimiento del objetivo específico del **literal c** del anteproyecto, se da respuesta a la pregunta de investigación: “¿**Qué consideraciones se deben tener en cuenta para el dimensionamiento de este tipo de redes de acceso?**”, con la elaboración de las reglas de ingeniería para la implementación de redes de acceso EPON que presten el servicio IPTV, ya que el dimensionamiento hace parte de la fase de definición y se constituye como un paso obligado para llevar a cabo la implementación de este tipo de redes.

<sup>21</sup> <http://www.convergencialatina.com/cobertura.php?id=1095&PHPSESSID=38e11ebd29648ee021d609e902c81d47>.

<sup>22</sup> <http://www.telesemana.com/entrevistas/detalle.php?id=22>

Teniendo en cuenta los criterios tratados en este proyecto, a continuación se clasifican y enumeran las reglas y actividades respectivas que un operador de telecomunicaciones debería seguir en caso de implementar una red Óptica Pasiva Ethernet (EPON) para prestar el servicio IPTV en Colombia. Estas reglas pueden aplicarse en cualquier esquema de prestación de servicio, es decir, si el operador ofrece servicios unitarios o empaquetados en doble o *Triple play*.

### 3.7.1 Regla de Viabilidad

Consiste en un estudio analítico sobre la posibilidad de realizar un proyecto de implementación de una red IPTV/EPON, teniendo en cuenta tanto los costos y el tiempo de implementación, como sus características técnicas y alcance. Para obtener una estimación de los costos es necesario conocer las características geográficas y demográficas del área a servir, para ajustar las ofertas y los esquemas de prestación de servicio.

Además del aspecto económico, debe considerarse la viabilidad técnica de la implementación de la red de acceso analizando la oferta de equipos hardware y software. Los estudios deben estar enfocados hacia la posibilidad de distribuir streaming de video IPTV en tiempo real e información multimedia de alta calidad, a través de redes EPON.

Con el fin de cumplir con la regla de viabilidad se proponen las siguientes actividades:

- Obtener estadísticas demográficas de los habitantes del área de interés, como número de casas o edificios, número de habitantes por casa o edificio, rangos de edad, poder adquisitivo, entre otras. En Colombia es muy útil considerar los estudios de medios realizados por entes gubernamentales, como la CNTV y la CRT (Estudio General de Medios).
- Obtener las características geográficas del área en cuestión, como son: condiciones del terreno, elevación, contexto urbano o rural, entre otras.
- Considerar los aspectos regulatorios del mercado y los alcances empresariales, teniendo en cuenta el Criterio Regulatorio tratado en la **sección 3.6** y las normas y estándares internacionales relacionados con las redes EPON (IEEE 802.3ah) y el servicio IPTV (regulación pendiente).
- Analizar la competencia de otros operadores en el área de interés, su tasa de penetración, servicios y tarifas, para realizar una propuesta acorde a la oferta y demanda del mercado.
- Hacer un estudio de estimaciones presupuestales del proyecto, teniendo en cuenta el Criterio Financiero tratado en la **sección 3.4**, tanto para EPON como para IPTV.

En el caso Colombiano, los operadores de Telecomunicaciones se encuentran haciendo estudios de viabilidad para la implementación del servicio IPTV aprovechando la infraestructura de cobre desplegada actualmente. En cuanto a las redes de acceso ópticas el único estudio del cual se tiene conocimiento es el llevado a cabo por la ETB en Bogotá, en la cual se implemento un montaje piloto de este tipo de redes de acceso con el fin de probar equipos de diferentes fabricantes.

Se considera que el despliegue del servicio IPTV es indiscutible sobre redes de acceso xDSL e inalámbricas (caso de UNE, ETB y Telecom) gracias a la alta penetración de la televisión y del incremento del número de usuarios de conexiones de banda ancha, sin embargo el panorama para las redes de acceso ópticas es más complicado, ya que implica grandes inversiones de CAPEX en infraestructura de planta externa, pero a futuro debe darse una tendencia hacia la migración a este tipo de redes, dada la necesidad de solucionar problemas tales como la distancia desde los nodos de acceso y la capacidad de ancho de banda que las redes actualmente desplegadas no son capaces de superar.

### 3.7.2 Regla de Definición de requerimientos y Análisis del sistema

El objetivo de esta regla es obtener en detalle el dimensionamiento y alcance del sistema, determinando todos y cada uno de los requerimientos que se deben cumplir. Una vez obtenidos, se hace una estimación de los equipos necesarios para la implementación de la red.

Con el análisis del sistema (IPTV/EPON) se trata de definir lo que el sistema debe hacer y los parámetros y recomendaciones mínimas de funcionamiento del mismo.

Con este fin se proponen las siguientes actividades:

- a) Definir los servicios que han de ser implementados y sus parámetros:
- Con relación a IPTV, definir el estándar de codificación (**sección 2.1**), la resolución de video (**sección 3.3.1.4**), teniendo en cuenta los criterios mínimos para cada tipo de formato (**sección 3.3.1.3 y 2.3**). y la arquitectura de los servicios de VoD, PPV, TSTV y PVR (**sección 3.3.1**).
  - Para el servicio de Internet de alta velocidad, definir la velocidad de downstream y upstream disponible para cada usuario.
  - Para el servicio de telefonía, definir el códec de audio a utilizar y los parámetros de calidad del servicio necesarios para la implementación de este servicio.
- b) Empaquetar los servicios de acuerdo a las estadísticas de penetración de cada servicio en el área en cuestión (doble play, triple play, n-play, etc.) y al estado de la competencia en el mercado. También hay que tener en cuenta las necesidades de los usuarios, su capacidad adquisitiva y el número de equipos receptores disponibles (lo cual influye directamente en la cantidad de STB's necesarios en la red del hogar y por ende la cantidad de flujos IPTV por usuario). Esta información se deriva de los criterios de distribución de contenido (**sección 3.3.1.6**) y de ancho de banda para IPTV (**sección 3.3.1.8**). Con esto, se definen diferentes esquemas de prestación de servicio, partiendo de que IPTV se presenta como el servicio principal, es decir, cualquier oferta de servicio incluye IPTV.

Los esquemas de prestación de servicio, son:

- **Servicio básico:** únicamente el servicio IPTV. El operador cuenta con una oferta de canales de broadcast y de VoD (tanto en formato SD como HD) determinada como se muestra en la **Tabla 3.8**, de la cual el usuario podrá escoger el número y el formato de los flujos IPTV que desea contratar, dependiendo de los equipos instalados en su ubicación. Por ejemplo, si el usuario solo cuenta con un televisor SD en su ubicación, entonces contrata 1 flujo de IPTV en formato SD.

			# Canales Disponibles	# de Flujos IPTV contratados	
IPTV	Broadcast	SD	125-200	SD	Definidos por el usuario
		HD	20		
	VoD	SD	n	HD	
		HD	n		

**Tabla 3.8. Esquemas de prestación del servicio IPTV.**

- **Servicio Doble play:** Consiste en la combinación de IPTV con las características mencionadas en el punto anterior, con telefonía VoIP o Internet de Alta Velocidad.

- **Servicio Triple Play:** Consiste en la oferta completa de servicios, con canales de IPTV, Internet de alta velocidad y telefonía VoIP. Implementar un servicio triple play representa el requerimiento más exigente en cuanto a ancho de banda, pero la red EPON está en capacidad de soportarlo sin problemas.
  - **Servicio n-play:** Se refiere a la implementación del servicio *Triple-play* en adición a un nuevo servicio emergente, como puede ser vigilancia, movilidad, etc.
- c) Teniendo claro los servicios a implementar y sus respectivos parámetros se procede a determinar el ancho de banda demandado por cada usuario, teniendo en cuenta los criterios tecnológicos definidos en el **capítulo 2** y las secciones **3.3.1.8** y **3.3.2.7**. que son tomados como referencia para la simulación del **capítulo 4**.
- d) Establecer el número de usuarios que pueden ser atendidos por cada enlace EPON, con las especificaciones de los servicios definidas en los puntos anteriores y teniendo en cuenta el criterio de capacidad de usuarios por enlace EPON de la **sección 3.3.2.8**

### 3.7.3 Regla de Diseño de arquitectura

El propósito de esta regla es establecer la arquitectura del sistema IPTV/EPON acorde con los requerimientos planteados en la regla anterior, para ello es necesario soportarse en la información proporcionada en los capítulos previos y llevar a cabo las siguientes actividades:

- Definir los protocolos necesarios para la transmisión de IPTV sobre redes EPON, mencionados en la **sección 2.2** y las condiciones de tráfico en la red de acceso mencionadas en las **secciones 2.6 y 2.7**.
- Diseñar la sección de la cabecera de video de la oficina central (Middleware, servidores de contenido, de gestión, de acceso, enlaces a proveedores de contenido, etc.) dependiendo de los servicios, de la capacidad del sistema y teniendo en cuenta la escalabilidad. Para ello, se toman conceptos relacionados con el Middleware (**sección 3.3.1.1**), el codificador (**sección 3.3.1.2**) y los servidores de video (**sección 3.3.1.5**).
- Establecer los parámetros relacionados con el OLT, como son: plan de frecuencias (**sección 3.3.2.3**), potencia de transmisión y sensibilidad, presupuesto de potencia (**sección 3.3.2.4**) y el ancho espectral manejado (**sección 3.3.2.5**).
- Diseñar la planta externa conforme a los datos geográficos obtenidos y teniendo en cuenta el criterio de la **sección 3.3.2.9**.
- Definir un esquema de energización de los componentes de la PON, conforme a la **sección 3.3.2.10**.
- Definir los equipos de usuario (un solo equipo para todos los servicios o diferentes equipos para cada servicio), en base a las recomendaciones de la **sección 3.4.3**.

Después de realizar estas actividades se pueden concretar los siguientes datos:

- Número de elementos hardware necesarios (servidores, enrutadores, firewalls, OLT, codificadores, ONT, STB, etc.) para el despliegue del sistema IPTV/EPON y características como el número de interfaces, tipo de fuentes de alimentación, entre otras. Cuando las redes son pequeñas algunos elementos pueden desempeñar varias funciones (por ejemplo el servidor web puede hacer las veces de servidor de bases de datos o de gestión), pero a

medida que las redes se hacen más grandes y complejas es necesario desplegar un mayor número de equipos hardware con el fin de satisfacer las necesidades del sistema.

- Consideración del software necesario en el sistema, licencias de aplicaciones comerciales, los sistemas operativos, las bases de datos, el software de gestión, entre otros. En cuanto al software, se cumple el mismo principio que con el hardware, que a medida que la red crece el software a utilizar es más complejo. En redes pequeñas algunos componentes software pueden realizar funciones de componentes hardware (por ejemplo el servidor web puede hacer las veces de firewall, pero cuando la red crece se hace necesario un equipo firewall).

La **Figura 3.9** muestra la arquitectura final del sistema IPTV sobre una red óptica pasiva EPON, propuesto en este proyecto.

### 3.7.4 Regla de Construcción, Integración y Pruebas del sistema

Una vez cumplida la regla de diseño de la arquitectura se procede a la construcción e integración del sistema, realizando una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento tanto a nivel unitario como del conjunto de componentes y de las interfaces entre las redes (hogar, acceso, núcleo, contenido). Es importante recalcar que se hace una estimación del comportamiento de interacción entre los diferentes módulos y servicios que componen el sistema IPTV/EPON, para obtener una aproximación de la arquitectura final.

Para el cumplimiento de esta regla se definen las siguientes actividades:

- Es importante hacer uso de una herramienta software de simulación tal como OptSim, para analizar el comportamiento de la red de acceso en presencia de tráfico IPTV en diferentes esquemas de prestación de servicio, tal como se realizará en el **capítulo 4**.
- Obtener licencias necesarias para la operación de servicios de televisión, teniendo en cuenta la regulación definida por la CRT y la CNTV en Colombia (**sección 3.6**).
- Gestionar con los proveedores de contenido y de enlaces la obtención de las señales de televisión, Internet y voz, necesarias en el sistema.
- Seleccionar los proveedores de equipos teniendo en cuenta el cumplimiento de los criterios técnicos tratados en la **sección 3.4.3**, la interoperabilidad entre ellos, la calidad y los costos.
- Llevar a cabo un estudio piloto con una muestra de usuarios para observar la concurrencia en los servicios, el cumplimiento de los requerimientos de calidad de servicio y calidad de la experiencia y determinar el comportamiento de la red y los servicios ofrecidos.
- Implementar la planta externa y la oficina central de acuerdo con la **sección 3.3.2.9**.

Posteriormente a la implementación y puesta en marcha de la red IPTV/EPON, se deben realizar actividades con la operación y mantenimiento de la misma, con el fin de brindar soporte al cliente y realizar los ajustes necesarios para su correcto funcionamiento. Además, para propósitos de escalabilidad, se hace necesario contar tanto con actualizaciones del software, hardware, protocolos y estándares, como con proyecciones de capacidad y disponibilidad de la red, así como también hay que tener en cuenta las comunicaciones del cliente con el soporte técnico con el fin de detectar falencias del servicio y aplicar los correctivos necesarios.



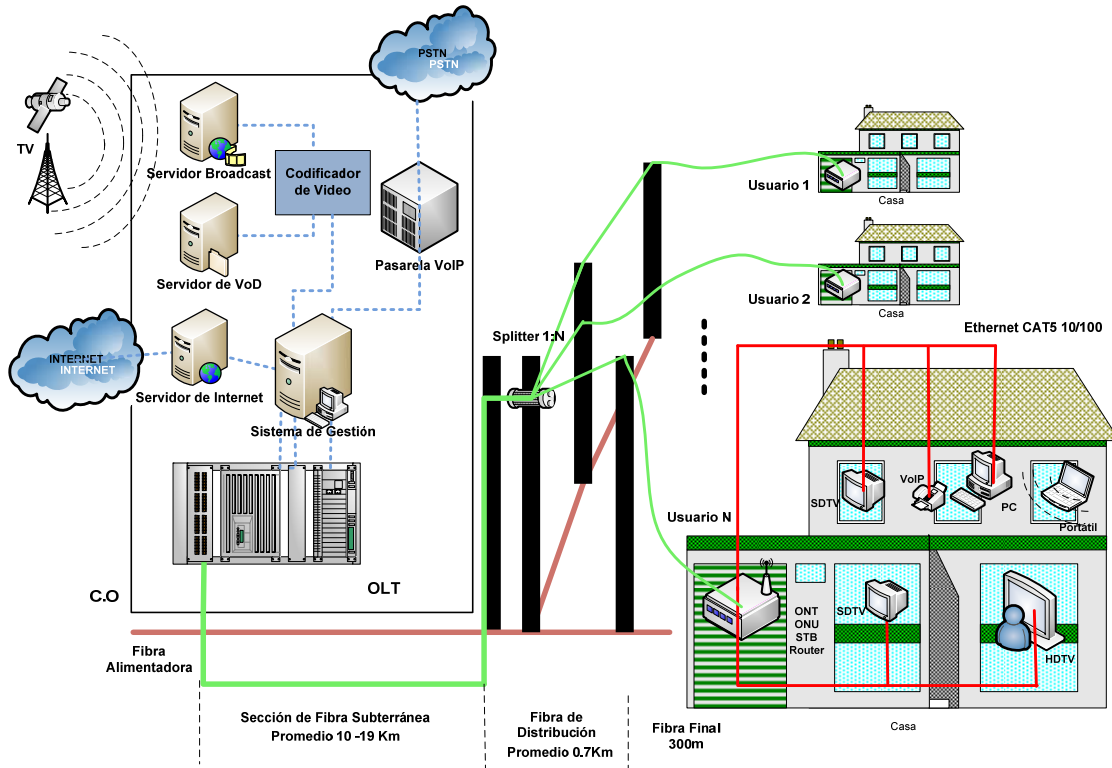


Figura 3.9. Arquitectura de una red de acceso EPON para prestar el servicio IPTV.

En este capítulo se han definido las etapas de planeación de una red de acceso y una serie de criterios que han servido como plataforma para la elaboración de las reglas de ingeniería para la implementación de sistemas IPTV/EPON, dando cumplimiento al objetivo específico **literal c** del anteproyecto y que en conjunto con el **capítulo 4**, en el cual se hace la simulación del sistema propuesto, permiten la consecución del objetivo general del proyecto de dimensionamiento de una red de acceso EPON para la prestación del servicio IPTV en Colombia.

## 4. SIMULACIÓN A NIVEL FÍSICO DE UNA RED DE ACCESO EPON, PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO IPTV

Como complemento al estudio realizado en los capítulos anteriores, en esta sección se concreta el objetivo específico del **literal b** del anteproyecto: **“Determinar el comportamiento y desempeño de parámetros técnicos (Retardo, Jitter, BER, entre otros) en un sistema IPTV/EPON mediante una herramienta de simulación en una arquitectura FTTH”**, llevando a cabo un estudio previo de las características de las herramientas de simulación que puedan resultar adecuadas y que estén disponibles para la implementación de la red de acceso EPON; posteriormente, se definen los escenarios de prestación de servicio y se simulan a nivel físico, obteniendo como resultado parámetros de desempeño de la red como son: Desempeño de Códecs de video, BER, Potencia de Transmisión, *Jitter* (analizado mediante el diagrama del ojo), señal transmitida y señal recibida. Con la consecución del objetivo específico **literal b**, junto con los objetivos concretados en los capítulos anteriores se cumple con el objetivo general del proyecto: **“Dimensionar una red de Acceso EPON en la que se preste el servicio de IPTV en Colombia”**.

### 4.1 Estudio de las herramientas de simulación

En el entorno de la simulación es posible encontrar una clasificación del tipo de herramientas de simulación, entre las cuales están aquellas cuya finalidad principal es evaluar una tecnología en particular a nivel físico (PHY en modelo de referencia OSI); y por otra parte están las herramientas que si bien abarcan este nivel, hacen mayor énfasis sobre los niveles de enlace, red y transporte [61].

Matlab, por ejemplo, es una herramienta que permite analizar detalladamente el comportamiento de un diseño considerando aspectos reales. En cambio, herramientas de software libre como NS-2 (Network Simulator 2) y NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) permiten obtener resultados relacionados con parámetros como jitter, retardo, ancho de banda, throughput, entre otros, sobre niveles superiores, pero que carecen de la opción de simular ambientes con condiciones reales, por lo cual los diseños que se simulan en este tipo de herramientas se consideran de alguna manera independientes del aspecto físico.

La simulación resulta ser una herramienta muy potente para conocer el comportamiento de un sistema cuando se varían determinados parámetros, y por lo tanto para analizar las prestaciones de la red de acceso de nuestro interés, por lo cual, es necesario acudir a estas herramientas con el fin de recrear un modelo muy cercano a la realidad en cuanto a las características que son de interés para este proyecto y así comparar y analizar la información teórica que se ha estudiado en los anteriores capítulos con los resultados obtenidos mediante la simulación [62].

Es claro que resulta muy útil contar con este tipo de herramientas ya que se deben tener en cuenta muchos factores que alteran el funcionamiento de la red y que resultaría muy complejo de realizar mediante procesos matemáticos. Además, éstas permiten ventajas como el aumento en la productividad en el desarrollo de redes y la subsecuente disminución de costos de producción, el

mejoramiento de la calidad del producto al incluir etapas de pruebas, y el análisis de sistemas complejos.

Teniendo en cuenta las ventajas del uso de herramientas de simulación en redes de telecomunicaciones, la simulación de la red de acceso EPON para prestar el servicio IPTV planteada en este proyecto, busca [63] - [65]:

- En general, hacer un modelo de red conforme a los parámetros a medir y concretar los escenarios definidos en este proyecto.
- Simular los nodos de la red: OLT y ONU, según el estándar EPON 802.3ah.
- Aprender el comportamiento de la red en distintos escenarios y con diferentes servicios.
- Hacer un ajuste de los parámetros de funcionamiento de la red, variando los valores típicos hacia valores extremos, con el fin de obtener los datos máximos a los cuales se presta el servicio con determinados niveles de calidad.

#### 4.1.1 Herramientas de Simulación de redes

A continuación se hace una reseña de las herramientas de simulación que se consideraron para evaluar el desempeño de la red de acceso propuesta en este trabajo y la consecuente elección de la más pertinente para el caso particular de estudio.

##### 4.1.1.1 OPNET Modeler

Es una herramienta capaz de simular una amplia variedad de redes ofreciendo una forma efectiva de evaluar las prestaciones de una red de acceso, así como también el flujo de mensajes de datos, todo tipo de distribuciones de tráfico, paquetes perdidos, mensajes de control de flujo, caídas de los enlaces, estadísticas de todo tipo, entre otros. Además, OPNET es un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones, proporciona un acceso directo al código fuente, cuenta con un gran conjunto de librerías y redes ya resueltas, y permite obtener una amplia gama de resultados para optimizar cualquier proceso de red.

Este simulador se basa en un modelado orientado a objetos, y utiliza una interfaz gráfica que facilita la creación de redes empleando módulos que representan componentes reales de redes de telecomunicaciones [62].

OPNET al ser un software propietario, necesita de una licencia para poder utilizarse, lo cual lo hace costoso para ambientes universitarios, y a pesar de contar con una edición universitaria (OPNET IT Guru Academic Edition), ésta versión libre no cuenta con las mismas ventajas de la versión comercial, por lo cual presenta algunas limitaciones que impiden realizar una simulación con las características necesarias para la red de acceso EPON.

##### 4.1.1.2 NCTUns 3.0

El simulador y emulador de redes NCTUns 3.0 (*National Chiao Tung University Network Simulator*) es capaz de simular varios dispositivos y protocolos característicos de redes cableadas e inalámbricas y se basa en una metodología de simulación de reingreso de kernel lo cual le permite proveer muchas ventajas que los simuladores tradicionales como OPNET y NS-2 simplemente no pueden proporcionar, ya que hace uso de las pilas de protocolos TCP/IP que utiliza Linux aprovechando sus características de emulador por lo que le es posible generar datos de muy alta fidelidad como resultado de su simulación. Puede simular redes IP que incluyan nodos fijos y enlaces punto a punto, redes inalámbricas, redes celulares GPRS y redes ópticas. Además, cuenta con la capacidad de generar distintos tipos de tráfico a partir de la manipulación de comandos por parte de cada estación presente en la red. Una de sus grandes ventajas es que éste software es libre, con distribución de código abierto, pero lastimosamente no cuenta con librerías de simulación de redes Ópticas Pasivas [66].

### 4.1.1.3 NS-2

El simulador NS-2 o *Network Simulator-2* se basa en eventos discretos que son utilizados para el análisis e investigación de redes, por lo que ofrece múltiples facilidades para la simulación de redes TCP/IP, protocolos de enrutamiento y multicast sobre redes de cualquier tipo. Normalmente se complementa con Eurane, el cual adiciona tres nodos con funcionalidades que dan soporte a algunos canales de transporte. Este simulador trabaja en modo de consola, lo cual dificulta la simulación de redes complejas. Posee Licencia Pública General (*General Public Licence*, GPL), lo cual impulsa el desarrollo libre del mismo, y se apoya en dos lenguajes de programación para su correcto funcionamiento: OTcl, a través del cual el usuario introduce las especificaciones del escenario que desea analizar; y C++, en el cual se encuentran la implementación de los protocolos. Como resultado de las simulaciones se obtienen datos matemáticos para un estudio posterior, o trazas específicas que pueden visualizarse en la herramienta de Animación de Red (*Network Animator*, NAM) de este simulador. El NS-2 carece de un módulo adecuado para la simulación de redes ópticas y desafortunadamente tampoco implementa librerías para EPON [66].

### 4.1.1.4 VPI Photonics

Otra herramienta considerada es VPIphotonics que constituye una división de VPIsystems y maneja un software de automatización de diseño óptico (PDA – *Photonic Design Automation*) para componentes, sistemas de transmisión y redes. Los productos abarcan todas las herramientas software de simulación, configuración y optimización requeridas para diseñar, desarrollar, comparar (con referencia a un producto similar) y configurar el equipo óptico y las soluciones de red.

El software VPI presenta gran innovación a través de la cadena de valor del ancho de banda, desde la investigación y desarrollo de los componentes ópticos y sistemas de transmisión de DWDM hasta su configuración y despliegue en las soluciones de red optimizadas. La integridad técnica de los productos y servicios son reconocidos por el premio de Excelencia de Ingeniería de la Sociedad Óptica de América.

Además, VPIphotonics maneja herramientas de ingeniería para componentes activos y pasivos, sistemas y enlaces, así como el suministro de módulos software para diseñar, verificar y evaluar componentes activos y pasivos, amplificadores de fibra, sistemas de transmisión DWDM y redes de acceso de banda ancha [67].

### 4.1.1.5 OptiSystem

OptiSystem [68] es una herramienta de simulación para sistemas de comunicación ópticos, que ofrece el diseño, pruebas y optimización de cualquier tipo de enlace óptico en el nivel físico de un amplio espectro de redes ópticas, desde sistemas de video broadcasting analógicos hasta backbone intercontinental. Su amplio rango de aplicaciones incluye:

- Diseño y planeación de sistemas de comunicación óptica desde el nivel físico hasta el nivel de componentes del sistema.
- Diseño de redes CATV o TDM/WDM.
- Diseño de anillos SONET/SDH.
- Diseño de transmisor, canal, amplificador y receptor.
- Diseño del mapa de dispersión.
- Estimación de la BER y parámetros del sistema con diferentes modelos.

Constituye un simulador a nivel de sistema basado en modelado real de sistemas de comunicación óptica, que cuenta con una definición jerárquica de componentes y sistemas, y con

una extensión de sus capacidades cuando se adicionan componentes de usuario e interfaces para un amplio rango de las herramientas usadas. Una interfaz de usuario gráfica controla los diseños de los componentes ópticos, los modelos de los componentes y la presentación gráfica. Incluye una extensa librería de componentes activos y pasivos.

En su última versión, OptiSystem 6, ésta herramienta presenta unas mejoras dirigidas al diseño de redes ópticas pasivas (PON) en arquitectura FTTx, óptica de espacio libre (OWC – *Optical Wireless Communications*), y radio sobre fibra óptica (ROF – *Radio Over Fiber system*).

A pesar de las ventajas de esta herramienta no fue posible adquirir su licencia, lo que imposibilitó el trabajo con la misma.

#### 4.1.1.6 OptSim

Por último, se considera OptSim, un software desarrollado por *RSoft Design Group, Inc*, que representa un avanzado paquete de simulación de sistemas de comunicación óptica tales como WDM, DWDM, TDM, CATV, LANs ópticas y otros sistemas ópticos emergentes, siendo posible evaluar el desempeño de acuerdo a varios parámetros dados. OptSim combina la exactitud y un modelado potente con la facilidad de uso de las plataformas Windows y UNIX. Las características de este software son extraídas de la guía de usuario [69].

OptSim está conformado por un set de bloques interconectados, donde cada bloque representa un componente o subsistema en el sistema de comunicación. De la misma manera que en un sistema de comunicación del mundo real las señales físicas transitan entre los componentes, en la simulación con OptSim la señal de datos es pasada entre los modelos de componente. Cada uno de los bloques es simulado independientemente usando los parámetros especificados por el usuario para cada bloque y la señal de la información pasada a éstos desde otros bloques. Esto se conoce como metodología de simulación orientado a bloques. Los bloques se representan gráficamente como iconos, e internamente como estructuras de datos y algoritmos numéricos sofisticados.

OptSim cuenta con una extensa librería de modelos de componente de los más comúnmente usados para la ingeniería de sistemas electro-ópticos, incluye además una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva y sofisticada, además de una doble máquina de simulación, y poderosas herramientas de análisis de resultados y de post-procedimientos.

**Doble máquina de simulación:** La doble máquina de simulación soporta dos métodos de simulación complementarios. La máquina de simulación en modo bloque (*block mode*) que realiza simulaciones en las cuales la señal de datos pasada entre los componentes representa el tiempo simulado total en un bloque de datos. La ventaja de este modelo es que los modelos de componentes y algoritmos pueden trabajar fácilmente con la señal total transformándola de una parte a otra entre los dominios de tiempo y frecuencia para operar con los datos en el dominio más conveniente para el algoritmo de simulación. La máquina de simulación en modo de muestras realiza simulaciones en las cuales la señal de datos pasada entre los componentes representa una sola muestra o paso de tiempo a la vez. A diferencia del modo en bloques donde un único modelo de componente puede pasar datos únicamente a otro modelo de componente una vez durante el curso de la simulación, cubriendo el tiempo simulado total en un solo bloque de datos, en el modo de muestras (*sample mode*) un modelo de componente pasará nuevas muestras de datos a otro modelo de componente a cada paso de tiempo en la simulación. Una ventaja de éste método es que la simulación puede ser realizada sobre una cantidad ilimitada de tiempo simulado cubriendo una longitud de secuencia transmitida ilimitada. En este modo, el procesamiento de la señal es hecho completamente en el dominio del tiempo.

**Análisis de Resultados y post-procedimientos:** OptSim cuenta con capacidades de análisis de desempeño (por ejemplo, Factor Q, BER, espectro de potencia, analizador de señal,

diagrama del ojo) con una selección completa de herramientas de medida (*jitter*, abertura del ojo, espectro eléctrico/óptico, fase/frecuencia óptica instantánea, potencia, entre otros). Los resultados de la simulación incluyen gráficas de las formas de onda de la señal y diagramas del ojo de cualquier punto dentro del sistema de comunicaciones óptico, y gráficas de la BER (*Bit Error Rate*) vs varios parámetros dentro del sistema tal como la potencia óptica recibida. También están disponibles otros resultados de simulación como el espectro de la señal, saltos de frecuencia, potencia y planos de dispersión. OptSim realiza análisis de los efectos de ruido, *crosstalk*, *jitter*, bifurcaciones (*skew*), y variaciones en los parámetros de componente.

**Entorno CAD:** OptSim dispone de un diseño de topología jerárquica orientada a objetos para una definición directa de las topologías del sistema. Cada componente es representado por un icono en la topología y cuenta con sus propios parámetros que pueden incluir valores numéricos. Los parámetros de los componentes pueden ser probados antes de correr la simulación, lo que permite que los parámetros de los componentes sean especificados fácilmente.

**Modelos de componentes:** OptSim incluye más de 600 modelos de componentes para la mayoría de los componentes ópticos, opto-electrónicos, y electrónicos más comunes en los sistemas de comunicación ópticas. Estos modelos caen generalmente dentro de varias categorías importantes, desde generadores de señal, transmisores, fibra y guías de onda, filtros ópticos y multiplexores, amplificadores ópticos, receptores, y varios componentes eléctricos tales como filtros eléctricos y amplificadores.

**Redes de acceso FTTH/PON:** OptSim incluye el diseño de redes de acceso FTTH/PON para simular sistemas de comunicación ópticas. El empleo de redes PON para acceso con arquitectura FTTH es muy usado en la entrega de los servicios *Triple-play* desde los proveedores de servicio hasta los hogares y negocios de los usuarios. OptSim cuenta con una extensa librería de componentes, precisión y flexibilidad en el diseño y modelamiento de numerosas aplicaciones tales como CATV, sistemas CWDM/DWDM, Ethernet, etc. La capacidad de análisis estadístico de OptSim permite estudiar los sistemas FTTH y sus variaciones.

#### 4.1.2 Comparación de herramientas de simulación óptica más importantes

A continuación, en la **Tabla 4.1**, se presenta una comparación entre las herramientas de mayor disposición para contar con un punto de referencia de la escogencia de la herramienta y para complementar la información obtenida anteriormente [70].

CAPACIDADES Y CARACTERÍSTICAS	RSoft: OptSim	Optiwave: OptiSystem	VPI VPI Systems
INNOVACIONES CIENTÍFICAS Y MADUREZ COMERCIAL	Los modelos y máquinas de simulación se basan en muchos años de investigación científica y técnicas propietarias innovadoras. Investigación, desarrollo y validación aprobados por diferentes organismos como: NIST ATP, US Navy SBIR, SBTR, OIF/ITU-T G.959.1 y grupo IEEE LRM. Comercializado desde 1997.	Relativamente nuevas en el mercado.	

<p><b>MÁQUINAS DE SIMULACIÓN</b></p>	<p>El usuario puede escoger la máquina de simulación en modo de bloque o en modo de muestras para trabajar. El modo de muestras es mucho más eficiente para largos intervalos de tiempo simulados, y no tiene límites en el número de bits que pueden ser simulados.</p>	<p>Sólo disponen de una máquina de simulación basada en el método de Fourier split-step. Utilizan mucho overhead y recursos de memoria para simulaciones de secuencias de bits grandes.</p>	
<p><b>NÚMERO DE MODELOS Y LIBRERÍAS DE COMPONENTES</b></p>	<p>Más de 600 modelos. Componentes de vendedores certificados y componentes comerciales de estantería como fibras, transmisores, receptores, etc.</p>	<p>Aproximadamente 200 modelos. Librería de componentes comerciales limitada. No cuenta con componentes de vendedores certificados.</p>	<p>Aproximadamente 300 modelos. Librería de componentes comerciales.</p>
<p><b>TRANSMISORES Y RECEPTORES</b></p>	<p>Flexibilidad en el uso de modelos compuestos para transmisores y receptores o para construir los propios usando modelos discretos. Módulos de transmisor y receptor para una variedad de esquemas de modulación incluyendo RZ, NRZ, CRZ, CSRZ, duobinarios, BPSK, DPSK, QPSK, FSK, MQAM, etc.</p>	<p>Opciones limitadas en modelos compuestos y discretos. Transmisores para esquemas de modulación básicos incluyendo RZ y NRZ.</p>	
<p><b>ESTIMACIÓN DE LA BER</b></p>	<p>Además de los métodos Quasi-analíticos y Monte Carlo para la estimación de la BER, OptSim soporta la técnica Karhunen-Loeve (KL) donde el ruido puede ser diferente para diferentes bits, muy útil en sistemas DPSK y DQPSK</p>	<p>No soporta la técnica Karhunen-Loeve (KL).</p>	
<p><b>FIBRA ÓPTICA</b></p>	<p>Más de 40 modelos de fibras comerciales (SMF, DSF, NZDSF, DCF, etc.) Disponibles en las librerías de componentes. El usuario puede activar/desactivar varios efectos lineales (dispersión,</p>	<p>Librería de componentes muy limitada e inflexible. Sin opciones para activar/desactivar varios efectos lineales y no lineales. No soporta el efecto de Stimulated Brillouin Scattering (SBS). Opciones limitadas para</p>	<p>Librería de componentes muy limitada e inflexible. Sin opciones para activar/desactivar varios efectos lineales y no lineales. Opción para modelar el efecto de Stimulated Brillouin Scattering (SBS). Coeficientes de dispersión</p>

	atenuación, PMD) y no lineales (FWM, SPM, XPM, Raman).	cálculos de dispersión y cálculos de dispersión solamente hasta $\beta_3$ . No permite el método de Split-step en el dominio del tiempo.	solamente hasta $\beta_3$ . No permite el método de Split-step en el dominio del tiempo.
<b>AMPLIFICADORES ÓPTICOS</b>	Modelos físicos detallados de EDFA bidireccionales (estáticos y dinámicos) y EYDFA (estáticos y dinámicos) con opciones para esquemas de reciclaje del bombeo de la señal, modelamientos complejos, etc, Amplificador Raman con bombeo bidireccional para configuración de amplificación aglomerada y distribuida.	Disponible con opciones limitadas y dificultad de uso. Dispone del modelo del amplificador Raman.	
<b>ÓPTICA DE ESPACIO LIBRE</b>	Incluye modelos de óptica de espacio libre.	No cuentan con este modelo.	
<b>BEST FIT LASER TOOLKIT™ Y ELECTRICAL CIRCUIT MODEL GENERATOR™</b>	Con el <i>Best Fit Laser Toolkit</i> se puede simular los parámetros físicos de la ecuación del láser con los parámetros disponibles en los data sheets.	No tienen tales herramientas y capacidades.	
<b>APLICACIONES DE USUARIO AMIGABLES</b>	Aplicaciones para ayudar a crear modelos de usuario e interfaces de MATLAB amigables para el usuario.	No cuentan con esas aplicaciones, dificultando la adición de nuevos modelos y el uso de interfaces con herramientas de terceros.	
<b>INTERFACES CON HARDWARE Y SOFTWARE EXTERNOS</b>	Puede intercambiar datos con equipo de laboratorio como el analizador de espectro óptico 86146B de Agilent y el analizador de vectores ópticos (OVA) de Luna. Co-simulación con MATLAB, Agilent EEsof, SPICE, Cadence Spectre, Synopsys HSPICE, BeamPROP, LaserMOD, GratingMOD, y el Essential MacLeod.	Soporte limitado para equipo de laboratorio. Interfaces limitadas y complejas y únicamente para MATLAB y SPICE.	Soporte limitado para equipo de laboratorio. Interfaces limitadas y complejas y únicamente para MATLAB. Interfaz limitada con herramientas EDA.
<b>POSICIONAMIENTO EN EL MERCADO</b>	Líder del mercado en gran parte de	Relativamente Nuevo y en un mercado muy limitado.	Mercado y canales de distribución limitados.



	Estados Unidos, Europa y Asia. Ganador del premio a la mejor herramienta de diseño en el Lightwave's OFC/NFOEC 2005 Oficinas de RSoft en USA, UK y Japón.	Asentado en Canadá con canales de distribución en algunos países.	
<b>SISTEMAS OPERATIVOS SOPORTADOS</b>	Windows y Linux.	Solamente Windows.	Windows y Linux limitado para la máquina de simulación.

Tabla 4.1. Comparación de OptSim con otros programas [70].

### 4.1.3 Selección de la herramienta de simulación

Algunas herramientas de las mencionadas resultan interesantes y adecuadas para el desarrollo de éste trabajo, como es el caso de OPNET, pero debido a temas relacionados con licencias, costos y ausencia de modelos/librerías de redes EPON, resulta muy difícil hacer uso de ellas. Dicho esto, y gracias a que RSoft Design brindo a la Universidad del Cauca una llave hardware y una licencia de evaluación de 30 días, se utilizó OptSim como la herramienta de simulación bajo la cual se implementó a nivel físico la red de acceso de este proyecto para brindar servicios tipo triple play, con IPTV incluido, en sentido downstream y upstream. La **Figura 4.1** muestra la pantalla de inicio de OptSim, la interfaz de usuario de la herramienta, y la ventana de definición de parámetros globales [71].

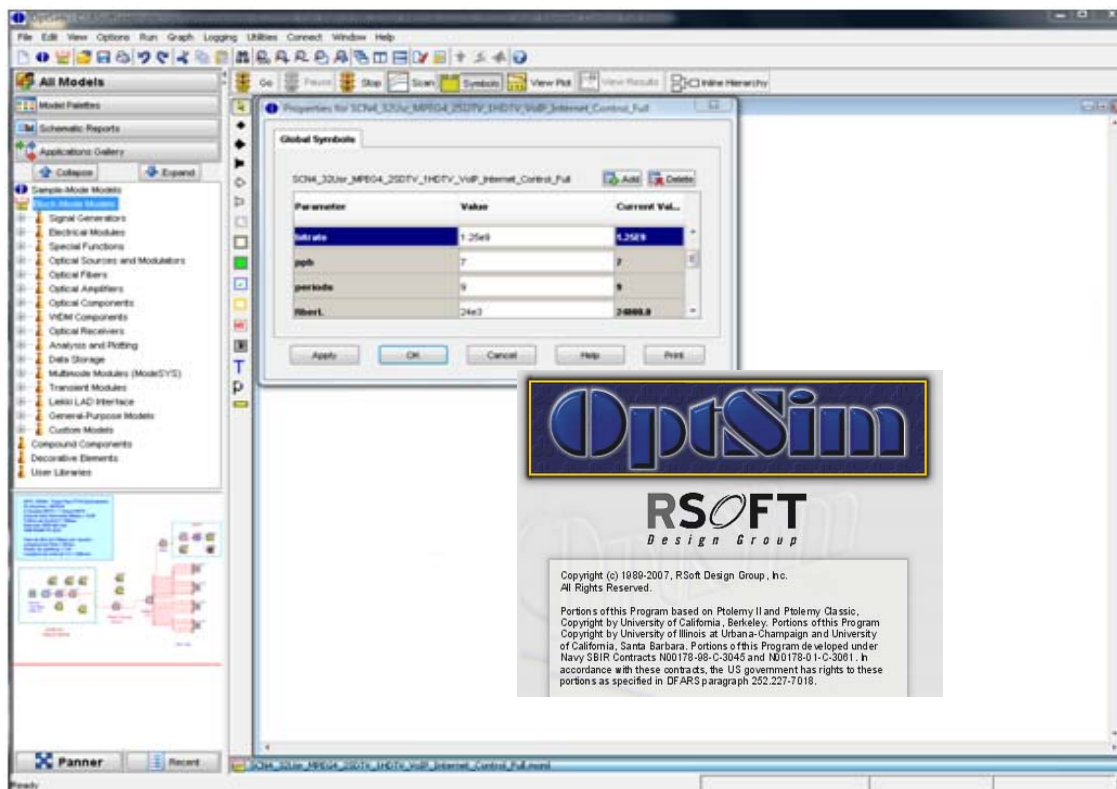


Figura 4.1. Pantalla de inicio de OptSim.

## 4.2 Definición de la simulación: Red de acceso EPON en arquitectura FTTH

Se considera un diseño típico de red de acceso EPON en configuración FTTH (fibra hasta la ubicación del usuario), con 8/16/32 suscriptores, 20 Km de alcance y con topología en forma de árbol.

La red EPON especificada por el estándar IEEE 802.3ah soporta Ethernet a una tasa de bits de 1.25 Gbps de velocidad de línea [27]. Debido al encapsulamiento de la información, a la información de los planificadores, a los encabezados propios del estándar y al control de asignación de ancho de banda dinámico, la eficiencia de una red EPON está entre 83.63% (*upstream*) y 91.58% (*downstream*) [42]. Para propósitos de esta simulación se considera el peor de los casos, aproximando el valor de la eficiencia a 82% (por tratarse de redes con velocidad *up/down* simétrica), es decir, un ancho de banda de línea disponible de 1.025Gbps.

Debido a la implementación de codificación de línea 8B/10B [25], esta velocidad se traduce en un ancho de banda máximo de 820Mbps para la carga útil y el ancho de banda restante (180Mbps) corresponde a información de overhead. La **Tabla 4.2** resume estos planteamientos.

Generalizando estos dos conceptos se puede decir que el overhead corresponde aproximadamente al 22% de la tasa de bits de la carga útil, esto para cálculos de ancho de banda en la simulación.

Ancho de banda	Valor
Máximo de línea	1.25Gbps
Sin codificación 8B/10B	1Gbps
Teniendo en cuenta la eficiencia	820Mbps de Carga útil 180Mbps de Overhead

**Tabla 4.2. Consideraciones de ancho de banda en redes EPON.**

Los componentes utilizan una longitud de onda de 1490nm en *downstream* y 1310nm en *upstream*, para la PMD 1000BASE PX-20D [27].

Para la simulación en sentido *downstream*, primero se configura la oficina central (OLT) y un solo usuario final (ONT), luego se generaliza para 8, 16 y 32 usuarios, haciendo uso de elementos pasivos para su interconexión, además se considera lo siguiente:

- El componente de Internet de alta velocidad, voz sobre IP y tráfico de control se considera como tráfico adicional del servicio triple play ya que no es de estricto interés en este proyecto.
- El componente de tráfico adicional (Voz, Datos) puede representarse como un solo servicio y puede combinarse con el componente de IPTV en las simulaciones a nivel físico de OptSim.
- Los flujos de IPTV son transmitidos usando Unicast, es decir un canal por cada usuario conectado a la red, esto simula el peor de los casos, algo que es altamente probable debido a los hábitos de los televidentes.

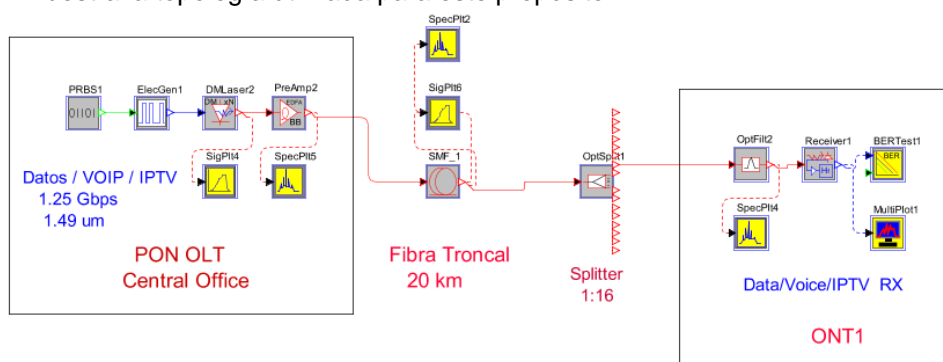
Los componentes o módulos de OptSim utilizados en la simulación de este proyecto se detallan en el **Anexo B.1**.

El bloque transmisor (OLT de la oficina central - CO) está modelado con un generador de datos pseudo-aleatorio (*Pseudo Random Binary Source* - PRBS) el cual simula la señal de datos (IPTV/VoIP/Internet) a determinada tasa de bits, un driver modulador eléctrico de NRZ que transforma la información lógica a una señal eléctrica, un láser directamente modulado que convierte la señal eléctrica de la fuente NRZ a señal óptica a determinada longitud de onda y con un nivel de potencia definido por la ecuación del láser, y un amplificador que eleva la señal a un

nivel óptimo para ser transmitida a través de la fibra. A continuación, las señales de datos/voz y video son enviadas hacia los usuarios a través de una fibra monomodo de 19 Km de longitud que llega hasta el *splitter* pasivo el cual tiene una relación de división de 1:8, 1:16 o 1:32, dependiendo del caso, este *splitter* divide la señal óptica que luego se entrega a los usuarios individuales ubicados en la red de distribución a una distancia máxima de 1Km del *splitter*.

El receptor u ONT está conformado por un filtro óptico sintonizado a 1490nm que elimina el ruido de la señal, un receptor PIN/TIA<sup>23</sup> (*Positive Intrinsic Negative/Telecommunications Industry Association*) que convierte la señal óptica a señal eléctrica y actúa como el eslabón final en la red de acceso.

Además, en la simulación se hace uso de diferentes instrumentos de medición como analizadores de señal, de diagrama del ojo y de espectro; medidores de la BER y *Multiploeters*<sup>24</sup>. La **Figura 4.2** muestra la topología utilizada para este propósito.



**Figura 4.2. Topología Red de Acceso EPON para 1 usuario.**

Después de que se especifican los detalles para un usuario, se puede generalizar para 16 y 32 usuarios; con el fin de simplificar el esquema se puede aplicar el modelo de jerarquías de OptSim que encapsula todo el ONT dentro de un solo elemento [69].

El estándar IEEE 802.3ah para una PMD 1000BASEX-20D (IEEE Std 802.3ah Sección 60.4), establece los parámetros que deben cumplir los elementos de la red EPON, tanto para transmisor (**Tabla 4.3**), como para receptor (**Tabla 4.4**) [27]. Los parámetros de todos los componentes son determinados de acuerdo a valores típicos establecidos en la guía de usuario de OptSim, los cuales ya están optimizados para suministrar el mejor desempeño en la red y son conformes con parámetros de fabricantes reconocidos.

Parámetro	1000BASE PX-20D	1000BASE PX-20U	Unidades
Tipo de Transmisor	Láser	Láser	
Velocidad de señal	1.25	1.25	Gbps
Longitud de onda	1480 - 1500	1260 - 1360	nm
Potencia máxima de transmisión	+7	+4	dBm
Potencia mínima de transmisión	+2	-1	dBm
Tiempo encendido	N/A	512	ns
Tiempo apagado	N/A	512	ns

**Tabla 4.3. Características de transmisión en 1000BASE PX-20D y 1000BASE PX-20U [27].**

<sup>23</sup> Su nombre viene de que se componen de una unión P-N y entre esa unión se intercala una nueva zona de material intrínseco (I), la cual mejora la eficacia del detector. Se utiliza principalmente en sistemas que permiten una fácil discriminación entre posibles niveles de luz y en distancias cortas.

<sup>24</sup> Elemento que realiza mediciones de Diagrama del Ojo, BER, Espectro de potencia y señal, utilizando un solo elemento con varios componentes internos.

Parámetro	1000BASE PX-20D	1000BASE PX-20U	Unidades
Velocidad de señal	1.25	1.25	Gbps
Longitud de Onda	1260 - 1360	1480 - 1500	Gbps
BER Máxima	$10^{-12}$		
Potencia máxima promedio recibida	-6	-3	dBm
Sensitividad del receptor máxima	-27	-24	dBm
Umbral de decisión mínimo	-45	-44	dBm

Tabla 4.4. Características de recepción en 1000BASE PX-20D y 1000BASE PX-20U [27].

### 4.3 Definición de escenarios de simulación y resultados obtenidos en sentido downstream

#### 4.3.1 Escenario 1: Pruebas de Códecs de video

Es el escenario básico de simulación, tiene los elementos necesarios en una red EPON para realizar pruebas de desempeño de los códecs de video más importantes para un servicio de IPTV que son MPEG-2 y MPEG-4.

La topología utilizada en este escenario es la típica configuración de una red PON FTTH en forma de árbol para 8 usuarios que derivan del encapsulamiento del ONT representado en la Figura 4.3.

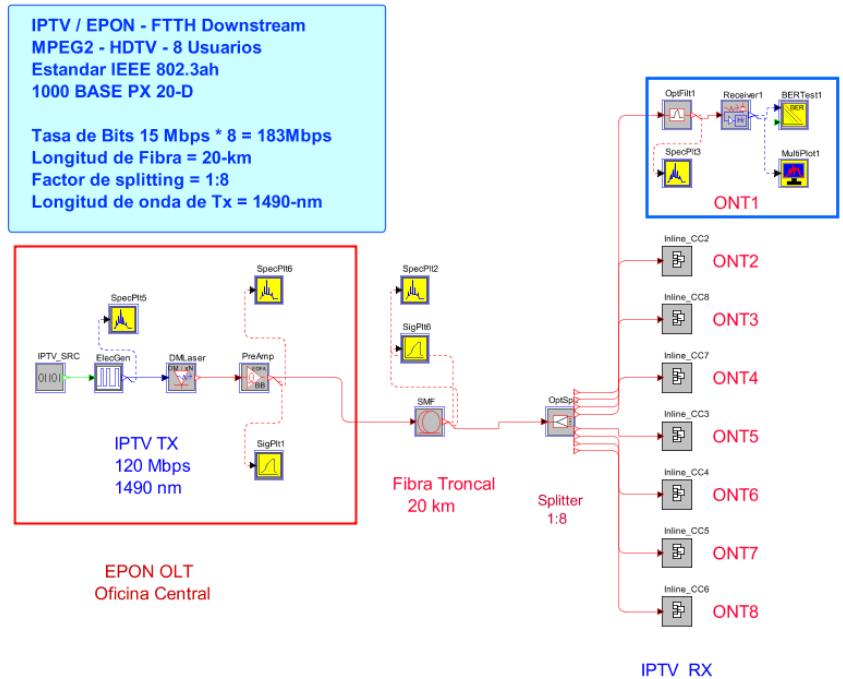


Figura 4.3. Topología Escenario 1.

- Una vez establecido el escenario básico, se procede a hacer una variación de las tasas de bits de transmisión correspondiente a los códecs MPEG-2 y MPEG-4 [29], para confirmar cual es el códec más apropiado y eficiente en la red.
- Hay que tener en cuenta que la red EPON utiliza codificación 8B/10B, por lo tanto por cada 8bits de datos se transmiten 10 de línea.
- También se debe considerar el overhead que se agrega a la información de carga útil, este parámetro se tiene en cuenta junto a la codificación 8B/10B al momento de definir las tasas de bits utilizadas en la simulación.

- Se asume que se transmite un solo canal tanto en formato SDTV como en formato HDTV, considerando las diferentes tasas de bits para cada códec.
- Se hacen las pruebas con ocho usuarios (ONT) ubicados a una distancia fija del OLT de 20Km, correspondiente a la distancia máxima para la PMD 1000BASE PX 20D (Canal *Downstream* a 1490nm).
- No se considera tráfico adicional (voz, datos y control).

Las tasas de bits empleadas en la simulación se detallan en la **Tabla 4.5**, estas velocidades son inyectadas a la red a través del generador de señal pseudo aleatoria PRBS, para calcular este valor se utiliza la siguiente ecuación con la cual se obtiene la velocidad de línea final, después de la adición de los respectivos encabezados y la codificación:

$$BW_{OLT} = \eta_{EPON} \left(\frac{10}{8}\right) (BW_{servicio})$$

$$BW_{OLT} = 0.82(1.25)(BW_{servicio})$$

$$BW_{OLT} = 1.525(BW_{servicio})$$

Donde,

$\eta_{EPON}$ : Eficiencia de la red EPON

$BW_{servicio}$ : Ancho de banda del servicio suministrado

Y la fracción 10/8 viene de la corrección del ancho de banda debida a la codificación 8B/10B.

Códec	Formato	Tasa de Bits mínima (Mbps)	Tasa de Bits máxima (Mbps)	ONT's	Canales	Tasa de Bits mínima en OLT (Mbps)	Tasa de Bits máxima en OLT (Mbps)
MPEG-2 ITU-T H.262	SDTV	3	5	8	1	36.6	61
	HDTV	15	30			183	366
MPEG-4 ITU-T H.264 AVC	SDTV	1.5	2.5			18.3	30.5
	HDTV	8	12			97.6	164.4

Tabla 4.5. Tasas de bits utilizadas en el escenario 1.

#### 4.3.1.1 Resultados del Escenario 1

Después de realizar la simulación para el Escenario 1 con OptSim se obtuvieron resultados de mediciones de potencia en diferentes puntos de la red (**Tabla 4.6**) y de medición de BER en los ONT (**Tabla 4.7**).

Código y formato	Tasa de Bits (Mbps)		Potencia de Tx		Potencia de Rx Splitter		Potencia Tx Splitter		Potencia Rx ONT	
	OLT <sub>línea</sub>	ONT <sub>efectivos</sub>	dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW
MPEG-2 -HDTV	183	15	3.99	2.51	-0.2	0.95	-9.23	0.11	-9.23	0.11
MPEG-2 -HDTV	366	30								
MPEG-2- SDTV	36.6	3								
MPEG-2- SDTV	61	5								
MPEG-4 -HDTV	97.6	8								
MPEG-4 -HDTV	164.4	12								
MPEG-4- SDTV	18.3	1.5								
MPEG-4- SDTV	30.5	2.5								

Tabla 4.6. Mediciones de niveles de Potencia en el escenario 1.

Teniendo en cuenta los valores de potencia de transmisión (**Tabla 4.3**) y sensibilidad del receptor (**Tabla 4.4**), se observa que los resultados de potencia de transmisión de 3.99dBm y de potencia recibida de -9.23dBm están dentro de los rangos definidos en el estándar IEEE 802.3ah.

Códec	Tasa de Bits (Mbps)	Promedio	Mínima	Máxima
MPEG-2 - HDTV	183	1.7945e-206	1.1009e-224	4.8789e-189
MPEG-2 - HDTV	366	9.1304e-222	7.7739e-242	2.0560e-202
MPEG-2 - SDTV	36.6	2.3692e-232	1.2919e-251	5.0668e-213
MPEG-2 - SDTV	61	1.6069e-211	2.6346e-229	1.8459e-194
MPEG-4 - HDTV	97.6	8.3698e-201	9.1185e-218	1.6159e-184
MPEG-4 - HDTV	164.4	3.6659e-206	1.3766e-224	1.5583e-188
MPEG-4 - SDTV	18.3	7.9009e-300	1.9763e-323	3.9360e-277
MPEG-4 - SDTV	30.5	1.2890e-235	2.5836e-256	8.4881e-216

Tabla 4.7. Mediciones de BER en el Escenario 1.

Estos resultados concuerdan con la BER para el estándar IEEE 802.3ah definidos en la **Tabla 4.4**. Hay que tener en cuenta que al transmitir con tasas de bits tan bajas a través de fibra óptica, los valores de BER son extremadamente pequeños, hasta 7e-300 en el caso de una tasa de bits de 18.3Mbps, por lo cual se puede afirmar que prácticamente no hay errores en la transmisión y que la fibra está siendo subutilizada.

Las gráficas de Señal, Espectro, Diagrama del Ojo y BER de los resultados del escenario 1 están contenidas en el **Anexo B.2.1**. Estas representan la señal y el espectro a la salida del OLT, la señal recibida en el ONT, el espectro a la salida del splitter, el diagrama del ojo y la BER en el ONT para las diferentes tasas de bits de los códecs MPEG-2 y MPEG-4. Las gráficas para MPEG-4 en formato HDTV a 164.4Mbps se detallan en la **Tabla 4.8**.

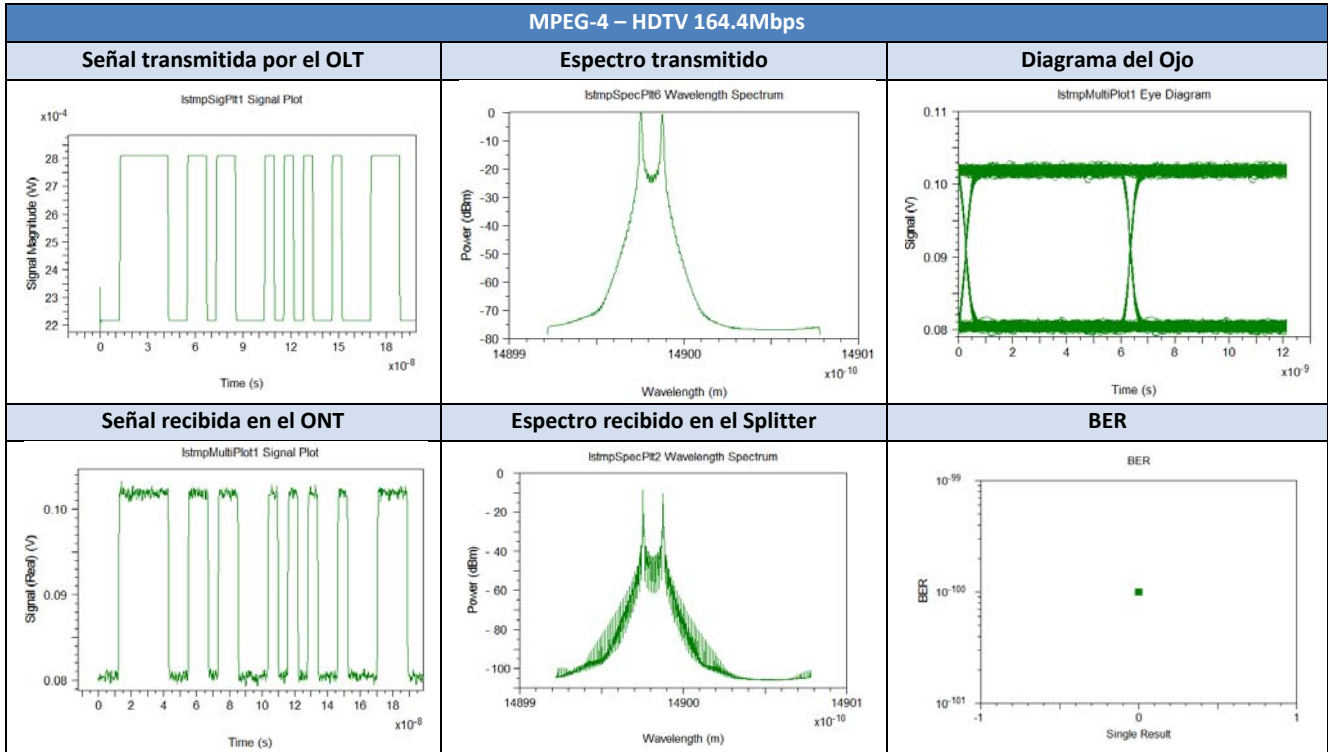


Tabla 4.8. Gráficas para MPEG-4 - HDTV – 164.4Mbps.

Analizando las gráficas de los resultados del escenario 1, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En el analizador de señales, en todas las tasas de bits se observa una señal recibida muy similar a la señal transmitida, esto debido al poco ruido producido en la fibra a bajas tasas de bits, lo cual indica que hay poca probabilidad de error en recepción, que se puede apreciar en las gráficas de la BER cuya respuesta es prácticamente cero.
- En el analizador de espectro, a medida que la tasa de bits aumenta el espectro de la señal se hace más estrecho y más definido en 1490 nm.
- Con respecto al diagrama del ojo, se aprecia una máscara bien definida que demuestra la inexistencia de ISI y Jitter, inclusive a velocidades muy bajas como 18.3 y 30.5 Mbps se ve un ojo casi perfecto, debido a la baja probabilidad de ocurrencia de errores (prácticamente cero), como queda demostrado en las gráficas de la BER para MPEG-2 (**Figura 4.4**) y para MPEG-4 (**Figura 4.5**)

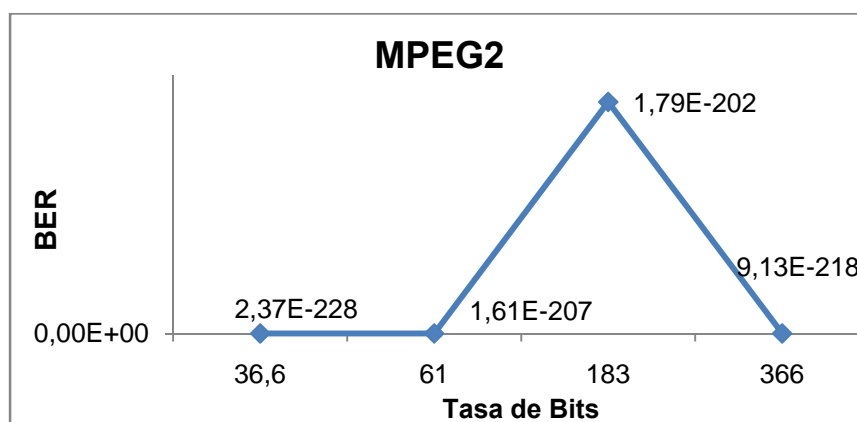


Figura 4.4. Gráfica BER para MPEG 2.

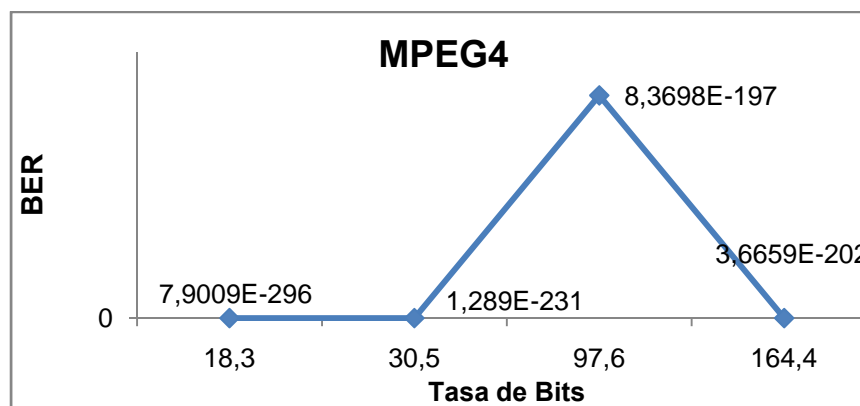


Figura 4.5. Gráfica BER para MPEG-4.

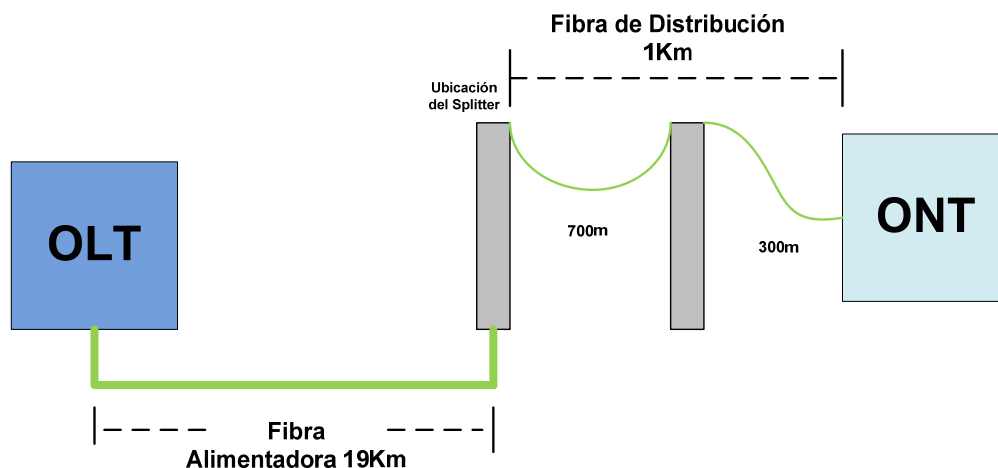
Gracias a los buenos resultados obtenidos en las pruebas y debido a que el códec MPEG-4 utiliza menos recursos de red, es posible atender con buena calidad a mas usuarios, por lo cual se concluye que el códec MPEG-4 es idóneo para prestar el servicio IPTV a través de una red EPON, esto ha sido ratificado por diferentes estudios internacionales e implementaciones en países como Japón<sup>25</sup>, Estados Unidos<sup>26</sup> y España<sup>27</sup>.

<sup>25</sup> <http://www.tvover.net/2006/06/06/NTT+Expands+IPTV+Rollout+With+TANDBERG+MPEG4+AVC+To+Support+ADSL+Customers+In+Japan.aspx>.

### 4.3.2 Escenario 2: Variación de distancias en los ONT

Después de seleccionar a MPEG-4 como el códec de mejor desempeño en una red de acceso EPON, en este escenario se procede a transmitir un solo canal o grupo multicast a 16 y 32 usuarios, tanto en formato SDTV como en formato HDTV y sin tráfico de voz y datos.

De la misma forma en que se encapsuló el ONT para 8 usuarios se genera la topología para 16 y 32 ONT's, además, se varía la distancia entre el splitter y las ONT en la red de distribución, de acuerdo con la recomendación de la NTT para instalación de redes FTTH, implementada en Japón, la cual estipula una distancia de 1000m en la red de distribución tanto aérea (postes) como interna (dentro de las casas) [24]. Las distancias manejadas en la planta externa se muestran en la **Figura 4.6**.



**Figura 4.6. Distancias en la planta externa de una red FTTH – EPON.**

En la **Figura 4.7** se muestra la topología utilizada para 16 usuarios, la longitud de la fibra desde el splitter a la ubicación de cada ONT se detalla en la **Figura 4.8**. Mientras tanto en la **Figura 4.9** se muestra la topología utilizada para 32 usuarios y en la **Figura 4.10** se detalla la longitud de la fibra para atender estos 32 usuarios. Estas mismas topologías se utilizan en los escenarios 3 y 4.

Se escogieron distancias de tal forma que se cubriera todo el rango de 1000 metros de los que dispone la red de distribución, con lo cual se llega hasta los 20Km definidos como máxima distancia entre OLT y ONT en el estándar de EPON.

No se realiza la simulación para 8 usuarios ya que al ser muy pocos la tasa de bits de transmisión en el ONT es muy baja, los valores de BER son extremadamente bajos y los recursos de red son subutilizados, lo cual quedó demostrado en las simulaciones del escenario 1.

<sup>26</sup> <http://www.iptv-watch.co.uk/14072007-sun-fire-servers-to-power-att-u-verse-iptv.html>.

<sup>27</sup> <http://www.adslayuda.com/n2533-Imagenio-migra-a-MPEG4.html>.



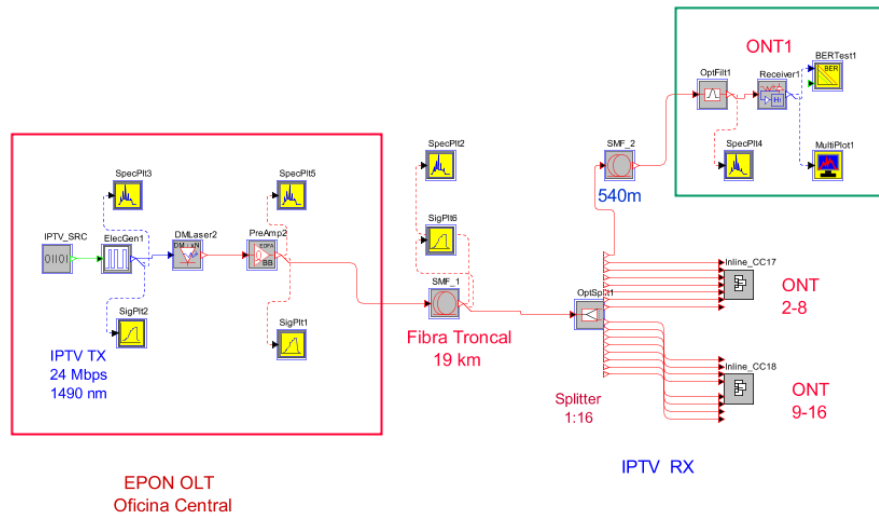


Figura 4.7. Topología para 16 usuarios.



Figura 4.8. Distancia de Ubicación de los ONT para 16 usuarios.

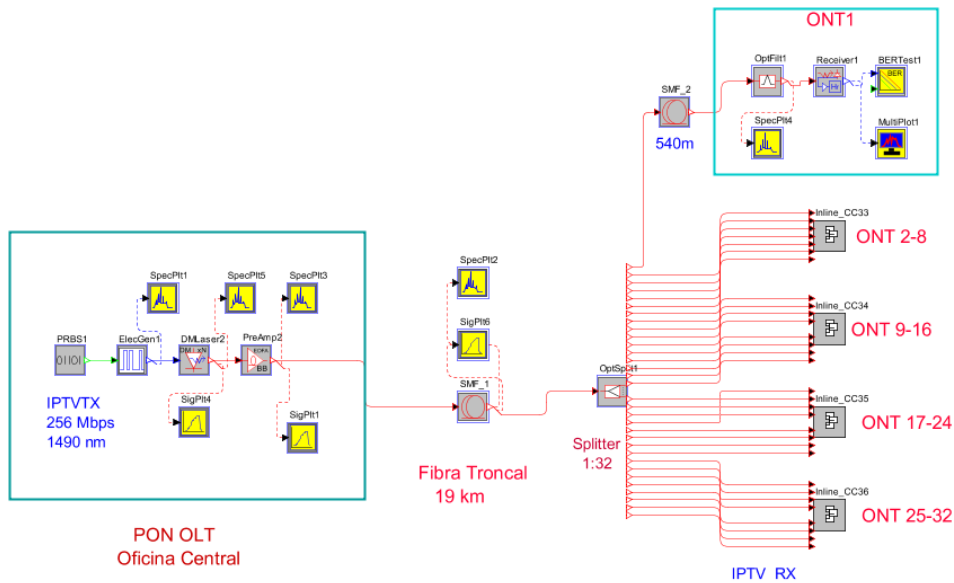


Figura 4.9. Topología para 32 Usuarios.



Figura 4.10. Configuración de distancias para 32 usuarios.

Las tasas de bits utilizadas en la simulación de este escenario se detallan en la **Tabla 4.9** y son inyectadas en la red por la PRBS, estos valores ya tienen en cuenta los encabezados y la codificación 8B/10B.

Códec	Formato	Tasa de Bits mínima (Mbps)	Tasa de Bits máxima (Mbps)	# ONT	Canales	Tasa de Bits mínima en OLT (Mbps)	Tasa de Bits máxima en OLT (Mbps)
MPEG-4 ITU-T H.264 AVC	SDTV	1.5	2.5	16	1	36.6	61
	HDTV	8	12			195.2	292.8
MPEG-4 ITU-T H.264 AVC	SDTV	1.5	2.5	32	1	73.2	122
	HDTV	8	12			390.4	585.6

Tabla 4.9. Tasas de Bits empleadas en el Escenario 2.

#### 4.3.2.1 Resultados del Escenario 2

Después de realizar la simulación para este escenario con OptSim se obtuvieron resultados de mediciones de potencia en diferentes puntos de la red (**Tabla 4.10**) tanto para 16 como para 32 usuarios, y de medición de potencia en los ONT para 16 usuarios (**Tabla 4.11**).

Número de usuarios	Código y formato	Tasa de Bits (Mbps)		Potencia de Tx		Potencia de Rx Splitter		Potencia Tx Splitter	
		OLTlínea	ONTefectivo	dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW
16	MPEG-4 - SDTV	36.6	1.5	3.99	2.51	0.009	1	-12.03	6.26E-5
	MPEG-4- SDTV	61	2.5						
	MPEG-4 - HDTV	195.2	8						
	MPEG-4 - HDTV	292.8	12						
32	MPEG-4 - SDTV	73.2	1.5					-15.04	3.13e-5
	MPEG-4 - SDTV	122	2.5						
	MPEG-4 - HDTV	390.4	8						
	MPEG-4 - HDTV	585.6	12						

**Tabla 4.10. Medidas de potencia en OLT y Splitter.**

Es preciso aclarar que la potencia de transmisión es independiente del número de usuarios que se atiende; ésta depende de los parámetros definidos en el láser que resuelven la ecuación del láser y de la ganancia introducida por el amplificador óptico, por lo tanto, este valor no varía en ningún escenario ya que se mantiene la misma configuración. Estos valores se encuentran en la **Tabla 4.10** para 16 y 32 usuarios.

Por otro lado, los niveles de potencia recibida en el ONT varían con el número de usuarios y la distancia a la cual se encuentran, pero no con la tasa de bits a la que se transmite, por lo tanto, para todos los escenarios se mantiene la potencia recibida si se mantiene la misma distancia y el número de usuarios. Para 16 usuarios los niveles de potencia se encuentran consignados en la **Tabla 4.11**.

Distancia desde el splitter (m)	Potencia Rx ONT	
	dBm	mW
60	-12.04	6.24e-5
120	-12.05	6.22e-5
180	-12.06	6.21e-5
240	-12.08	6.19e-5
300	-12.09	6.17e-5
360	-12.10	6.15e-5
420	-12.11	6.13e-5
480	-12.13	6.12e-5
540	-12.14	6.10e-5
600	-12.15	6.08e-5
660	-12.16	6.06e-5
720	-12.18	6.05e-5
780	-12.19	6.03e-5
840	-12.20	6.01e-5
900	-12.24	5.96e-5
1000	-12.22	5.99e-5

**Tabla 4.11. Medidas de potencia para 16 usuarios.**

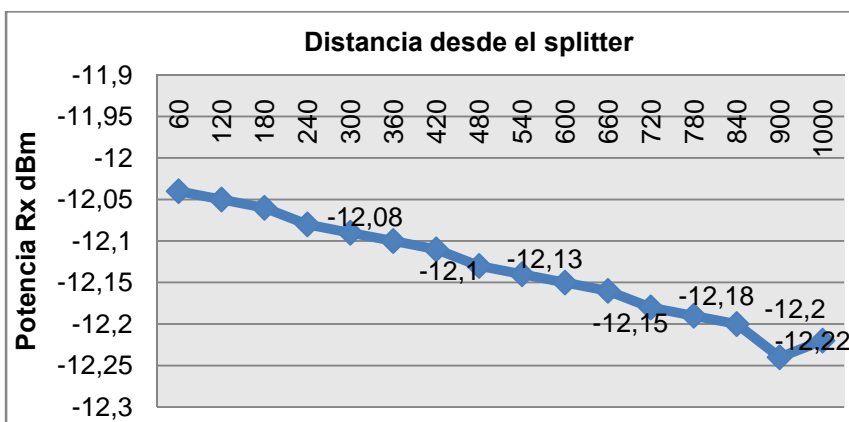


Figura 4.11. Potencia recibida en el OLT para 16 usuarios.

En la **Figura 4.11** se observan los niveles de potencia recibida en los 16 ONT's ubicados en los 1000 metros de la red de distribución. Se nota que la potencia es inversamente proporcional a la distancia de ubicación de la ONT desde el splitter y que en el peor de los casos (-12.22dBm) es mayor que el requerimiento de sensibilidad del estándar IEEE 802.3ah (-27dBm) indicado en la **Tabla 4.4**.

En el **Anexo B.2.2** se detallan las medidas y gráficas de la BER para diferentes tasas de bits, correspondientes a transmisión de IPTV en formatos SDTV y HDTV, así como los espectros en el ONT, en el splitter y el OLT, la señal en el OLT y en el ONT, la BER y el diagrama del ojo a diferentes distancias de ubicación del ONT con respecto al splitter para 16 usuarios. A continuación (**Tabla 4.12**) se detallan las mediciones de la BER para MPEG-4 en formato HDTV con una tasa de bits de 292.8Mbps, así como la gráfica de la BER para las diferentes distancias (**Figura 4.12**).

MPEG-4 - HDTV- 292.8 Mbps – 16 Usuarios			
Distancia desde el splitter (m)	BER		
	Promedio	Mínima	Máxima
60	5.2167e-079	2.0338e-086	7.9603e-072
120	1.3256e-078	5.3721e-086	1.8991e-071
180	3.3668e-078	1.4237e-085	4.5158e-071
240	8.5421e-078	3.7835e-085	1.0699e-070
300	2.1636e-077	1.0077e-084	2.5250e-070
360	5.4675e-077	2.6879e-084	5.9345e-070
420	1.3779e-076	7.1757e-084	1.3888e-069
480	3.4612e-076	1.9159e-083	3.2354e-069
540	8.6635e-076	5.1123e-083	7.5028e-069
600	2.1600e-075	1.3624e-082	1.7316e-068
660	5.3625e-075	3.6241e-082	3.9773e-068
720	1.3254e-074	9.6168e-082	9.0904e-068
780	3.2607e-074	2.5444e-081	2.0674e-067
840	7.9832e-074	6.7090e-081	4.6784e-067
900	1.9449e-073	1.7624e-080	1.0533e-066
1000	8.4820e-073	8.7320e-080	4.0284e-066

Tabla 4.12. BER para MPEG-4 - HDTV 292.8Mbps.

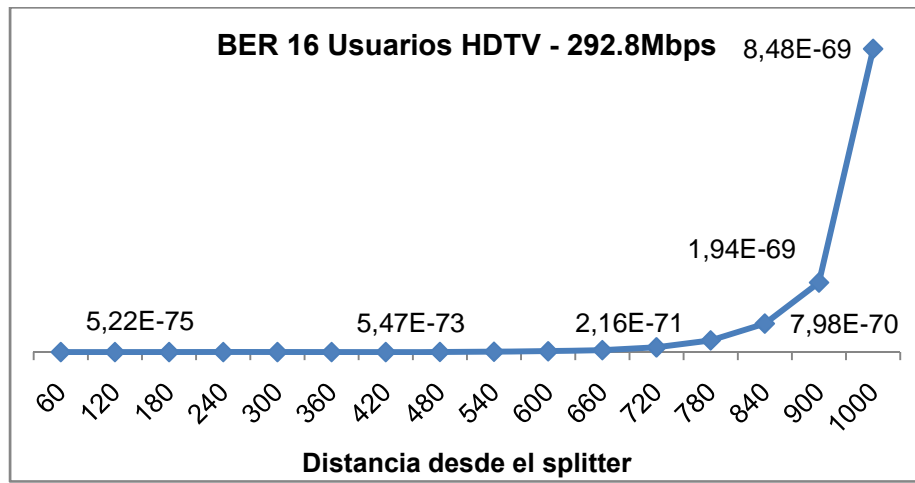


Figura 4.12. BER para MPEG-4 - HDTV 292.8Mbps.

La **Tabla 4.13**, muestra las Gráficas de Señal, Espectro, Diagrama del Ojo y BER para MPEG-4 formato HDTV a 292.8Mbps.

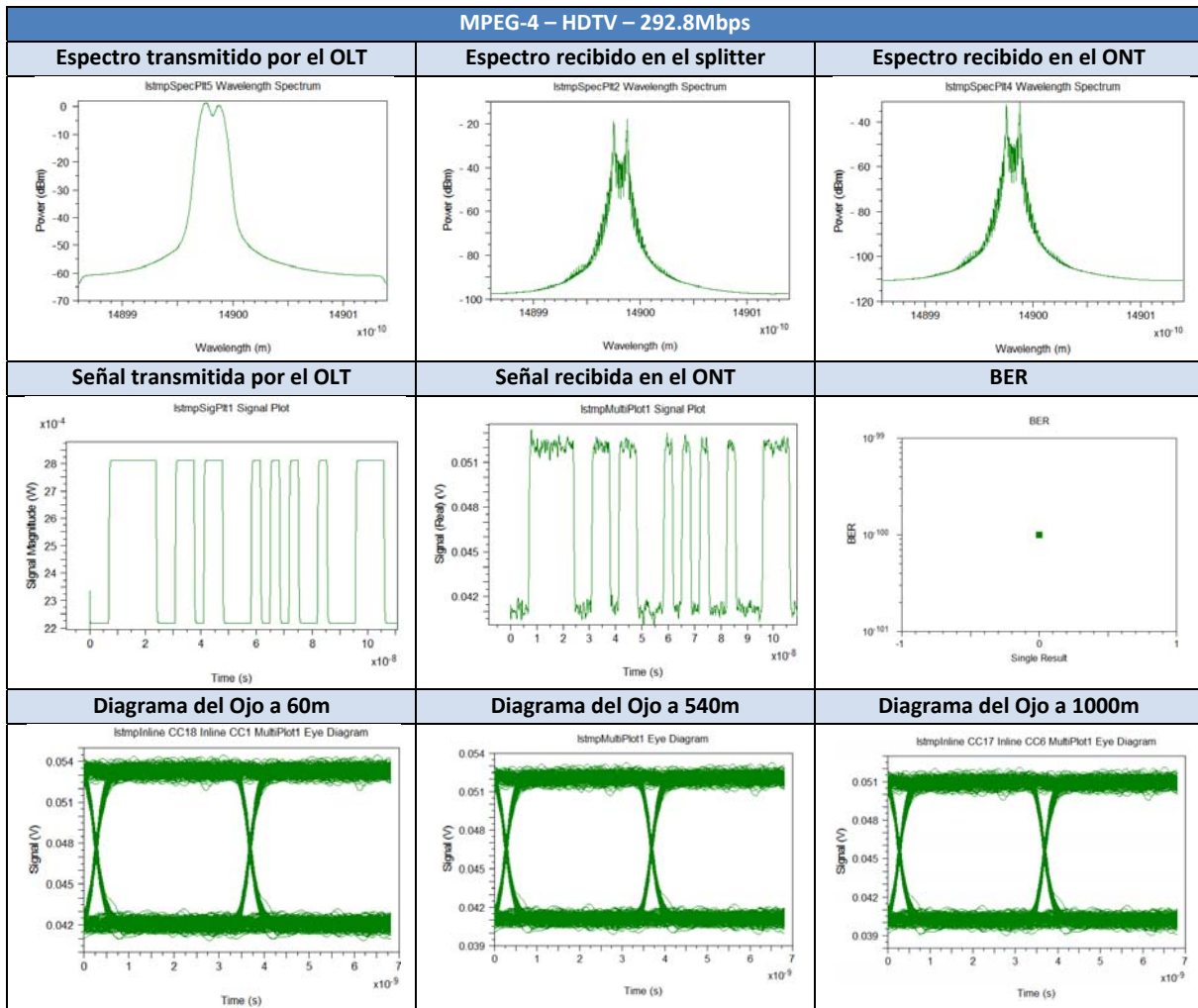


Tabla 4.13. Gráficas para MPEG-4 - HDTV – 292.8Mbps.

Se observa en los resultados que de igual forma que en el escenario 1 los espectros se afinan al aumentar la tasa de bits, se presenta un poco más de ruido en la señal recibida en los ONT's y los diagramas del ojo presentan una máscara muy bien definida.

La BER para 16 usuarios se mantiene en niveles superiores al mínimo establecido en el estándar que es de  $10^{-12}$  y se nota que la BER aumenta con la distancia a la cual se encuentra el ONT con respecto al splitter.

La **Tabla 4.14** muestra los niveles de potencia recibida en los ONT's en la configuración de 32 usuarios, se observa que disminuye con la distancia (**Figura 4.13**), pero aún en el peor de los casos, a 20Km del OLT mantiene un nivel de -15.25dBm, el cual es superior al nivel de sensibilidad requerido en el estándar IEEE 802.3ah, que es de -27dBm, estos valores son los mismos para todas las configuraciones de 32 usuarios.

Distancia desde el splitter (m)	Potencia Rx ONT	
	dBm	mW
30	-15.04	3.12e-5
60	-15.05	3.12e-5
90	-15.06	3.11e-5
120	-15.07	3.10e-5
150	-15.07	3.10e-5
180	-15.08	3.10e-5
210	-15.09	3.09e-5
240	-15.09	3.09e-5
270	-15.10	3.08e-5
300	-15.11	3.08e-5
330	-15.11	3.07e-5
360	-15.12	3.07e-5
390	-15.12	3.06e-5
420	-15.13	3.06e-5
450	-15.13	3.06e-5
480	-15.14	3.06e-5
510	-15.14	3.05e-5
540	-15.15	3.05e-5
570	-15.16	3.04e-5
600	-15.16	3.04e-5
630	-15.17	3.03e-5
660	-15.18	3.03e-5
690	-15.18	3.02e-5
720	-15.19	3.02e-5
750	-15.19	3.02e-5
780	-15.20	3.01e-5
810	-15.21	3.01e-5
840	-15.21	3.00e-5
870	-15.22	3.00e-5
900	-15.23	2.99e-5
930	-15.23	2.99e-5
1000	-15.25	2.98e-5

**Tabla 4.14. Medidas de potencia para 32 usuarios.**

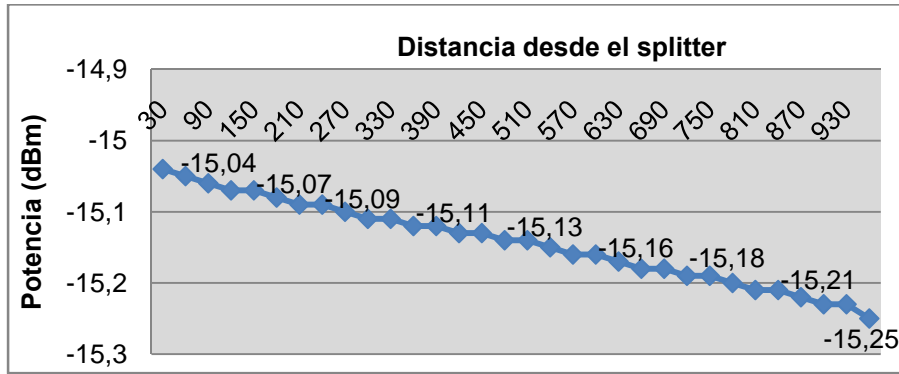


Figura 4.13. Potencia recibida en OLT para 32 usuarios.

En el **Anexo B.2.2** se detallan las medidas y gráficas de la BER, para diferentes tasas de bits, correspondientes a transmisión de IPTV en formatos SDTV y HDTV, así como los espectros en el ONT, en el splitter y el OLT, la señal en el OLT y en el ONT, la BER y el diagrama del ojo a diferentes distancias de ubicación del ONT con respecto al splitter para 32 usuarios. La **Tabla 4.15** y la **Figura 4.14** detallan las medidas de la BER en el ONT para 32 usuarios, transmitiendo MPEG-4 en formato SDTV a 122Mbps.

Distancia desde el splitter (m)	BER		
	Promedio	Mínima	Máxima
30	9.6716e-022	1.5770e-023	4.9906e-020
60	1.0944e-021	1.8043e-023	5.5874e-020
90	1.2379e-021	2.0637e-023	6.2538e-020
120	1.3999e-021	2.3597e-023	6.9976e-020
150	1.5825e-021	2.6971e-023	7.8278e-020
180	1.7884e-021	3.0817e-023	8.7539e-020
210	2.0205e-021	3.5200e-023	9.7869e-020
240	2.2820e-021	4.0194e-023	1.0939e-019
270	2.5766e-021	4.5880e-023	1.2223e-019
300	2.9083e-021	5.2353e-023	1.3654e-019
330	3.2818e-021	5.9719e-023	1.5248e-019
360	3.7020e-021	6.8100e-023	1.7023e-019
390	4.1748e-021	7.7631e-023	1.9000e-019
420	4.7066e-021	8.8467e-023	2.1201e-019
450	5.3045e-021	1.0078e-022	2.3650e-019
480	5.9765e-021	1.1477e-022	2.6375e-019
510	6.6803e-021	1.2878e-022	2.9312e-019
540	7.5800e-021	1.4871e-022	3.2776e-019
570	8.5326e-021	1.6919e-022	3.6522e-019
600	9.6022e-021	1.9242e-022	4.0686e-019
630	1.0803e-020	2.1878e-022	4.5312e-019
660	1.2149e-020	2.4867e-022	5.0450e-019
690	1.3660e-020	2.8254e-022	5.6156e-019
720	1.5354e-020	3.2093e-022	6.2490e-019
750	1.7253e-020	3.6442e-022	6.9519e-019
780	1.9381e-020	4.1367e-022	7.7319e-019

810	2.1766e-020	4.6942e-022	8.5971e-019
840	2.4436e-020	5.3252e-022	9.5565e-019
870	2.7426e-020	6.0391e-022	1.0620e-018
900	3.0773e-020	6.8464e-022	1.1799e-018
930	3.4518e-020	7.7593e-022	1.3105e-018
1000	4.5076e-020	1.0378e-021	1.6727e-018

Tabla 4.15. BER para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.

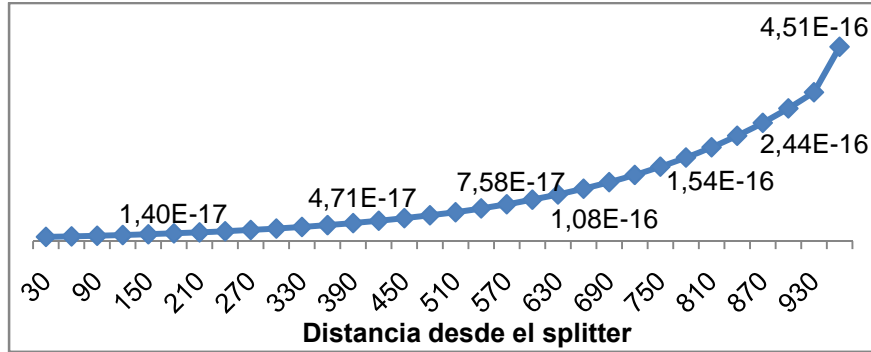


Figura 4.14. BER para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.

La **Tabla 4.16**, muestra las gráficas de Señal, Espectro, Diagrama del Ojo y BER para la transmisión a 32 usuarios de MPEG-4 formato SDTV a 122Mbps.

MPEG-4 – SDTV - 122Mbps		
Espectro transmitido por el OLT	Espectro recibido en el splitter	Espectro recibido por el ONT
Señal transmitida por el OLT	Señal recibida en el ONT	BER
Diagrama del Ojo a 30m	Diagrama del Ojo a 540m	Diagrama del Ojo a 1000m

Tabla 4.16. Gráficas para MPEG-4 – SDTV - 122Mbps.



Después de analizar las gráficas del escenario 2 para 32 usuarios se observa que:

- La BER se mantiene dentro del rango, alcanzando el menor valor de  $10^{-20}$  cuando se transmite HDTV a una tasa de bits de 585.6Mbps de línea, ósea 384Mbps efectivos en el ONT.
- Los espectros de la señal se afinan a medida que se aumenta la tasa de bits y presentan una pérdida considerable de potencia una vez pasan a través del splitter.
- Las señales recibidas en el ONT contienen más ruido cuando están conectados 32 usuarios.
- El diagrama del ojo sigue presentando máscaras totalmente definidas lo que representa la carencia de jitter, ISI y una BER muy baja.

### 4.3.3 Escenario 3: Transmisión de varios flujos de IPTV.

En este escenario utilizando el códec MPEG-4 y con las distancias de los ONT, medidas desde el splitter, definidas en el escenario 2, se transmiten diferentes canales o grupos multicast a los usuarios, tanto en formato SDTV como en formato HDTV y sin tráfico adicional del servicio triple play.

Los estudios de medios muestran que el 75% de los hogares colombianos en la actualidad tienen entre 1 y 2 televisores en su hogar (**Figura 4.15**). Los nuevos servicios como, VoD, *Pay per view*, PVR, televisión digital, entre otros; y la tendencia tanto del mercado hacia la adquisición de productos de alta definición como se ve en la **Figura 4.16 [72]**, como de las programadoras a generar contenido para este formato, hacen que en el dimensionamiento se tenga en cuenta, tanto la llegada de contenido de alta definición (HD) como la existencia de contenido de definición estándar. Por lo tanto, se considera para propósitos de cálculos, que un hogar promedio cuenta con 1 televisor HDTV y 2 televisores SDTV, con servicios de HDTV y SDTV funcionando las 24 horas del día, para simular el peor de los casos.

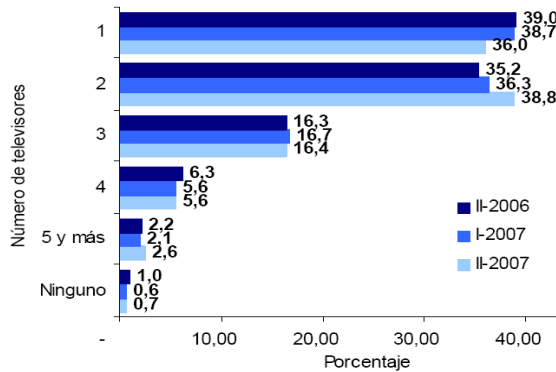


Figura 4.15. Número de Televisores por hogar en 2006 y 2007 [72].

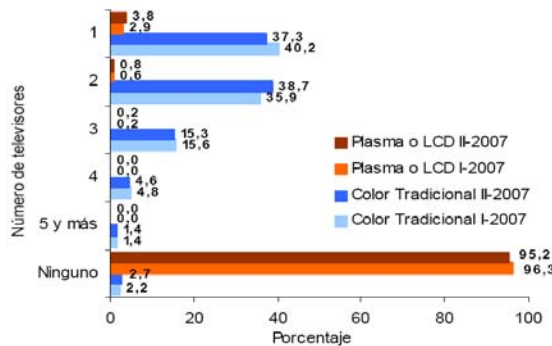


Figura 4.16. Número de televisores tradicionales o de Plasma o LCD en los hogares [72].

La **Tabla 4.17** muestra el ancho de banda utilizado para la transmisión de los flujos de IPTV tomando en consideración lo mencionado anteriormente además del overhead y la codificación en las redes EPON. La topología utilizada es la misma del escenario 2 tanto para 16 como para 32 usuarios.

Códec	Usuarios	Canales	Tasa de Bits por usuario (Mbps)	Tasa de Bits mínima en OLT (Mbps)	Tasa de Bits máxima en OLT (Mbps)
MPEG-4 ITU-T H.264 AVC	16	1 HDTV 2 SDTV	11-17	268.4	414.8
	32	1 HDTV 2 SDTV		536.8	829.6

**Tabla 4.17. Anchos de banda utilizados en la simulación.**

#### 4.3.3.1 Resultados del Escenario 3

Los niveles de potencia son iguales que los medidos en el escenario 2 por lo tanto no se consideran en este escenario ni en el escenario 4, en el **Anexo B.2.3** se presentan los resultados de las mediciones de BER y gráficas de señal, espectro y diagrama del ojo para 16 y 32 usuarios con las tasas de bits mencionadas en la **Tabla 4.17**. La **Tabla 4.18** y la **Figura 4.17** detallan las mediciones de BER en el ONT para 32 usuarios, transmitiendo IPTV con codificación MPEG-4, para un flujo HDTV y dos flujos SDTV a 829.6Mbps.

Distancia desde el splitter (m)	BER		
	Promedio	Mínima	Máxima
30	6.2505e-022	1.0479e-023	3.1944e-020
60	7.0869e-022	1.2014e-023	3.5834e-020
90	8.0326e-022	1.3769e-023	4.0186e-020
120	9.1016e-022	1.5774e-023	4.5054e-020
150	1.0309e-021	1.8065e-023	5.0496e-020
180	1.1674e-021	2.0682e-023	5.6579e-020
210	1.3215e-021	2.3669e-023	6.3376e-020
240	1.4954e-021	2.7078e-023	7.0969e-020
270	1.6917e-021	3.0967e-023	7.9448e-020
300	1.9131e-021	3.5402e-023	8.8915e-020
330	2.1628e-021	4.0458e-023	9.9481e-020
360	2.4443e-021	4.6221e-023	1.1127e-019
390	2.7616e-021	5.2786e-023	1.2442e-019
420	3.1192e-021	6.0262e-023	1.3909e-019
450	3.5218e-021	6.8774e-023	1.5543e-019
480	3.9753e-021	7.8461e-023	1.7365e-019
510	4.4856e-021	8.9481e-023	1.9395e-019
540	5.0599e-021	1.0201e-022	2.1656e-019
570	5.7060e-021	1.1626e-022	2.4174e-019
600	6.4325e-021	1.3246e-022	2.6977e-019
630	7.2493e-021	1.5086e-022	3.0097e-019
660	8.1673e-021	1.7175e-022	3.3567e-019
690	9.1987e-021	1.9548e-022	3.7427e-019
720	1.0357e-020	2.2240e-022	4.1720e-019

750	1.1658e-020	2.5295e-022	4.6491e-019
780	1.3118e-020	2.8760e-022	5.1794e-019
810	1.4756e-020	3.2688e-022	5.7685e-019
840	1.6594e-020	3.7141e-022	6.4229e-019
870	1.8655e-020	4.2186e-022	7.1495e-019
900	2.0966e-020	4.7900e-022	7.9561e-019
930	2.3555e-020	5.4370e-022	8.8512e-019
1000	3.0874e-020	7.2979e-022	1.1339e-018

Tabla 4.18. BER para MPEG-4 - HDTV – 829.6Mbps.

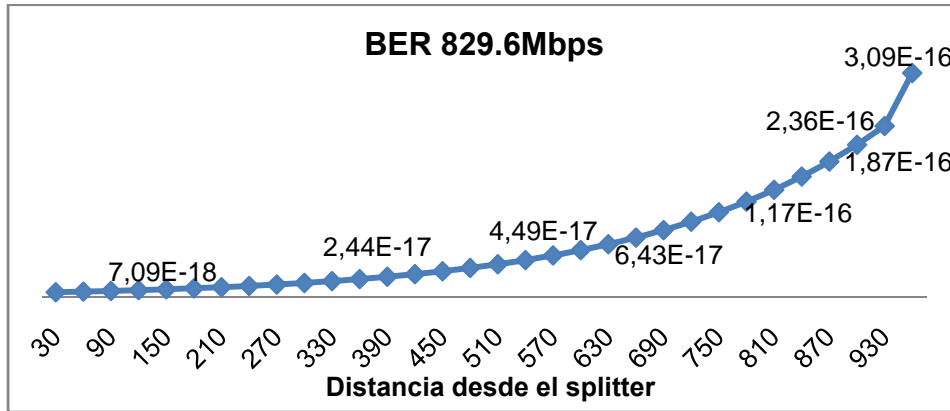
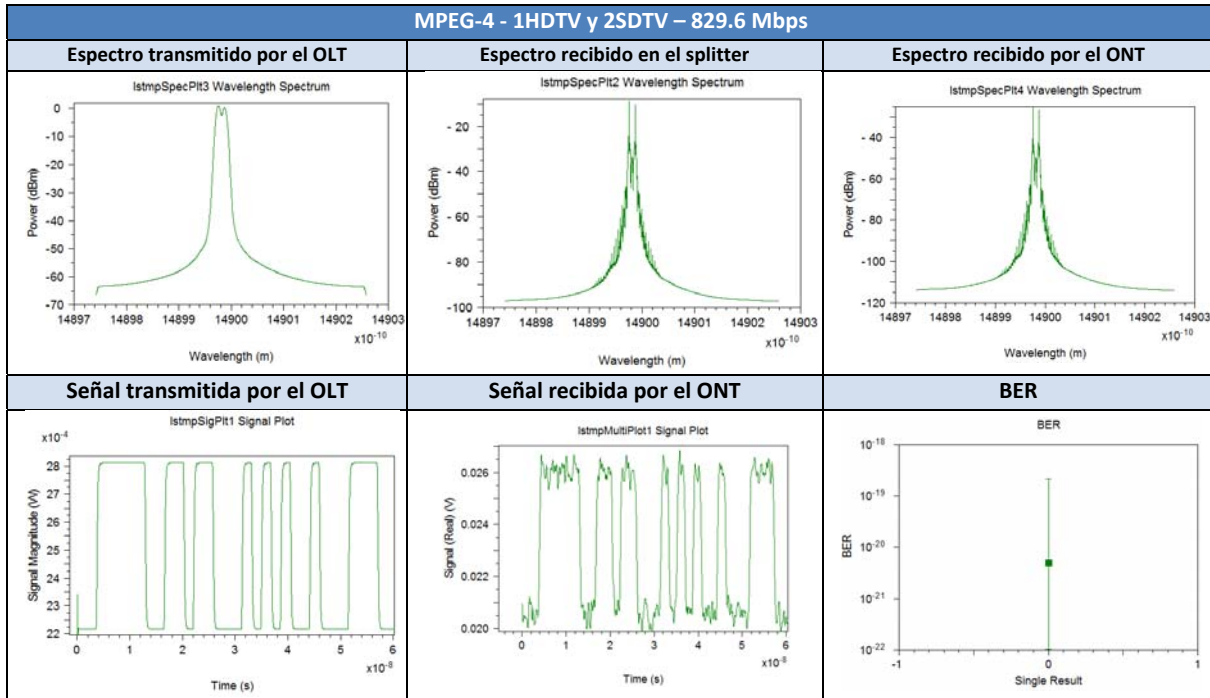
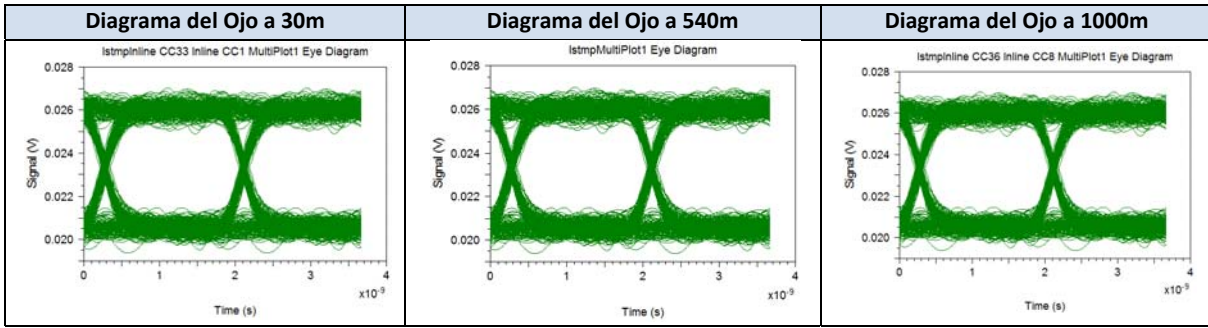


Figura 4.17. BER para MPEG-4 - HDTV– 829.6 Mbps.

La **Tabla 4.19** contiene las gráficas de Señal, Espectro, Diagrama del Ojo y BER para transmisión de IPTV, codificación MPEG-4, con un flujo HD y dos flujos SD a 829.6Mbps para 32 usuarios.





**Tabla 4.19. Gráficas para MPEG-4 - HDTV– 829.6 Mbps.**

Analizando los resultados de este escenario y teniendo en cuenta que la tasa de bits aumenta al añadir más flujos IPTV, correspondientes a servicios de formato HD y de formato SD hacia un mismo usuario, se observa que:

- Los espectros ópticos de la señal se afinan cada vez más en la longitud de onda de 1490nm.
- La señal transmitida por el OLT tiene picos más curvados, debido al aumento de la tasa de bits, que ocasiona una respuesta diferente en la fuente eléctrica y por ende en el láser.
- La señal recibida en el ONT presenta más ruido debido al aumento de la tasa de bits.
- La BER es más grande, del orden de  $10^{-16}$  a los 1000 metros desde el splitter pero todavía permanece dentro de los parámetros del estándar IEEE802.3ah.
- El diagrama del ojo comienza a mostrar una máscara un poco más cerrada pero claramente definida por lo que el jitter y la ISI no están presentes.

#### 4.3.4 Escenario 4: Simulación de flujos IPTV y tráfico de voz y datos

En este escenario se consideran los mismos parámetros y topologías (**Figura 4.7** para 16 usuarios y **Figura 4.9** para 32 usuarios) del escenario 2 y simplemente se añade el tráfico considerado en este proyecto como de adicional (tráfico que no pertenece al servicio IPTV pero hace parte de la oferta triple play ofrecida al usuario), teniendo en cuenta las necesidades de un servicio triple play (Voz, Video, Datos) para un hogar promedio, además del tráfico de control, gestión, operación y mantenimiento de la propia red.

Definimos el servicio triple play de la siguiente manera:

- Internet alta velocidad = 5Mbps.
- VoIP = 0.5Mbps (Varias líneas).
- Tráfico de intercambio de información entre OLT y ONT (Gestión, OAM, Reportes, etc.) = 1Mbps.
- IPTV con 2 flujos SDTV y 1 flujo HDTV = 11 – 17 Mbps.

Se transmiten tasas de bits de entre 280 y 376 Mbps (427 a 573.4Mbps de línea) para 16 usuarios y de 560 a 752 Mbps (0.854 a 1.1468Gbps de línea) para 32 usuarios. La **Tabla 4.20** resume las tasas de bits utilizadas en la simulación del escenario 4.

Códec	Usuarios	Canales	Voz, Datos, Control Mbps	Tasa de Bits mínima en OLT (Mbps)	Tasa de Bits máxima en OLT (Mbps)
MPEG-4 ITU-T H.264 AVC	16	1 HDTV 2 SDTV	6.5	427	573.4
	32	1 HDTV 2 SDTV		854	1146.8

**Tabla 4.20. Tasas de bits utilizadas en el escenario 4.**

#### 4.3.4.1 Resultados

En el **Anexo B.2.4** se presentan los resultados de la simulación del escenario 4, estos muestran mediciones de la BER, y diagramas de señal, de espectro y del ojo, para las diferentes tasas de bits, correspondientes a flujos de IPTV, datos y voz.

La **Tabla 4.21** y la **Figura 4.18** muestran las mediciones de BER en el ONT para 32 usuarios, utilizando códec MPEG-4 con 1 flujo HDTV y 2 flujos SDTV tráfico de voz, datos y control a una tasa de bits de 1146.8Mbps de línea, este caso se encuentra cerca del límite de la tasa de transmisión de la red EPON que es de 1.25Gbps de línea.

Distancia desde el splitter (m)	BER		
	Promedio	Mínima	Máxima
30	1.8552e-021	3.3526e-023	9.0658e-020
60	2.0984e-021	3.8321e-023	1.0149e-019
90	2.3727e-021	4.3787e-023	1.1359e-019
120	2.6821e-021	5.0015e-023	1.2709e-019
150	3.0308e-021	5.7109e-023	1.4216e-019
180	3.4238e-021	6.5187e-023	1.5896e-019
210	3.8665e-021	7.4382e-023	1.7770e-019
240	4.3651e-021	8.4844e-023	1.9859e-019
270	4.9264e-021	9.6745e-023	2.2187e-019
300	5.5580e-021	1.1028e-022	2.4780e-019
330	6.2687e-021	1.2566e-022	2.7669e-019
360	7.0681e-021	1.4314e-022	3.0885e-019
390	7.9669e-021	1.6300e-022	3.4466e-019
420	8.9771e-021	1.8554e-022	3.8450e-019
450	1.0112e-020	2.1114e-022	4.2883e-019
480	1.1387e-020	2.4018e-022	4.7813e-019
510	1.2819e-020	2.7313e-022	5.3295e-019
540	1.4427e-020	3.1050e-022	5.9388e-019
570	1.6231e-020	3.5285e-022	6.6159e-019
600	1.8255e-020	4.0086e-022	7.3681e-019
630	2.0526e-020	4.5524e-022	8.2035e-019
660	2.3071e-020	5.1682e-022	9.1310e-019
690	2.5924e-020	5.8655e-022	1.0161e-018
720	2.9121e-020	6.6546e-022	1.1303e-018
750	3.2703e-020	7.5473e-022	1.2570e-018
780	3.6713e-020	8.5570e-022	1.3976e-018
810	4.1204e-020	9.6987e-022	1.5534e-018
840	4.6229e-020	1.0989e-021	1.7262e-018
870	5.1851e-020	1.2447e-021	1.9176e-018
900	5.8140e-020	1.4094e-021	2.1297e-018
930	6.5172e-020	1.5953e-021	2.3645e-018
1000	8.4968e-020	2.1276e-021	3.0150e-018

Tabla 4.21. BER para MPEG-4 - HDTV– 1146.8 Mbps.

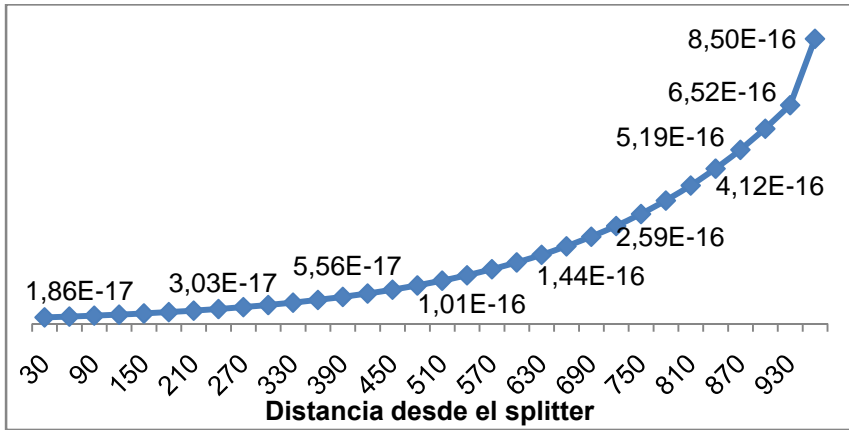


Figura 4.18. BER para MPEG-4 - HDTV- 1146.8 Mbps.

La **Tabla 4.22** contiene las gráficas de Señal, Espectro, Diagrama del Ojo y BER para MPEG-4 con flujos IPTV – 1 HDTV y 2 SDTV más tráfico de voz, datos y control a 1146.8Mbps para 32 usuarios.

MPEG-4 - 1 flujo HDTV y 2 flujos SDTV tráfico de voz, datos y control a 1146.8 Mbps		
Espectro transmitido por el OLT	Espectro recibido en el splitter	Espectro recibido por el ONT
Señal transmitida por el OLT	Señal recibida por el ONT	BER
Diagrama del Ojo a 30m	Diagrama del Ojo a 540m	Diagrama del Ojo a 1000m

Tabla 4.22. Gráficas para MPEG-4 - HDTV- 1146.8 Mbps.

Al revisar los resultados del cuarto escenario se observa que:

- Los espectros ópticos son cada vez más angostos y finos en la frecuencia de 1490nm, el espectro de llegada al ONT tiene mayor ruido y menos potencia que el que llega al splitter.
- La señal que se recibe en el OLT presenta una mayor cantidad de ruido pero tiene los niveles de 1 y 0 bien definidos.
- Los diagramas del ojo a diferentes distancias presentan máscaras bien definidas a estas tasas de bits.
- La BER a 1146.8Mbps es de  $10^{-16}$ , lo cual sigue permaneciendo dentro de los parámetros del estándar IEEE 802.3ah.

Debido a que la red EPON tiene una eficiencia del 82% (overhead), a que la tecnología de splitters permite tener una relación de 1:32 en la actualidad y a que la máxima tasa de transferencia para 32 usuarios es de 1146.8Mbps de línea, el número máximo de usuarios (con las características del servicio triple play definidas en este proyecto) que cada enlace EPON puede tener es 32, lo cual representa un gran ahorro en infraestructura, ya que los accesos ADSL necesitan tener un par de cable por cada usuario servido, mientras que con la red EPON, por cada cable de fibra troncal, pueden ser servidos 32 usuarios, con grandes velocidades y altos estándares de calidad.

### 4.3.5 Simulaciones adicionales en sentido downstream

#### 4.3.5.1 Máxima tasa de bits (1.25Gbps)

Dentro de la simulación se considera el peor de los casos que se presenta hipotéticamente cuando se usa todo el ancho de banda disponible en la tecnología, esto es 1.25Gbps, que es la velocidad de línea de la tecnología con una eficiencia de 100%, esto con el fin de demostrar que aún a esa velocidad la red EPON cumple con los requisitos del servicio IPTV. La **Tabla 4.23** y la **Figura 4.19** muestran los resultados de BER obtenidos y la **Tabla 4.24** detalla las diferentes gráficas obtenidas a esta tasa de bits.

Distancia desde el splitter (m)	BER		
	Promedio	Mínima	Máxima
30	1.8580e-020	4.2076e-022	8.0738e-019
60	2.0776e-020	4.7479e-022	8.9432e-019
90	2.3225e-020	5.3559e-022	9.9038e-019
120	2.5956e-020	6.0401e-022	1.0965e-018
150	2.9001e-020	6.8096e-022	1.2137e-018
180	3.2394e-020	7.6749e-022	1.3431e-018
210	3.6175e-020	8.6476e-022	1.4859e-018
240	4.0386e-020	9.7408e-022	1.6436e-018
270	4.5075e-020	1.0969e-021	1.8175e-018
300	5.0295e-020	1.2348e-021	2.0094e-018
330	5.6106e-020	1.3897e-021	2.2210e-018
360	6.2571e-020	1.5636e-021	2.4542e-018
390	6.9762e-020	1.7587e-021	2.7114e-018
420	7.7760e-020	1.9776e-021	2.9948e-018
450	8.6652e-020	2.2231e-021	3.3070e-018
480	9.6536e-020	2.4984e-021	3.6510e-018

510	1.0752e-019	2.8070e-021	4.0297e-018
540	1.1972e-019	3.1528e-021	4.4467e-018
570	1.3327e-019	3.5402e-021	4.9057e-018
600	1.4832e-019	3.9740e-021	5.4109e-018
630	1.6503e-019	4.4598e-021	5.9666e-018
660	1.8356e-019	5.0035e-021	6.5779e-018
690	2.0413e-019	5.6120e-021	7.2501e-018
720	2.2695e-019	6.2928e-021	7.9892e-018
750	2.5225e-019	7.0541e-021	8.8016e-018
780	2.8030e-019	7.9054e-021	9.6944e-018
810	3.1139e-019	8.8569e-021	1.0675e-017
840	3.4584e-019	9.9203e-021	1.1753e-017
870	3.8401e-019	1.1108e-020	1.2936e-017
900	4.2628e-019	1.2435e-020	1.4235e-017
930	4.7308e-019	1.3917e-020	1.5661e-017
1000	6.0267e-019	1.8078e-020	1.9551e-017

Tabla 4.23. BER para 1.25Gbps.

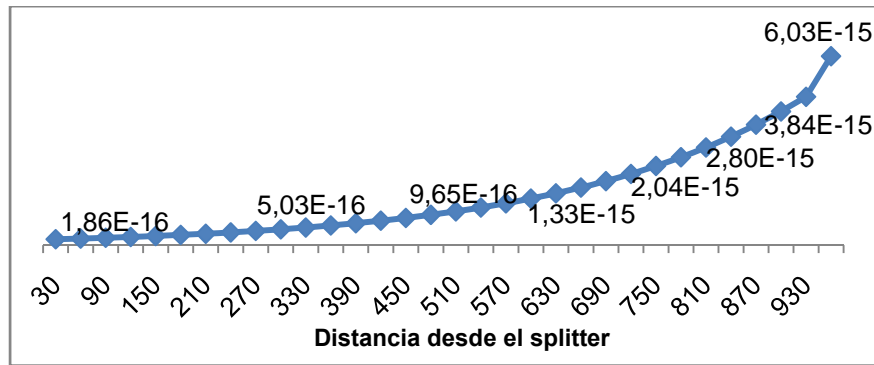
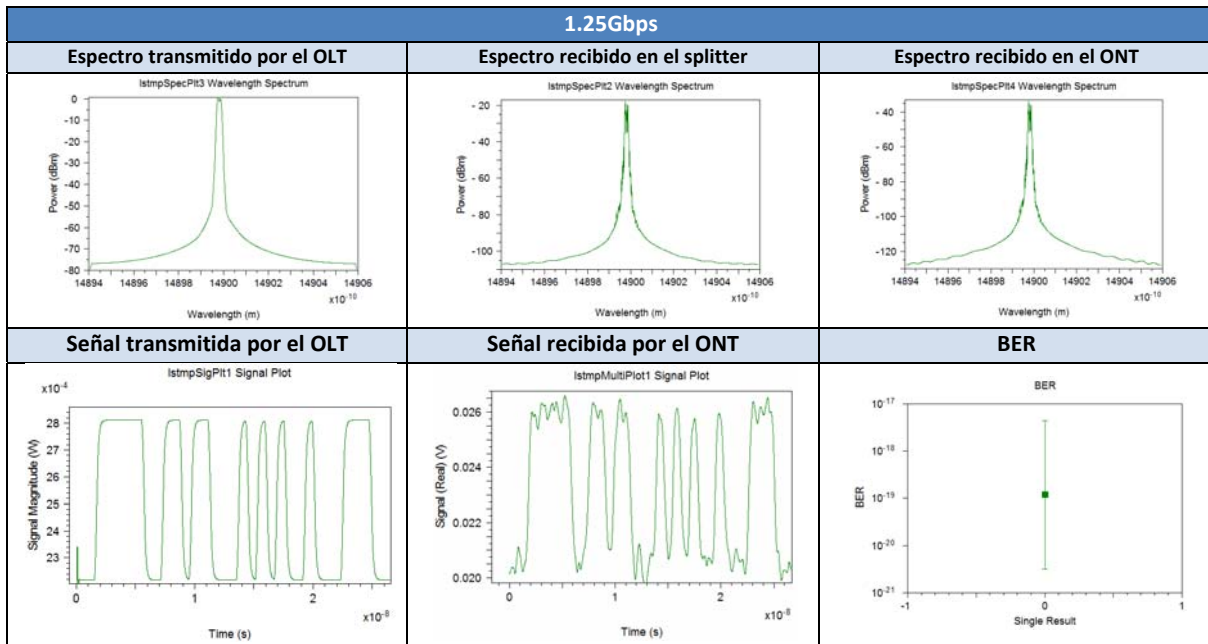


Figura 4.19. BER para 1.25Gbps.





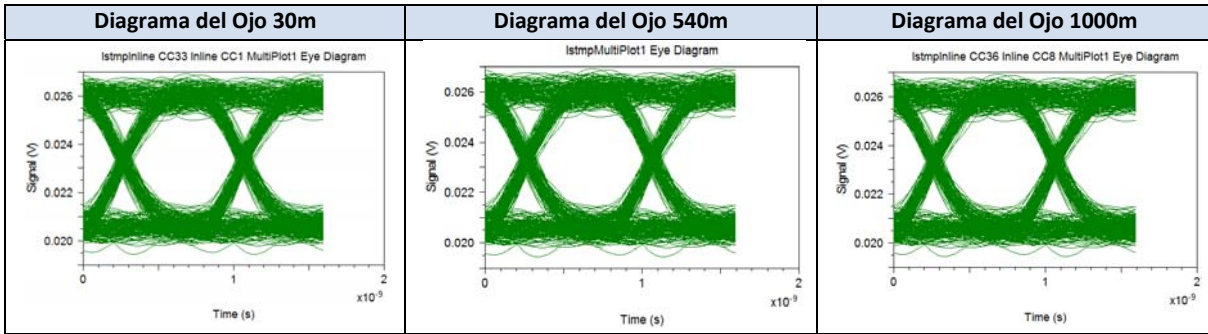


Tabla 4.24. Gráficas para 1.25Gbps.

A esta tasa de bits el espectro es muy afinado para los 1490nm, la señal recibida en el ONT presenta más ruido pero está bien demarcado el nivel de decisión, la máscara del diagrama del ojo es más cerrada, pero aun así no se presenta ISI ni jitter y con una BER máxima de  $10^{-15}$ , sigue estando dentro de las especificaciones del estándar EPON.

#### 4.3.5.2 Parámetros extremos de distancia y tasa de bits

Una última simulación se realizó con el fin de observar los parámetros extremos a los cuales la red EPON en el entorno de simulación propuesta funcionaria correctamente para brindar un servicio IPTV con calidad, en este sentido se variaron parámetros como la longitud de la fibra y la tasa de bits.

En cuanto a la tasa de bits, esta se varió de forma hipotética, ya que en la realidad los equipos certificados para EPON tienen que cumplir con los parámetros de PMD y de protocolo MPCP determinados en el estándar y no podrían operar a tasas de bits superiores a los 1.25Gbps [25].

Al realizar variaciones de la longitud, se obtuvo que la máxima distancia a la cual los ONT se pueden instalar para obtener una BER de  $10^{-12}$  es de 24Km, con esto se obtiene un servicio de calidad a 1.25Gbps con una BER de  $10^{-13}$ , muy cercana a la definida en el estándar, la Figura 4.20 muestra la topología utilizada para esta simulación.

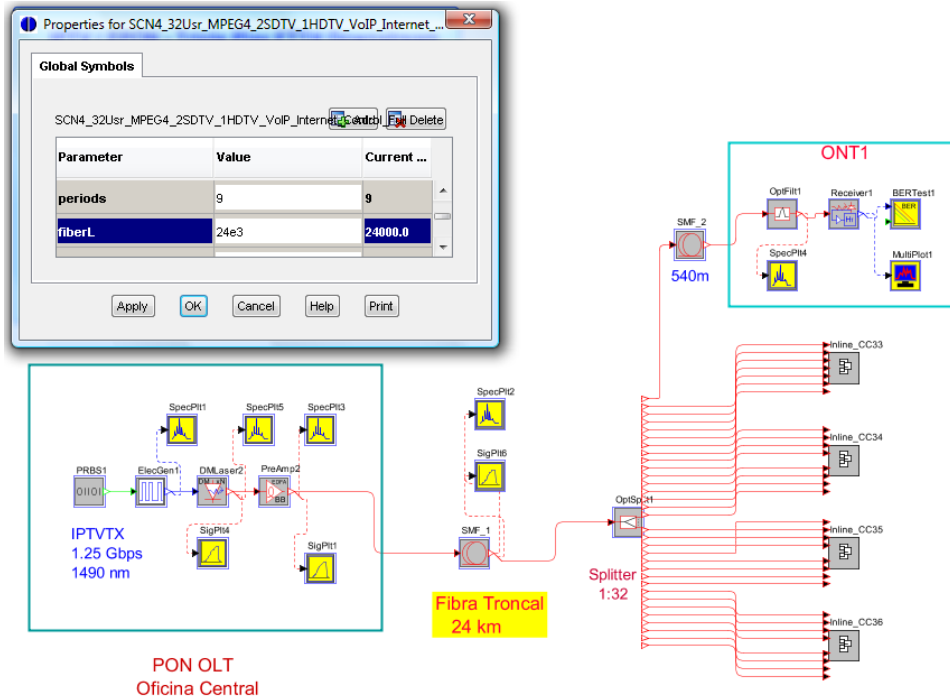
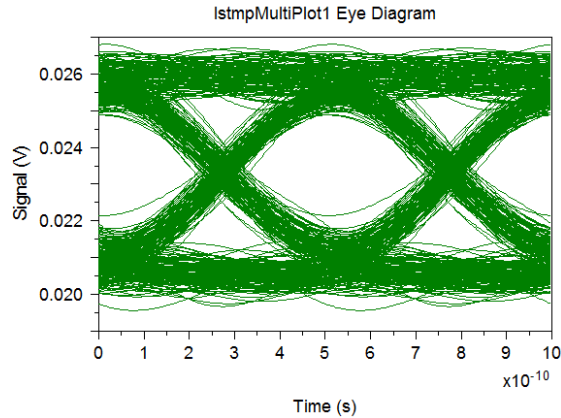


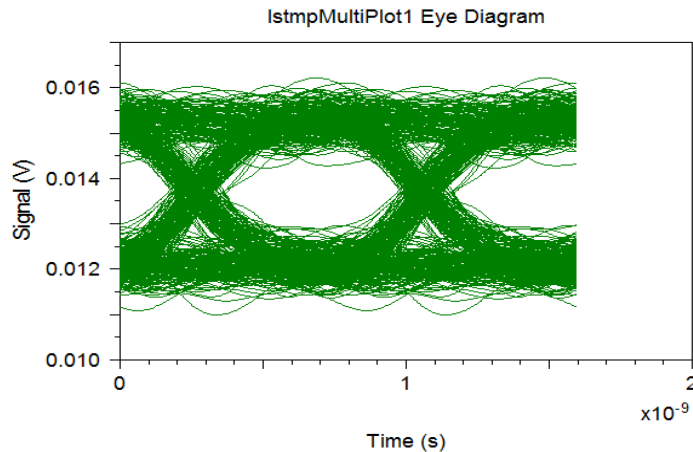
Figura 4.20. Topología empleada para las simulaciones adicionales.

Con la misma topología utilizada en la prueba anterior se procedió a variar la tasa de bits pero utilizando una longitud de fibra de 20Km y se obtuvo que la red EPON es capaz de transmitir a una tasa de bits de hasta 1.8Gbps para obtener una BER menor a  $10^{-12}$ . La **Figura 4.21** muestra el diagrama del ojo para 2 Gbps a 20Km, en el cual se ve una máscara del ojo más cerrada, que denota una BER por encima del límite de la especificación del estándar.

La **Figura 4.22** muestra el mismo diagrama del ojo para 30Km y una velocidad de 1.25Gbps, se ve un ojo bastante cerrado lo cual denota una alta tasa de error en el receptor.



**Figura 4.21.** Diagrama del ojo para BER =  $1e-10$  con 2Gbps de tasa de bits y 20Km.



**Figura 4.22.** Diagrama del ojo para 30Km y 1.25Gbps de tasa de bits.

#### 4.4 Definición del escenario de simulación y resultados obtenidos en sentido upstream

La simulación de la transmisión en sentido upstream es igual a tener una conexión punto a punto en un determinado instante de tiempo en el cual el ONT tiene ventana libre de transmisión (esto debido al uso de TDMA para el acceso al medio compartido), por lo cual, durante este instante de tiempo el ONT dispone de todo el ancho de banda del medio de transmisión, es decir 1.25Gbps de velocidad de línea, u 820 Mbps de carga útil (teniendo en cuenta la eficiencia de 82% debida al overhead y la codificación utilizada). Utilizando la topología de la **Figura 4.23** y con una longitud de onda de 1310nm se procede a realizar la simulación, no se conectan más ONT debido a que en OptSim no es posible implementar el protocolo de control del medio compartido (MPCP).

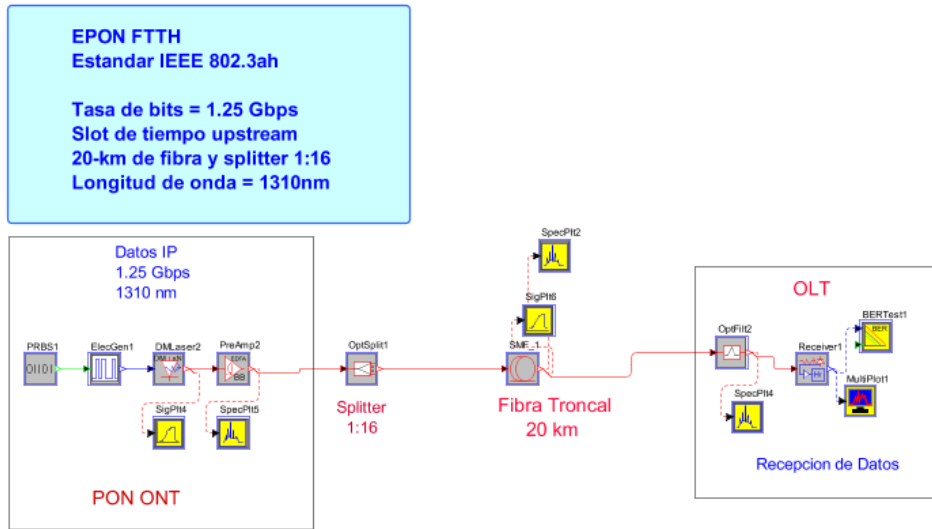


Figura 4.23. Topología de Simulación sentido Upstream en un slot de tiempo.

#### 4.4.1.1 Resultados sentido upstream

La **Tabla 4.25** muestra parámetros medidos en sentido upstream, como son BER, Potencia de transmisión y potencia de recepción, las gráficas de esta simulación se relacionan en la **Tabla 4.26**.

Parámetro	Valor
BER	1.3796e-319
Potencia transmitida	4 dBm
Potencia recibida	-0.2 dBm

Tabla 4.25. Resultados sentido Upstream.

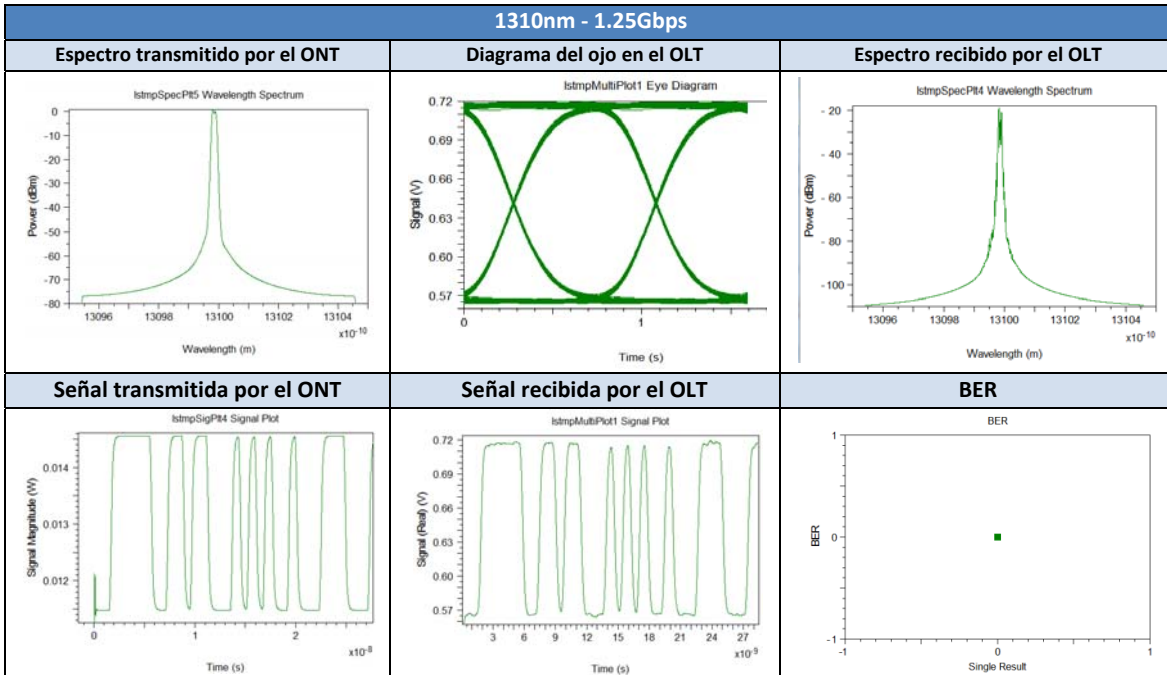


Tabla 4.26. Gráficas de sentido Upstream.

Analizando las gráficas y como era de esperarse al poseer el ONT todo el medio de transmisión a su disposición la tasa de errores es muy pequeña del orden de  $1e-319$ , los espectros de la señal se observan afinados en la frecuencia central y el ojo está bien abierto por la ausencia de ISI y jitter.

#### 4.4.1.2 Presencia de interferencia entre ONT's

Podría darse el caso en el cual otro ONT acceda al medio al mismo tiempo que el ONT que posee el slot de tiempo para transmitir, esto podría ocasionar interferencia y pérdidas en la información, esta situación se simuló utilizando la topología de la **Figura 4.24**, en la cual el ONT2 accede al medio al mismo tiempo que el ONT1.

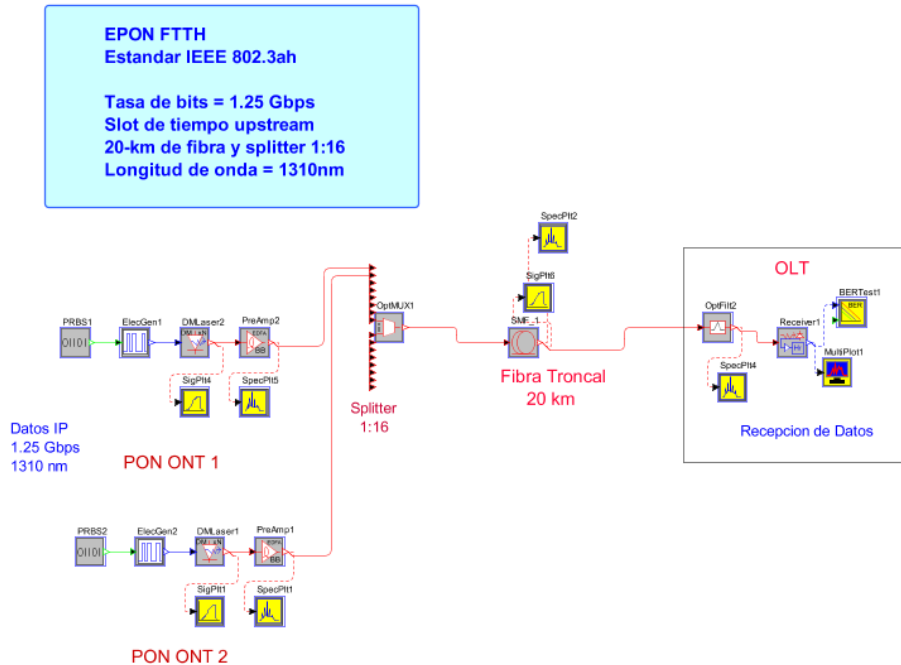


Figura 4.24. Presencia de Interferencia entre ONT's.

La **Figura 4.25** muestra que en el diagrama del ojo en caso de interferencia, se presenta una máscara totalmente deformada, en este caso la BER fue de  $1.2244e-001$ , un valor extremadamente alto.

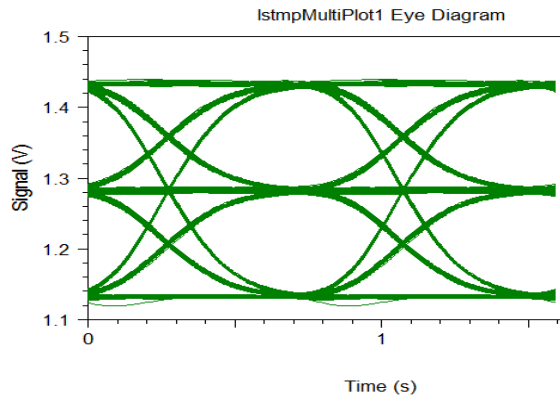
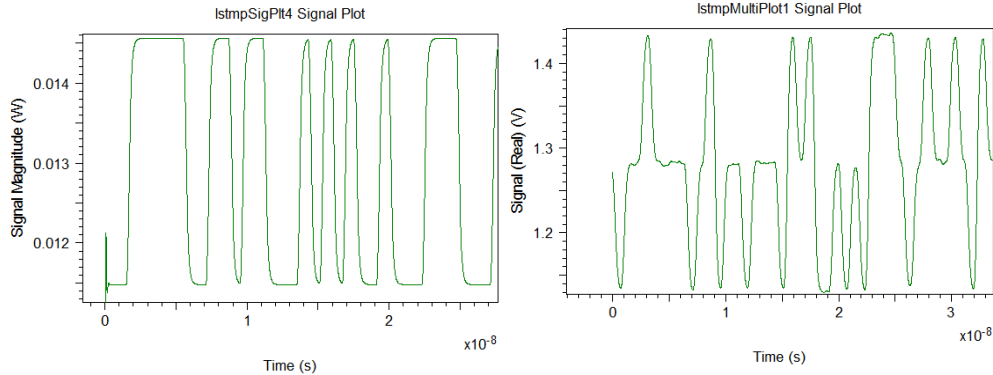
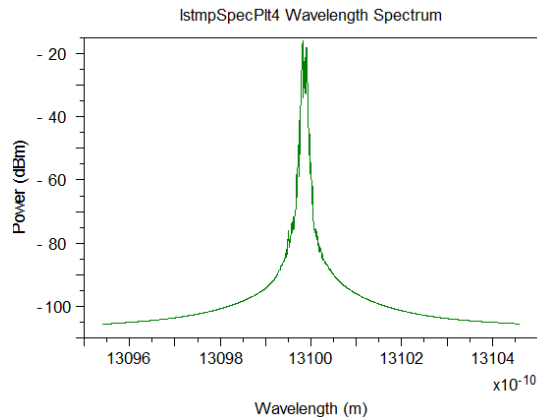


Figura 4.25. Diagrama del ojo en presencia de interferencia.

Como muestra la **Figura 4.26** la señal recibida es totalmente irreconocible por parte del receptor en comparación con la señal transmitida, debido a la interferencia del ONT2, por otro lado la **Figura 4.27** muestra que el espectro óptico de la señal no sufre ninguna modificación, ya que ambos ONT transmiten en la misma longitud de onda (1310nm).



**Figura 4.26.** Señal transmitida por el ONT y recibida en el OLT en presencia de ISI.



**Figura 4.27.** Espectro óptico en presencia de interferencia.

#### 4.5 Generalización de resultados

Con base en la simulación de este capítulo, en la cual se obtuvieron resultados del proceso de dimensionamiento de una red EPON, se pueden derivar recomendaciones para prestar un servicio IPTV mediante esta red de acceso, a manera de complemento al estudio realizado en el **Capítulo 3** y con el fin de verificar algunos conceptos teóricos:

- El códec de mejor desempeño en un sistema IPTV/EPON es MPEG-4, ya que permite un mejor aprovechamiento de los recursos de red, al ser más eficiente que MPEG-2. Ratificando lo mencionado en el **capítulo 2**, esto ayuda a reducir los costos de transmisión, despliegue y operación de la red.
- Para un servicio Triple-Play con 2 flujos IPTV SDTV a 3Mbps, 1 flujo HDTV a 12Mbps servicio de voz e internet con una tasa de bits total de 23.5Mbps,  $N=34$  en teoría, por lo tanto el valor de relación de splitter seleccionado fue de 32, ya que los splitters comerciales traen relaciones con valores de  $1:2^n$ . También se puede seleccionar un valor de splitter mayor, pero este quedaría subutilizado y generaría pérdidas ópticas adicionales.

- En cuanto a la potencia de transmisión, se demostró que para cumplir con los requerimientos de sensibilidad del receptor (-27dBm), la potencia debe ser de 4dBm para un alcance de 20Km con un splitter de relación 1:32.
- Se observó que el ancho espectral se hace más pequeño a una mayor tasa de bits, lo cual es ideal para evitar interferencias cuando se trabaja con otras tecnologías o en conjunto con otras longitudes de onda, por ejemplo, para transmisión de video RF en la banda de los 1550nm.
- La BER se mantiene siempre por encima del límite establecido en el estándar IEEE 802.3ah (10e-12), aún en el peor de los casos.
- Analizando el diagrama del ojo, en todos los casos se noto un buen comportamiento de las señales recibidas en los elementos de la red.
- Cuando aumenta la distancia desde el splitter hasta los ONT, la BER aumenta y la potencia recibida disminuye pero siempre dentro del rango establecido por el estándar de EPON. Esta es una aproximación muy útil a un caso real en el cual los usuarios se encuentran a diferentes distancias.
- Lo mismo sucede cuando aumenta el número de usuarios (ONT). Esto es muy importante en las actividades de dimensionamiento.
- A medida que se aumenta el número de flujos de IPTV, así como los servicios adicionales que conforman la oferta triple play, la BER aumenta, pero la potencia se mantiene constante, ya que solo depende del número de usuarios y de la distancia de ubicación desde el splitter.

#### 4.6 Caso de estudio

Como complemento a todo el estudio realizado en este proyecto, a continuación se realiza un pequeño caso de estudio del proceso de planeación de una red EPON para dar el servicio de IPTV, para lo cual se realizan las siguientes actividades:

- **Obtener estadísticas demográficas y geográficas:** Una ciudad mediana como Popayán con una población de 258,653 habitantes (DANE), tiene un número de suscriptores de Televisión por Cable de aproximadamente 16.000 (según las estadísticas de la CNTV para Marzo de 2008). En general la ciudad no presenta zonas con gran inclinación.
- **Analizar la competencia:** En la actualidad en la ciudad operan tres compañías de Televisión por cable, Cable Unión de Occidente, UNE y Cable Cauca.
- Hacer un estudio de viabilidad del proyecto y estimaciones presupuestales, obtener las licencias necesarias y gestionar con los proveedores de contenido y de enlaces la obtención de las señales necesarias en el sistema
- **Definir los servicios que han de ser implementados y sus parámetros:** Un servicio triple play con 1 flujo de IPTV en formato HD (1080p) y 2 flujos de en formato SD por cada usuario con codificación MPEG-4, velocidad de internet de 5Mbps, y 2 líneas de VoIP, a una tasa de bits de 23.5Mbps por cada usuario. La oferta típica para un operador de IPTV es de 125-200 canales SD y 20 canales HD.
- **Establecer el número de usuarios que pueden ser atendidos por cada enlace EPON:** Con las especificaciones de los servicios definidas (23.5Mbps por usuario) cada enlace EPON está en capacidad de soportar 32 usuarios, como se vio en la simulación.
- **Diseñar la planta externa, longitud de enlaces y obras civiles:** Se necesitan 500 fibras alimentadoras con el fin de satisfacer toda la demanda, asumiendo que la

empresa es la única proveedora del servicio de televisión en la ciudad. La longitud de los enlaces depende de la ubicación de los usuarios y la topología utilizada debe ser en árbol para barrios y en bus para edificios de apartamentos.

- **Definir un esquema de energización de los componentes de la EPON:** La energización de componentes se hace en la ubicación del usuario y se instalan UPS para soportar las pérdidas y picos de energía.
- **Definir los equipos de usuario (un solo equipo para todos los servicios o diferentes equipos para cada servicio):** Existen diversas marcas en el mercado, se debe seleccionar un proveedor de equipos que brinde la mejor relación costo beneficio, lo ideal es que los ONT tengan múltiples servicios. Hay que tener en cuenta que estos equipos deben operar a 1490nm para downstream y 1310nm para upstream y la potencia del láser no debe superar los 10dBm.
- **Diseñar la planta de la oficina central (Middleware, servidores de contenido, de gestión, de acceso, pasarelas, enlaces, etc.):** Los OLT en la actualidad soportan hasta 16 fibras alimentadoras, por lo tanto, para atender 16.000 usuarios es necesario instalar 32 equipos OLT. Además se debe instalar los diferentes servidores conforme la oferta de servicios planteada.
- **Llevar a cabo un estudio piloto** con una muestra de usuarios para observar la concurrencia en los servicios, el cumplimiento de los requerimientos de calidad de servicio y calidad de la experiencia y determinar el comportamiento de la red
- **Publicitar los servicios**
- **Poner en marcha la red y los servicios ofrecidos**
- **Optimizar la gestión, operación y mantenimiento de la red**

Como se mencionó en el inicio del capítulo se da cumplimiento al objetivo específico del **literal b** del anteproyecto y se contribuye en gran medida al cumplimiento del objetivo general: **“Dimensionar una red de Acceso EPON en la que se preste el servicio de IPTV en Colombia”**. Además, se da respuesta a la pregunta de investigación citada en el anteproyecto: **“¿Cuántos usuarios de IPTV se pueden soportar por cada fibra óptica alimentadora usada en una red de acceso EPON?”**, llevando a cabo la simulación de diferentes escenarios de evaluación de la red de acceso y del servicio IPTV de acuerdo a los servicios que se presten, a la codificación utilizada y a los requerimientos de ancho de banda y con las características de servicio mencionadas en la **sección 4.3.4**, por lo tanto cada fibra alimentadora en la red de acceso está en capacidad de atender 32 usuarios utilizando codificación MPEG-4.

Al mismo tiempo, al momento de hacer la simulación y evaluar los parámetros de desempeño de la red se da respuesta a la pregunta: **“¿Cuáles son los parámetros de desempeño a evaluar en el dimensionamiento de una red EPON, y cuál es la respuesta de dichos parámetros bajo condiciones de tráfico IPTV?”**, ya que se puede apreciar de manera más tangible o real los resultados de desempeño a nivel físico de los diferentes parámetros bajo condiciones de tráfico simulado con la herramienta OptSim, lo cual se realizó de manera progresiva a medida que se iba avanzando de escenario, por lo cual el último escenario constituye el de mayor tráfico y representa una propuesta de arquitectura final para la prestación de un servicio IPTV incluido en un paquete *Triple-Play*. Como ya se mencionó en la introducción del capítulo, los parámetros evaluados fueron: desempeño de códecs, BER, potencia de transmisión, jitter, señal transmitida y recibida. Los parámetros que en la simulación mostraron mayor variación fueron: la potencia recibida cuando se cambia de 16 a 32 usuarios, la BER cuando se aumenta la tasa de bits y la distancia, y el diagrama del ojo a altas velocidades y en presencia de interferencias.

---

## CONCLUSIONES

---

- Actualmente, debido a la convergencia tecnológica se han desarrollado nuevos servicios de telecomunicaciones tales como IPTV, VoD, VoIP, PPV, PVR, juegos on-line, video llamadas, entre otros servicios interactivos, que aprovechan las características del protocolo IP y exigen conexiones de acceso de mayor velocidad, para superar el problema del cuello de botella que se presenta en redes como xDSL, HFC (Híbrido Fibra Coaxial) e Inalámbricas. En este panorama, las redes EPON surgen como la alternativa más económica y con mejores prestaciones para suministrar este tipo de servicios de nueva generación, ya que hace uso de la fibra óptica y de elementos pasivos en la planta exterior. Esto ha generado interés en varios sectores del mercado, haciendo atractivo el despliegue de este tipo de redes.
- Es indiscutible que la banda ancha se constituye en una tecnología clave para el desarrollo de un país, y aunque particularmente en Colombia aún existe una tasa de penetración baja comparada con otros países de la región, es posible visualizar un mercado potencial atractivo para servicios de banda ancha, como lo es IPTV, para lo cual también es necesario pensar en un modelo regulatorio adecuado que sea convergente por redes, y no por servicios, es decir que cualquier operador de Telecomunicaciones pueda brindar servicios de triple play incluyendo Televisión, independientemente del tipo de tecnología que utilice, ya sea por Cable Coaxial (HFC), xDSL, WiMax, UMTS o redes EPON.
- Durante el desarrollo de este trabajo de grado se recopilaron los conceptos relacionados con EPON e IPTV con el propósito de generar una base teórica que permita identificar sus principales características, parámetros, inconvenientes y ventajas, con el fin de construir un soporte para la generación de un conjunto de reglas de implementación de una red de acceso EPON para la prestación del servicio IPTV.
- Mediante el estudio cuidadoso de la red de acceso, del servicio y del impacto de la elección de códecs sobre el ancho de banda se logró realizar una estimación teórica del número de clientes que cada ONT es capaz de soportar, es decir, se realizó un dimensionamiento de IPTV sobre EPON destacándose la relación entre el valor teórico estimado y el obtenido en la simulación. Lo anterior como consecuencia de la suposición inicial de ciertos eventos y la fijación de algunos parámetros con el fin de facilitar los cálculos matemáticos.
- La elaboración de las reglas de implementación de sistemas IPTV/EPON se convierte en un aporte valioso que brinda orientación y pautas de diseño enfocadas hacia soluciones que conlleven a satisfacer las necesidades de capacidad, calidad, cobertura de usuarios. Esto, debido a que se fundamentan en un estudio previo de los problemas de las redes de acceso desplegadas actualmente y de las ventajas de nuevos servicios como lo es IPTV.
- Mediante el uso de una herramienta de simulación para sistemas de comunicación ópticos, tal como lo es OptSim, fue posible estudiar diversas propiedades ópticas y componentes en el contexto de la red de acceso EPON de nuestro interés. El uso de este tipo de herramientas es importante porque permite apreciar el comportamiento de la red de acceso bajo condiciones simuladas, muy cercanas a las condiciones reales de tráfico y evaluar los



parámetros técnicos en estas condiciones. Particularmente, se observó en la simulación que la potencia recibida está en función del número de usuarios y la distancia a la que estos se encuentran, por ende a mayor número de usuarios, menor potencia recibida y si el receptor se encuentra más lejos del splitter, este valor también disminuye. Este valor de potencia debe tenerse en cuenta a la hora de escoger equipos.

- Los operadores de Telecomunicaciones Colombianos están muy interesados en el despliegue de este tipo de redes de acceso, pero tienen una limitante muy grande ya que se necesita de gran inversión de capital, por lo pronto han optado por realizar el despliegue del servicio IPTV utilizando las redes de cobre y en algunos casos redes inalámbricas.
- Este proyecto es importante para el Grupo de Investigación en Nuevas Tecnologías de Telecomunicaciones – GNTT de la Universidad del Cauca ya que ha abierto una nueva línea de investigación en redes ópticas que no había sido tenida muy en cuenta en proyectos anteriores, además al ser IPTV un servicio nuevo y de gran interés para los operadores de telecomunicaciones es de gran importancia la integración de las temáticas tratadas en este proyecto.

---

## RECOMENDACIONES

---

- Para los operadores de Telecomunicaciones es importante aplicar las reglas de implementación de redes EPON tratadas en este proyecto, ya que permiten optimizar el proceso de despliegue de este tipo de redes, maximizando la relación costo beneficio. Además, es importante que las empresas trabajen con software de simulación de redes ya que en el momento trabajan sobre prototipos, que son más costosos de implementar.
- A futuro es necesario analizar otras tecnologías y estándares que están siendo desarrolladas y que se relacionan con las redes EPON y con IPTV, como son: 10G-EPON, IMS (IP Multimedia Subsystem), IPTV sobre redes WiFi/WiMax, estándares de compresión de audio y video, entre otras. Además, hay que tener presente el proceso de estandarización de IPTV que está siendo desarrollado por la ITU, ya que esto podría generar pautas y recomendaciones generales para la implementación de este servicio a nivel mundial.
- También se debe trabajar en la parte regulatoria del servicio IPTV para Colombia.
- Sería muy importante utilizar una herramienta que permita la simulación de este tipo de redes desde un nivel superior para observar el comportamiento de los diferentes protocolos de transporte, multidifusión y streaming de video, así como del protocolo de control MPCP de la red EPON.
- Se puede trabajar en el análisis del servicio IPTV sobre otras redes de acceso como son xDSL, WiMax, PLC, móviles, etc. también se pueden hacer implementaciones relacionadas con las interfaces de usuario y servicios de valor agregado para diferentes plataformas (TV, PC, Móvil).
- Se espera que el desarrollo e implementación de las redes de acceso ópticas en Colombia se realice en el futuro siguiendo la tendencia mundial, para esto es necesario tener definido el marco regulatorio pertinente a IPTV y realizar alianzas con multinacionales con gran capacidad de inversión que permitan el despliegue rápido de estas redes y servicios.
- Trabajar en investigación en redes de nueva generación que permitan el empalme de las redes de transporte troncales con las redes de acceso ópticas.
- Hacer un estudio de los mecanismos de gestión de las redes de acceso EPON, para garantizar el establecimiento y funcionamiento de los servicios de acuerdo a los parámetros de calidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Held, Gilbert. “*Understanding IPTV*”, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, 2007.
- [2]. Iyer, Deepa. “*Internet Protocol Television (IPTV): A Survival Strategy or Revenue Generator for Telcos*”. 2005. Documento disponible en <http://www.dslforum.org/latestnews/IPTVASurvivalStrategyorRevenueGeneratorforTelcos.pdf>
- [3]. Open TV. “Open TV IPTV Solutions”, 2006. Documento disponible en <http://www.freshiptvnews.com/television.html>.
- [4]. Grupo de Análisis y Prospectiva del Sector de las Telecomunicaciones (GapTel), “Televisión Digital”, 2005. Documento PDF disponible en: [http://observatorio.red.es/gaptel/archivos/pdf/en\\_tvdigital.pdf](http://observatorio.red.es/gaptel/archivos/pdf/en_tvdigital.pdf)
- [5]. Soriano, José Enrique. “Guías fáciles de las TIC”. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación 2006. Artículo disponible en [http://nt.paginasamarillas.es/descargas/pdf/iptv\\_guia.pdf](http://nt.paginasamarillas.es/descargas/pdf/iptv_guia.pdf).
- [6]. International Engineering Consortium. “*IPTV Explained*”, enero de 2007. [http://www.iec.org/newsletter/jan07\\_2/broadband\\_1.html](http://www.iec.org/newsletter/jan07_2/broadband_1.html).
- [7]. Vallori, Jaime. “*IPTV versus Internet TV*”, 2007. Artículo disponible en <http://mosaic.uoc.edu/articulos/jvallori0507.html>.
- [8]. Cotriss, David. “*¿Can IPTV and Internet TV Co-Exist?*”. Daily IPTV, 2007. Artículo disponible en <http://www.dailyiptv.com/news/can-iptv-and-internet-tv-co-exist-041607/>.
- [9]. Valle, Luis. “Desafíos de la IPTV para las telcos”, 2007. Artículo disponible en <http://www.espanol.frecuenciaonline.com/home/contenidos.php?id=75&identificaArticulo=1583>.
- [10]. Fontán, Fernando. “Servicio de Televisión por Internet (IPTV)”, CITEI, septiembre de 2006. Artículo disponible en: [http://www.citel.oas.org/newsletter/2006/septiembre/iptv\\_e.asp](http://www.citel.oas.org/newsletter/2006/septiembre/iptv_e.asp).
- [11]. Xiao, Yang. “*Internet Protocol Television (IPTV): The Killer Application for the Next-Generation Internet*”, Revista IEEE Communications, Vol. 45, No. 11, noviembre de 2007 (pp. 126-133).
- [12]. International Engineering Consortium. “*Internet Protocol Television (IPTV)*”. 2005. Documento online disponible en: <http://www.iec.org/online/tutorials/iptv/index.html>.
- [13]. Nortel Networks. “*Adding high-value services using an IPTV solution*” 2006. Documento PDF disponible en: <http://www.nortel.com/solutions/iptv/collateral/nn113680.pdf>
- [14]. Bubillo, Diego. “El futuro de IPTV en América Latina y su importancia para el Triple Play”, Signals Telecom Consulting.
- [15]. FlexLight Networks. “*Deploying IPTV and Video-on-Demand (VoD) using FlexLight’s GPON Systems*”. Newsletter
- [16]. Telefónica. “Imagenio: La nueva forma de ocio a la carta”, 2004. Documento disponible en [http://www.tid.es/documentos/libros\\_sector\\_telecomunicaciones/imagenio.pdf](http://www.tid.es/documentos/libros_sector_telecomunicaciones/imagenio.pdf).
- [17]. IPDR.org. “*Service Specification- IP Television (IPTV)*”, octubre de 2006. Documento disponible en: [http://www.ipdr.org/public/Service\\_Specifications/3.X/IPTV3.5-A.0.0.pdf](http://www.ipdr.org/public/Service_Specifications/3.X/IPTV3.5-A.0.0.pdf).
- [18]. She, James. “*IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges, and Solutions*”, Revista IEEE communications, Vol. 45, No. 8, agosto de 2007 (pp. 87-93).
- [19]. Cisco Systems. “*Cisco Gigabit-Ethernet Optimized IPTV/Video over Broadband Solution Design and Implementation Guide*”, version 1.0, 2005.
- [20]. Arnason, Bernadin. “*IPTV: The Future is Now*”, NTCA, mayo de 2006. Documento disponible en: [http://www.ntca.org/content\\_documents/NTCA\\_IPTVWhitepaper051906.pdf](http://www.ntca.org/content_documents/NTCA_IPTVWhitepaper051906.pdf).

- [21]. Ramirez, David. “*Converged Video Network Security*”, Alcatel- Lucent, 2005. Documento disponible en: [http://america.liderdigital.com/documentos/Converged\\_Video\\_Network\\_Security\\_Lucent.pdf](http://america.liderdigital.com/documentos/Converged_Video_Network_Security_Lucent.pdf).
- [22]. Harte, Lawrence. “*DRM Systems*”. IPTV Magazine, enero de 2007 (pp. 26-30).
- [23]. The International Engineering Consortium. “*Ethernet Passive Optical Networks EPON*” 2005. Documento online disponible en: <http://www.iec.org/online/tutorials/epon/index.html>
- [24]. Lin, Chinlon. “*Broadband Optical Access Networks and Fiber to the Home*”. Londres: Wiley, 2006.
- [25]. Kramer, Glem. “*Ethernet Passive Optical Networks*”. San Francisco: Mc Graw Hill, 2005.
- [26]. Grady Steve. “*The book on FTTX From design to deployment: A practical Guide to FTTX Infraestructure*”, 2005. Documento PDF disponible, previa suscripción, en: <http://www.adc.com/documentationlibrary/technicalpublications/>
- [27]. IEEE. *IEEE Std 802.3ah-2004, Amendment to IEEE Std 802.3-2002*. New York: IEEE, 2004.
- [28]. Beck, Michael. “*Ethernet in the First Mile*”. New York, Mc Graw Hill, 2005.
- [29]. DSL Forum. “*Triple-play Services Quality of Experiences (QoE) Requirements*”, Technical Report TR-126, Diciembre de 2006. Documento disponible en: <http://www.dslforum.org/techwork/tr/TR-126.pdf>.
- [30]. INTEL. “*H.264 & IPTV Over DSL*”, 2004. Artículo disponible en: [http://envivio.com/pdf/whitepaper\\_H264\\_IPTV\\_Over\\_DSL.pdf](http://envivio.com/pdf/whitepaper_H264_IPTV_Over_DSL.pdf).
- [31]. Harte, Lawrence. “*MPEG Profiles*”. IPTV Magazine, noviembre de 2006 (pp. 18-23).
- [32]. Tektronix. “*A Guide to IPTV: The Technologies, the Challenges and How to Test IPTV*”, 2007. Documento disponible en Internet: <http://www2.tek.com/cmswpt/tidetails.lotr?ct=TI&cs=pri&ci=6542&lc=EN>.
- [33]. Rijo, Daniel. “*Fundamentos de Video Streaming*”, Universidad de la República, diciembre de 2004. Documento disponible en: <http://ie.fing.edu.uy/ense/asign/codif/material/monografias/2004-01.pdf>.
- [34]. Castillo, Gabriel. “*Ethernet y Protocolos TCP/IPv4*”, Sistemas de Telecomunicaciones- Redes II, 2005. Documento disponible en: <http://mixtli.utm.mx/~resdi/materias/IPv4.pdf>.
- [35]. Juniper Networks. “*Introduction to IGMP to IPTV Networks*”, Octubre de 2007. Documento disponible en: [http://www.juniper.net/solutions/literature/white\\_papers/200188.pdf](http://www.juniper.net/solutions/literature/white_papers/200188.pdf).
- [36]. Izal, Mikel. “*Nivel de red: Broadcast y Multicast*”, diciembre de 2005. [PPT] disponible en: [http://helios.tlm.unavarra.es/asignaturas/ro/ro05\\_06/clases-pdf/RO\\_red-7.pdf](http://helios.tlm.unavarra.es/asignaturas/ro/ro05_06/clases-pdf/RO_red-7.pdf).
- [37]. Network Working Group. “*Internet Group Management Protocol*”, versión 3”, Octubre de 2002. Documento disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3376.txt>.
- [38]. Forsyth, Tom. “*Enabling a Quality IPTV Customer Experience*”, Telcordia Technologies, Inc., 2005. Artículo disponible en: [http://www.telcordia.com/library/whitepapers/enabling\\_iptv.jsp](http://www.telcordia.com/library/whitepapers/enabling_iptv.jsp).
- [39]. Ansari, Nirwan. “*Bandwidth allocation for multiservice access on EPONs*”. IEEE Optical Communications (Febrero de 2005), pp. S16-S21
- [40]. Pesavento, Gerry. “*IPACT: A dynamic protocol for an Ethernet PON*”. IEEE Communications magazine (Febrero de 2002), pp. 74-80
- [41]. Zhu, Yongqing. “*A Bandwidth Guaranteed Polling MAC Protocol*”. IEEE Infocom 2003
- [42]. Kramer, Glen. “*¿How efficient is EPON?*” [PDF] Teknovus Inc. Disponible en Internet en la dirección: [http://www.teknovus.com/files/epon\\_efficiency.pdf](http://www.teknovus.com/files/epon_efficiency.pdf)
- [43]. Dinamarca, José Antonio. “*Análisis de Diagramas de Ojo*”, Universidad Técnica Federico Santa María, noviembre de 2002. Documento disponible en: <http://www.elo.utfsm.cl/~elo341/material/DiagOjos.pdf>.
- [44]. Martín, José. “*Sistemas y Redes Ópticas de Telecomunicaciones*”, Prentice Hall, 2004.
- [45]. Hernández, Inmaculada. “*Transmisión Digital Banda Base*”. Documento disponible en: <http://bips.bi.ehu.es/~inma/psc/tema2.pdf>.

- [46]. Lab 2. "Eye Pattern". Documento disponible en: [http://elm.eeng.dcu.ie/~ee407/2006-2007/Labs/Lab2\\_Eye\\_Pattern.pdf](http://elm.eeng.dcu.ie/~ee407/2006-2007/Labs/Lab2_Eye_Pattern.pdf).
- [47]. AHCNET, Telefónica I+D. "Las Telecomunicaciones y la Movilidad en la Sociedad de la Información" [PDF] Sociedad de la información - Telefonica. Disponible en Internet en la dirección:  
<http://www.telefonica.es/sociedaddelainformacion/pdf/publicaciones/movilidad/telecoymovilidad.pdf>
- [48]. Alcatel Lucent. "Enabling Your Access Network to Successfully Deploy IPTV" 2007. [PDF] Disponible en: [http://www1.alcatel-lucent.com/products/getCollateral.jsp;jsessionid=CCFQ55PDMUSWDLAWFRUE1C3MCIYWG13GC?forwardingURL=/com/en/appcontent/opgss/AccNetIPTV\\_twp\\_tcm228-1295741635.pdf&docType=opgRelatedInformation&product=a7302iSAM&colRepID=/com/en/appxml/opgrelatedinformation/enablingyouraccessnetworktosuccessfullydeployiptvtcm2281295751635.jhtml&mime=pdf&pageLevel=4](http://www1.alcatel-lucent.com/products/getCollateral.jsp;jsessionid=CCFQ55PDMUSWDLAWFRUE1C3MCIYWG13GC?forwardingURL=/com/en/appcontent/opgss/AccNetIPTV_twp_tcm228-1295741635.pdf&docType=opgRelatedInformation&product=a7302iSAM&colRepID=/com/en/appxml/opgrelatedinformation/enablingyouraccessnetworktosuccessfullydeployiptvtcm2281295751635.jhtml&mime=pdf&pageLevel=4)
- [49]. Heavy Reading. "White Paper – Assuring Quality Of Experience For IPTV". Julio de 2006. [PDF] Disponible en: [http://www1.alcatel-lucent.com/bnd/news/ip/heavy\\_reading/HR\\_wp\\_Assuring\\_QOE\\_4\\_IPTV.pdf](http://www1.alcatel-lucent.com/bnd/news/ip/heavy_reading/HR_wp_Assuring_QOE_4_IPTV.pdf)
- [50]. Juniper y Nokia Siemens Networks Corporation. "High-quality and resilient IPTV multicast architecture Technical White Paper" 2008 [PDF] Disponible en: [http://www.juniper.net/solutions/literature/white\\_papers/iptv\\_multicast.pdf](http://www.juniper.net/solutions/literature/white_papers/iptv_multicast.pdf)
- [51]. Cortés, Félix. "Selección de una Tecnología de Banda ancha para la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, usando una técnica de decisión multicriterio", Universidad Nacional de Colombia, abril de 2007. Artículo disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092007000100017&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092007000100017&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- [52]. Nolle, Tom. "Triple play broadband services: Quality assurance testing", Techtarged, 2007. Artículo disponible en: [http://searchtelecom.techtarget.com/tip/0,289483,sid103\\_gci1265077,00.html](http://searchtelecom.techtarget.com/tip/0,289483,sid103_gci1265077,00.html).
- [53]. Coward, Mike. "IPTV: A Designer's View", OpenSystems Publishing, 2007. Documento disponible en: <http://www.compactpci-systems.com/pdfs/Continuous.Oct07.pdf>.
- [54]. Network Strategy Partners, LLC. "A Business Case Comparison of Carrier Ethernet Designs for Triple Play Networks", Enero de 2007. Documento disponible en: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns524/ns610/net\\_implementation\\_white\\_paper0900aecd803f6c1d.pdf](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns524/ns610/net_implementation_white_paper0900aecd803f6c1d.pdf).
- [55]. Iyer, Deepa. "Making TV Meaningful: Consumers and IPTV Applications", Parks Associates, 2005. Artículo disponible en: <http://www.cepro.com/asset/4814.pdf>.
- [56]. Poynton, Charles. "Digital video and HDTV". San Francisco CA: John Wiley & Sons. (2004).
- [57]. Simpson, Wes. "IPTV and Internet Video. Expanding the reach of television broadcasting", Focal Press, 2007. Documento disponible en: <http://books.google.com/books?id=0oHNb2a111MC&pg=PA121&dq=sizing+iptv&lr=&hl=es&sig=CZRwgcuvW4ORCZ-fDXuXJMfosw#PPP1,M1>.
- [58]. Nortel. "Introduction to IPTV", Nortel Networks, 2006. Artículo disponible en: <http://whitepapers.zdnet.com/abstract.aspx?&docid=315495&promo=100511>.
- [59]. Pech, Eckart. "IPTV: Technology and Development Predictions", Detecon Inc., 2005. Artículo disponible en: [http://www.iec.org/newsletter/aug06\\_2/analyst\\_corner.pdf](http://www.iec.org/newsletter/aug06_2/analyst_corner.pdf).
- [60]. Bubillo, Diego. "La IPTV estará destinada a un Mercado de Nicho", Revista Elipse, Mayo de 2007.
- [61]. Alonso, M.A., Bueno, C. "Simuladores UMTS", 2004. Documento disponible en: <http://trajano.us.es/~fornes/RSR/2005/UMTS/Simuladores%20UMTS%20-%202005.pdf>.

- [62]. Bernat, Markus. “*Network Modeling and Evaluation Tools for Higher Education*”, University of Applied Sciences, septiembre de 2004. Documento disponible en: [http://nsl.csie.nctu.edu.tw/NCTUnsReferences/Bernat\\_Markus.pdf](http://nsl.csie.nctu.edu.tw/NCTUnsReferences/Bernat_Markus.pdf).
- [63]. Nowak, Dawik. “*Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms for Differentiated Services enabled Ethernet Passive Optical Networks with Centralized Admission Control*”, Dublin City University, 2005.
- [64]. Bai, Xiaofeng. “*Design and Analysis of Ethernet Passive Optical Networks*”. The University of Western Ontario, 2005. Documento disponible en: [http://publish.uwo.ca/~xbai5/index\\_files/MasterThesis.pdf](http://publish.uwo.ca/~xbai5/index_files/MasterThesis.pdf).
- [65]. Garcés, Juan Ignacio “EPONGest. Redes Ópticas de Próxima Generación y Sistemas de Gestión”, Instituto de Investigación en ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Enero de 2007.
- [66]. Network and System Laboratory. “Herramientas Software para la Simulación de Redes de Telecomunicaciones”. Department of Computer Science and Computer Engineering, National Chiao Tung University. [PDF] Documento disponible en: <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/NCTUnsReferences/capitulo4.pdf>.
- [67]. VPI photonics. Pagina disponible en: [http://www.vpiphotonics.com/pda\\_chart.php](http://www.vpiphotonics.com/pda_chart.php).
- [68]. “OptiSystem” de OptiWave. Página disponible en: <http://www.optiwave.com/site/products/system.html>.
- [69]. RSoft Design Group. “*OptSim user guide*”. Ossining NY: RSoft Design (2007)
- [70]. Klinges, Carl y Patel, Jigesh (Soporte Técnico RSoft Design). Soporte técnico por correo electrónico. Popayan, Febrero de 2008.
- [71]. RSoft Design Group. “*OptSim Models Reference*”. *Volume II Block Mode*. Ossining NY: RSoft Design (2007)
- [72]. Asociación Colombiana para la Investigación de Medios (ACIM). Módulo de Televisión Estudio General de Medios –EGM –Segunda Ola 2007 (II-2007). [PDF] Comisión Nacional de Televisión. Disponible en Internet en la dirección: [http://www.cntv.org.co/cntv\\_bop/noticias/diciembre/EGM\\_2007.pdf](http://www.cntv.org.co/cntv_bop/noticias/diciembre/EGM_2007.pdf)