

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

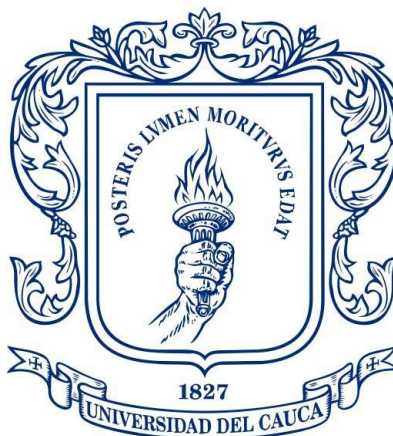


Juan Darío Delgado Lasso
Joseph Camilo Marcillo Bravo

Universidad del Cauca

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

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



ANEXOS A, B, C, D

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

Director: PhD. Ing. José Giovanni López Perafán

Universidad del Cauca

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

TABLA DE CONTENIDO

ANEXO A. GENERALIDADES SOBRE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO	1
A.1. MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO	1
A.1.1. Modelo de referencia OPM	1
A.1.2. Parámetros de desempeño óptico	2
A.1.2.1. Diagrama del ojo	2
A.1.2.2. Factor de Calidad	4
A.1.2.3. Tasa de Error de Bit	4
A.1.2.4. <i>Jitter</i>	5
ANEXO B. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y ELEMENTOS UTILIZADOS.....	7
B.1. IMPLEMENTACIÓN.....	7
B.1.1. Caso de estudio No.1. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Digital	7
B.1.2. Caso de estudio No.2. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Analógico	9
B.2. ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN.....	11
B.2.1. Caso de estudio No.1. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Digital	11
B.2.2. Caso de estudio No.2. Transmisión de VoIP, Internet CATV Analógico	18
ANEXO C. PROCEDIMIENTOS MATEMATICOS UTILIZADOS Y CARACTERIZACIÓN DEL PARÁMETRO CSO	29
C.1. CALCULO DEL ENLACE	29
C.2. MAGNITUD DEL VECTOR DE ERROR Y TASA DE ERROR DE BIT	31
C.3. DISTORSIÓN NO LINEAL	32
ANEXO D. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES	34
D.1. CASO DE ESTUDIO NO.1. SERVICIO TRIPLE PLAY CONFORMADO POR INTERNET/VoIP Y CATV DIGITAL	34
D.2. CASO DE ESTUDIO NO.2. SERVICIO TRIPLE PLAY CONFORMADO POR INTERNET/VoIP Y CATV ANALÓGICO	40
BIBLIOGRAFÍA.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura A.1. Capas del modelo de referencia OPM	1
Figura A.2. Diagrama del ojo de una secuencia de 3 bits.....	2
Figura A.3. Propiedades fundamentales del diagrama del ojo.....	3
Figura A.4. Características de la forma del pulso	3
Figura A.5. Diagrama del ojo con los fenómenos que afectan la calidad de la señal.....	4
Figura A.6. Parámetros que intervienen en el cálculo de la BER	5
Figura A.7. Efecto del Jitter en el diagrama del ojo.	6
Figura B.1. Bloque transmisor OLT.	8
Figura B.2. Bloque receptor ONT	9
Figura B.3. Bloque transmisor OLT.	10
Figura B.4. Bloque receptor ONT	11
Figura B.5. Fuente laser de onda continua.....	13
Figura B.6. Dispositivo modulador óptico de amplitud	14
Figura B.7. Dispositivo modulador M-QAM.....	14
Figura B.8. Modulación 16-QAM.	15
Figura B.9. Dispositivo filtro óptico	15
Figura B.10. Dispositivo fotodiodo	16
Figura B.11. Dispositivo filtro eléctrico.....	16
Figura B.12. Dispositivo demodulador M-QAM.....	16
Figura B.13. Componente señal sinusoidal	17
Figura B.14. Dispositivo analizador de señales eléctricas	17
Figura B.15. Dispositivo analizador de señales eléctricas	18
Figura B.16. Dispositivo analizador del diagrama de constelación	18
Figura B.17. Dispositivo analizador de señales ópticas.....	18
Figura B.18. Generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias en OptSim®	19
Figura B.19. Generador de señales eléctricas en OptSim®	19
Figura B.20. Modulador Mach-Zehnder en OptSim®.....	20
Figura B.21. Láser de onda continua en OptSim®	21
Figura B.22. Generador de señales eléctricas en OptSim®	21
Figura B.23. Láser directamente modulado en OptSim®	22
Figura B.24. Receptor óptico compuesto en OptSim®.	23
Figura B.25. Filtro eléctrico en OptSim®.	24
Figura B.26. Dispositivo analizador del parámetro razón de error de bit.	25
Figura B.27. Dispositivo analizador de señales de espectro.....	25
Figura B.28. Dispositivo Multiplot.	25
Figura B.29. Fibra monomodo.....	26
Figura B.30. Características de la Fibra SMF-28 Corning	26
Figura B.31. Dispositivo splitter óptico.....	27
Figura B.32. Circulador óptico en OptSim®.....	27

Figura B.33. Modelo de lazo de repetición.	28
Figura C.1. Representación gráfica de EVM.	31

LISTA DE TABLAS

Tabla B.1. Parámetros del componente generador de datos.....	11
Tabla B.2. Parámetros del driver eléctrico.....	13
Tabla B.3. Parámetros de configuración del laser	13
Tabla B.4. Parámetros del componente modulador M-QAM	14
Tabla B.5. Parámetros del demodulador M-QAM.....	16
Tabla B.6. Parámetros del componente de señal sinusoidal	17
Tabla B.7. Parámetros del generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias.....	19
Tabla B.8. Parámetros del generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias.....	20
Tabla B.9. Parámetros del Modulador Mach-Zehnder.....	20
Tabla B.10. Parámetros del Láser de onda continua.....	21
Tabla B.11. Parámetros del generador de señales eléctricas.....	22
Tabla B.12. Parámetros del Láser directamente modulado.....	22
Tabla B.13. Parámetros del Láser directamente modulado.....	24
Tabla B.14. Parámetros del Filtro eléctrico.....	24
Tabla B.15. Atenuación según la relación del splitter.	27
Tabla B.16. Propiedades del dispositivo Repeat Loop Model.....	28
Tabla C.1. Atenuación en la Topología en árbol.....	30
Tabla C.2. Atenuación en la Topología en bus y en anillo.....	31
Tabla D.1. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 1a).....	34
Tabla D.2. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en árbol (Caso 1a).....	34
Tabla D.3. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 1a).....	35
Tabla D.4. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en bus (Caso 1a).....	35
Tabla D.5. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 1a).	36
Tabla D.6. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en anillo (Caso 1a)	37
Tabla D.7. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 1b).....	37
Tabla D.8. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en árbol (Caso 1b).....	38

Tabla D.9. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 1b).....	38
Tabla D.10. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en bus (Caso 1b).....	39
Tabla D.11. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 1b)	39
Tabla D.12. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en anillo (Caso 1b)..	40
Tabla D.13. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 2a).....	40
Tabla D.14. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en árbol (Caso 2a).....	41
Tabla D.15. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 2a).....	42
Tabla D.16. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en bus (Caso 2a).....	42
Tabla D.17. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 2a)..	43
Tabla D.18. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en anillo (Caso 2a)..	43
Tabla D.19. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 2b).....	44
Tabla D.20. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en árbol (Caso 2b).....	44
Tabla D.21. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 2b).....	45
Tabla D.22. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en bus (Caso 2b).....	45
Tabla D.23. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 2b)	46
Tabla D.24. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en anillo (Caso 2b)..	46

ANEXO A. GENERALIDADES SOBRE PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO

En este anexo se presentan los conceptos relacionados con el monitoreo de desempeño óptico, utilizado como referencia para identificar los parámetros que permiten evaluar el desempeño en redes FTTH-GEPON.

A.1. MONITOREO DE DESEMPEÑO ÓPTICO

El monitoreo de desempeño óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*) hace referencia a un enfoque utilizado para el monitoreo a nivel de la capa física de la calidad de la señal, con el propósito de determinar el desempeño o buen funcionamiento, en el dominio óptico, de la señal que viaja a través de la red [1].

De manera secuencial, OPM proporciona las herramientas necesarias para resolver incertidumbres de una manera segura y sencilla, estas interrogantes son:

- ✓ ¿Qué se quiere medir en la red? → Calidad de la señal
- ✓ ¿Cómo se va a medir? → Parámetros de monitoreo óptico
- ✓ ¿Cómo se leen los resultados? → Técnicas de monitoreo

A.1.1. Modelo de referencia OPM

El modelo de referencia OPM está constituido por tres capas: capa de monitoreo de transporte, capa de monitoreo de calidad de la señal y capa de monitoreo de desempeño del protocolo [1] [2], como se muestra en la figura A.1.

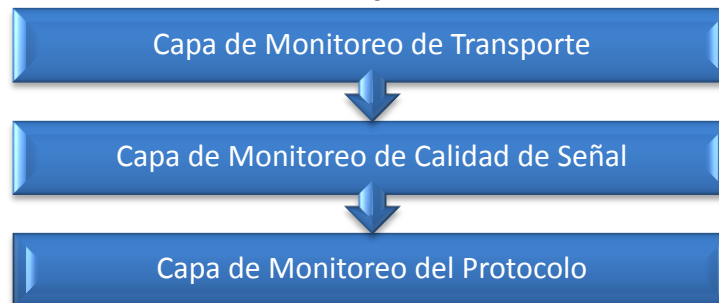


Figura A.1. Capas del modelo de referencia OPM. Tomada de [3]

A continuación se explica cada capa del modelo de referencia OPM:

- Capa de monitoreo de transporte. Hace referencia a la determinación de las características en el dominio óptico fundamentales para la gestión y el transporte en la capa WDM. Son ejemplos de medidas de la capa de transporte: mediciones en tiempo real de la presencia del canal, registro de longitud de onda, niveles de potencia y relación señal a ruido óptica (OSNR, *Optical Signal Noise Ratio*) espectral [1] [2].
- Capa de Monitoreo de la calidad de la señal o canal. Se selecciona una longitud de onda específica y se realizan medidas sensitivas de transmisión de señal. Los parámetros que son analizados en la capa de calidad de la señal son: Factor de

calidad o Factor Q, BER, el diagrama del ojo (del cual se pueden deducir otros parámetros como *Jitter*, potencia de las señales, niveles de ruido) y las distorsiones que este sufre debido a la dispersión, a efectos lineales y efectos no lineales [1] [2] [3].

- Capa de monitoreo de protocolo. Implica el seguimiento de la información del protocolo de datos y el monitoreo del desempeño de protocolo (PPM, *Protocol Performance Monitoring*) [2].

A.1.2. Parámetros de desempeño óptico

A continuación, se describen los parámetros de desempeño ópticos definidos por OPM, con base en [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11].

A.1.2.1. Diagrama del ojo

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

El diagrama del ojo permite observar en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones de posibles unos y ceros lógicos que se propagan en el canal de transmisión. En la figura A.2 se muestran las posibles combinaciones de una secuencia de tres bits que tiene una cantidad total de ocho combinaciones y como a partir de estas se esquematiza el diagrama del ojo.

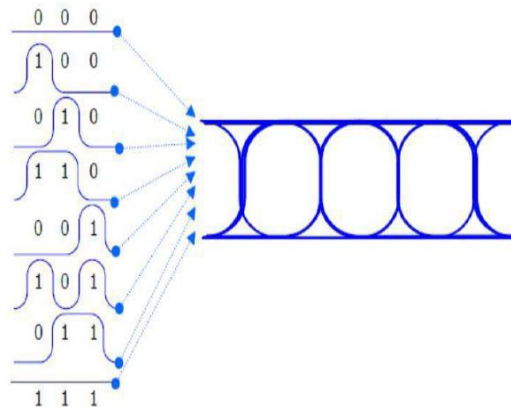


Figura A.2. Diagrama del ojo de una secuencia de 3 bits. Tomada de [12].

El diagrama del ojo tiene cinco propiedades fundamentales nivel de 1 lógico, nivel de 0 lógico, cruce de amplitud, cruce de tiempo y periodo de bit, estas propiedades están relacionadas con distintas características de la forma del pulso como son Tiempo de subida, Tiempo de bajada, Impulso por encima e Impulso por debajo. En la figura A.3 se

puede visualizar las propiedades fundamentales y en la figura A.4 se observan las características.

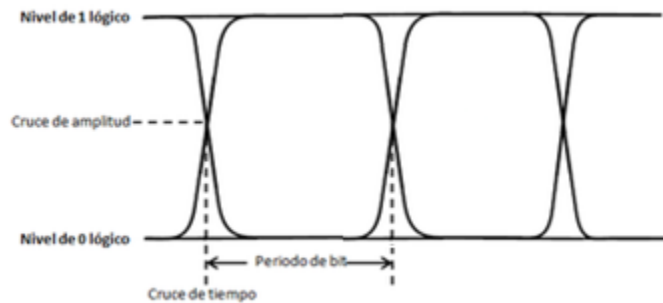


Figura A.3. Propiedades fundamentales del diagrama del ojo. Tomada de [8]

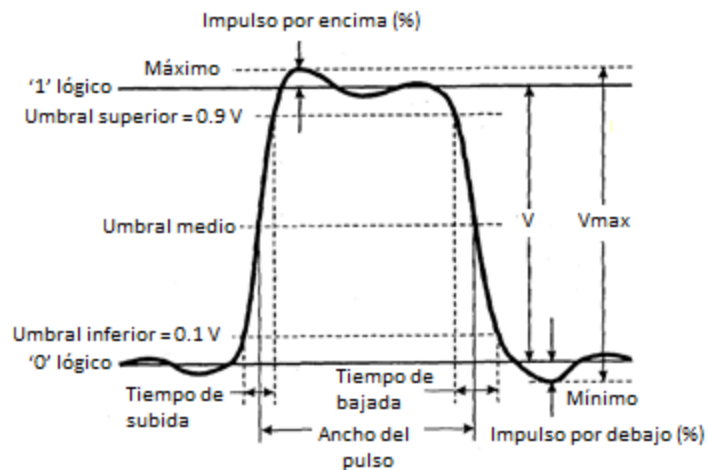


Figura A.4. Características de la forma del pulso. Modificada de [8]

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

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

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

En la Figura A.5 se muestran los efectos del sistema sobre la señal transmitida.

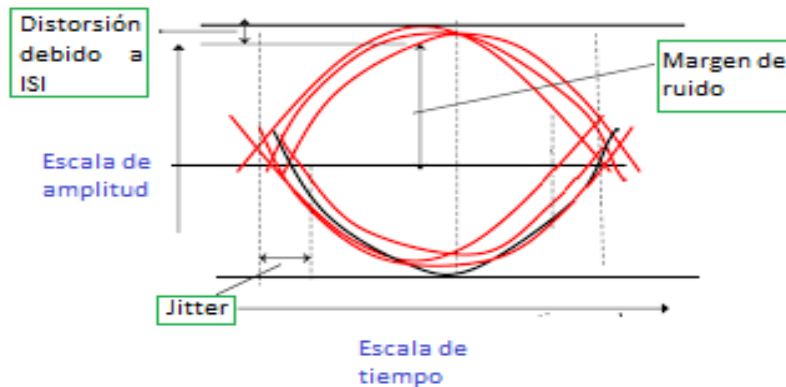


Figura A.5. Diagrama del ojo con los fenómenos que afectan la calidad de la señal. Modificada de: [13]

A.1.2.2. Factor de Calidad

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

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (A.1)$$

A.1.2.3. Tasa de Error de Bit

La medida más significativa en comunicaciones ópticas es la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Ratio*) que representa un criterio cuantitativo que evalúa la calidad de la información recibida, y se refiere a la relación entre el número de bits en error que se reciben y el número total de bits que se transmiten en determinado periodo de tiempo. Según el IEEE 802.3ah para GEPON, el valor usual de la BER se encuentra alrededor de 10^{-12} , que corresponde aprox. a un Factor Q de 17.03. Para el servicio de CATV Digital, el estándar no define un valor específico de BER, por lo que para este servicio se toma como referencia el valor considerado en [14] que corresponde a una BER de 10^{-4} . En la figura A.6 se observa la distribución de ruido y el área correspondiente a las probabilidades de error de regeneración para cada nivel lógico.

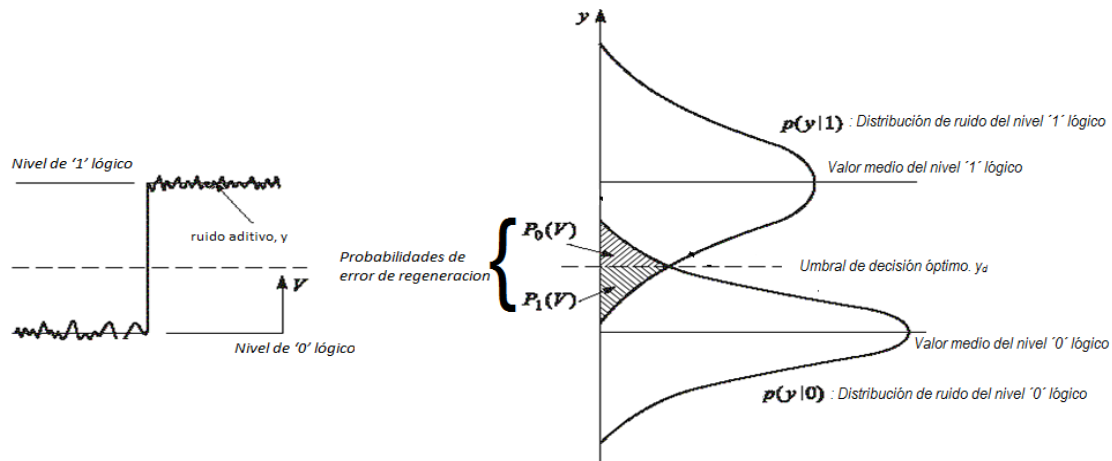


Figura A.6. Parámetros que intervienen en el cálculo de la BER. Modificada de [7]

La tasa de error de bit está en función del factor Q , siempre y cuando las distribuciones en el receptor de las señales correspondientes a los '1' y '0' lógicos ostentan una forma Gaussiana. La relación entre estos dos parámetros se define en la ecuación A.2, donde la función $erfc(x)$ es la función complementaria de error (erfc, *Complementary Error Function*)

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

A.1.2.4. Jitter

El *Jitter* se define como una desviación de fase respecto a la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal. Se calcula a partir de la desviación estándar del histograma que contiene las diferentes formas del pulso.

El *Jitter* al no ser tratado adecuadamente puede ser un fenómeno indeseable para todo sistema de comunicaciones, debido a que degrada la calidad y desempeño del enlace. Por lo tanto, si no es controlado causa errores en la recepción de bits degradando el BER y puede introducir ISI entre los pulsos propagados en el sistema provocando que las señales que componen el pulso se desplacen y se mezclen o se traslapen, haciendo casi imposible el reconocimiento correcto de los niveles de la señal en el receptor.

En la figura A.7 se observa gráficamente el efecto del *Jitter* en el diagrama del ojo, provocando que su abertura sea nula, esto es, un ojo completamente cerrado. Lo anterior implica que al receptor le sea imposible recobrar el sincronismo y por ende procesar correctamente la señal transmitida.

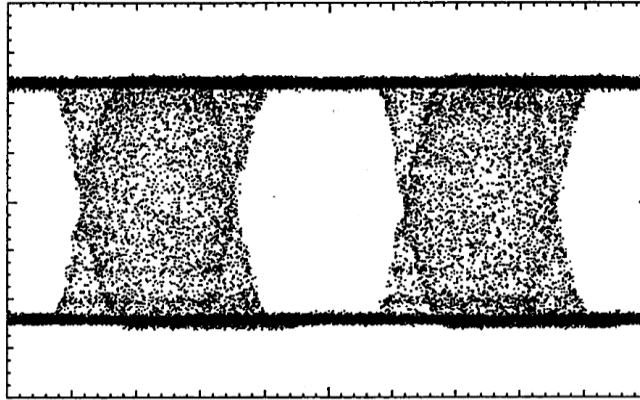


Figura A.7. Efecto del Jitter en el diagrama del ojo. Tomado de [8].

ANEXO B. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y ELEMENTOS UTILIZADOS

En este anexo se presenta la implementación de los escenarios de simulación en la herramienta de simulación y los elementos más importantes que fueron utilizados. Los espacios del escenario general de simulación definidos por las topologías de red GEPON con arquitectura FTTH y los casos de simulación establecidos en la sección 4.2, se implementaron en la herramienta de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas OptSim® de *Synopsis, Inc.* Como se mencionó en la sección 4.2, la mayoría de parámetros de configuración de los componentes utilizados para la implementación, se basan en los sugeridos por defecto en la herramienta de simulación.

B.1. IMPLEMENTACIÓN

En primer lugar, se implementaron los dos nodos principales de una red FTTH-GEPON determinados por el ONT y el OLT. Posteriormente, se implementaron los tres espacios del escenario general a partir de los cuales se realizaron las simulaciones.

B.1.1. Caso de estudio No.1. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Digital

El modulo transmisor de VoIP e Internet (P-OLT) se implementó de la siguiente manera:

- El generador de tráfico o de datos está constituido por un generador de datos *pseudo* aleatorio (PRBS, *Pseudo Random Binary Source*) el cual permite simular la señal de datos correspondiente a los servicios VoIP e Internet de manera integrada, a una tasa de bits de 1.25 Gbps.
- Un driver eléctrico de no retorno a cero (NRZ, *Non Return to Zero*) cuya función es transformar la información lógica a una señal eléctrica.
- Un modulador de amplitud externo Mach-Zehnder
- Un láser de onda continua externamente modulado para convertir la señal eléctrica a una señal óptica con una longitud de onda de 1490 nm.

Por su parte, el modulo transmisor CATV Digital (V-OLT) se implementó de la siguiente manera:

- El generador de tráfico de datos está constituido por un generador de datos *pseudo* aleatorio (PRBS, *Pseudo Random Binary Source*) el cual permite simular la señal de datos correspondiente al servicio de CATV Digital, a una tasa de bits de 0.8 Gbps.
- Un modulador 16 QAM que permite simular la transmisión de CATV Digital.
- Un modulador de amplitud externo Mach-Zehnder
- Un láser de onda continua externamente modulado para convertir la señal eléctrica a una señal óptica con una longitud de onda de 1550 nm.
- Un amplificador EDFA tipo *booster*, ubicado entre el transmisor y la red óptica de distribución.

En la figura B.1 se muestra el modulo transmisor implementado en el modo muestra de la herramienta de simulación:

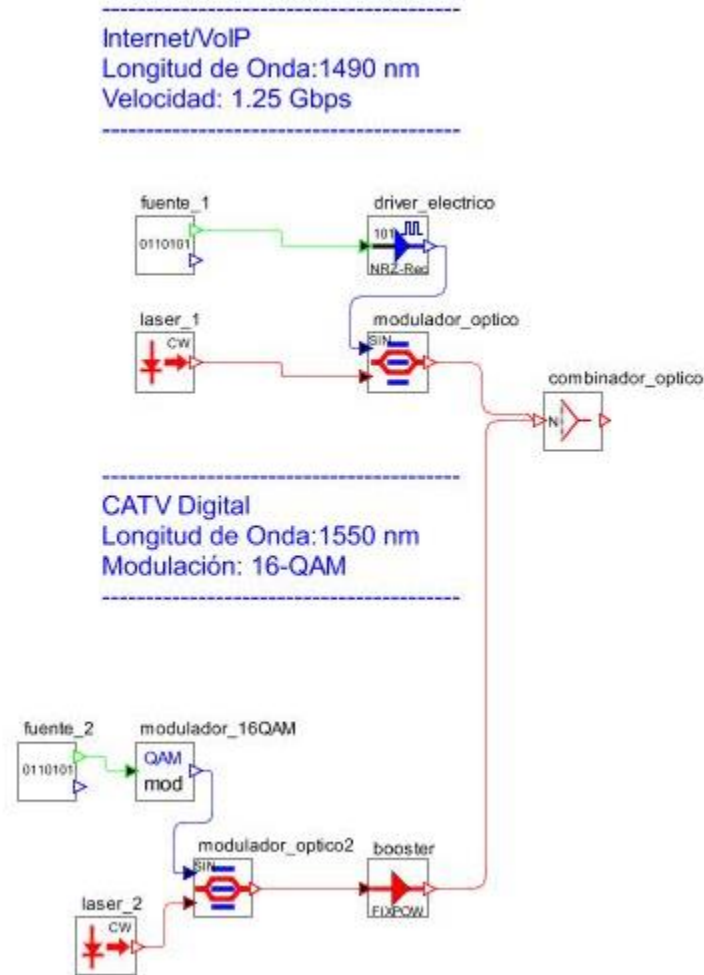


Figura B.1. Bloque transmisor OLT.

Luego, el receptor ONT consiste de dos receptores independientes, uno para Internet y VoIP y otro para CATV Digital.

El receptor de Internet y VoIP se modeló de la siguiente manera:

- Un filtro óptico sintonizado a una longitud de onda de 1490 nm.
- Un foto-receptor tipo PIN (*Positive Intrinsic Negative*) que convierte la señal óptica a una señal eléctrica.
- Un filtro eléctrico de Bessel.
- Elementos de medición.

El receptor de CATV Digital se modeló de la siguiente manera:

- Un filtro óptico sintonizado a una longitud de onda de 1550 nm.

- Un foto-receptor tipo PIN (*Positive Intrinsic Negative*) que convierte la señal óptica a una señal eléctrica.
- Un filtro eléctrico de Bessel.
- Un sistema de recepción 16-QAM constituido por un generador de una onda sinusoidal, una señal de reloj y un demodulador 16-QAM.
- Elementos de medición.

En la figura B.2 se muestra el modulo receptor de Internet/VoIP y CATV Digital implementado en el modo muestra de la herramienta de simulación:

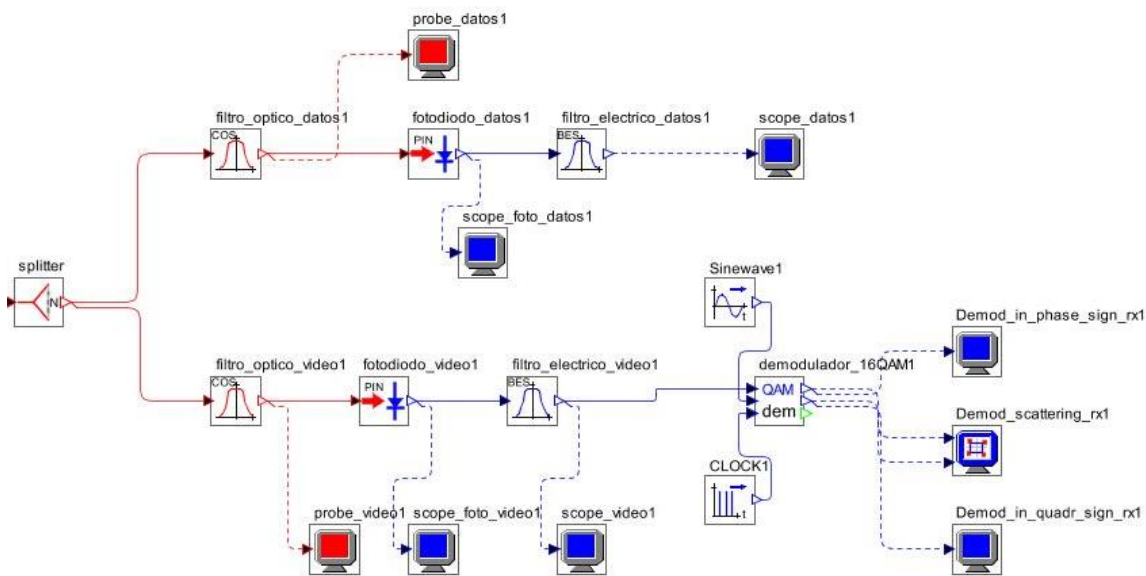


Figura B.2. Bloque receptor ONT

B.1.2. Caso de estudio No.2. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Analógico

El modulo OLT está constituido por un módulo transmisor de Internet/VoIP (P-OLT) y modulo transmisor de CATV analógico (V-OLT):

El modulo transmisor de CATV analógico (V-OLT) se implementó de la siguiente manera:

- Generador sinusoidal analógico.
- Un láser directamente modulado.

El módulo transmisor de VoIP e Internet (P-OLT) se implementó de la misma manera

- Generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias
- Generador de señales eléctricas.
- Modulador Mach-Zehnder.
- Láser de onda continua.

En la figura B.3 se muestra el modulo OLT implementado en la herramienta de simulación:

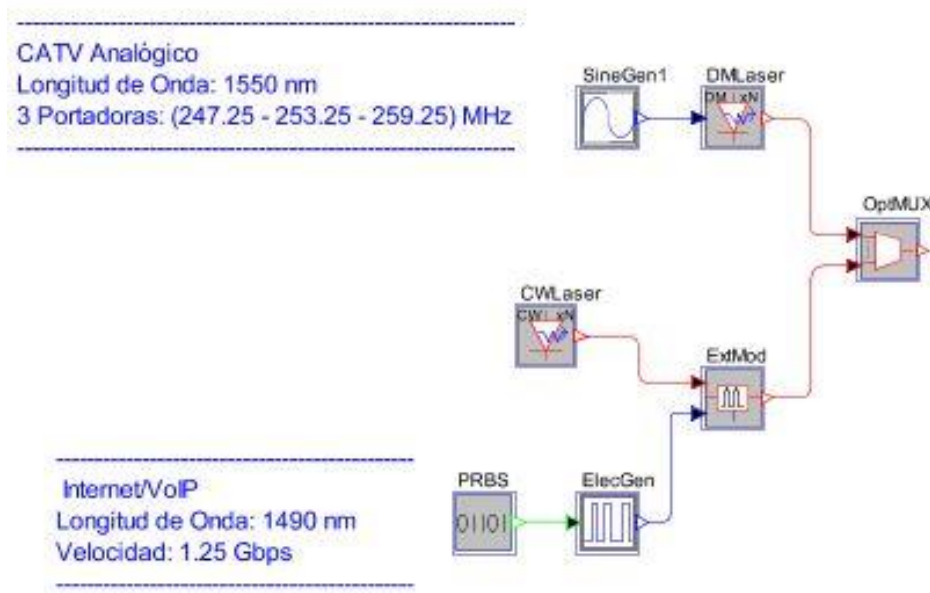


Figura B.3. Bloque transmisor OLT.

Luego, el módulo ONT consiste de dos receptores independientes, uno para Internet y VoIP y otro para CATV analógico.

El receptor de Internet y VoIP se implementó de la siguiente manera:

- Un filtro óptico coseno.
- Receptor óptico compuesto

El receptor de CATV analógico se implementó de la siguiente manera:

- Un filtro óptico Gaussiano.
- Un Receptor óptico compuesto
- Filtro eléctrico pasa-bajo de Bessel.

En la figura B.4 se muestra el modulo receptor de Internet/VoIP y CATV analógico implementado en el modo bloque de la herramienta de simulación:

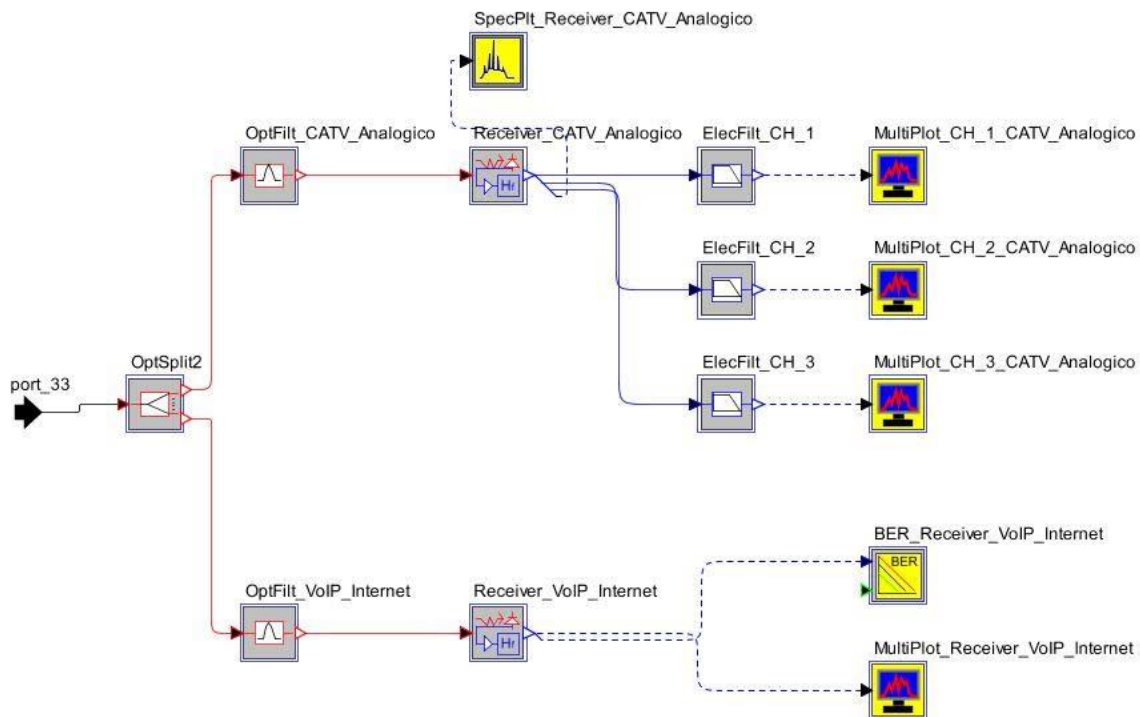


Figura B.4. Bloque receptor ONT

B.2. ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN

A continuación se describen los elementos utilizados para llevar a cabo las simulaciones de las topologías de red FTTH-GEPON, con base en las guías de usuario que proporciona la herramienta de simulación OptSim® [15] [16].

B.2.1. Caso de estudio No.1. Transmisión de VoIP, Internet y CATV Digital

A continuación se describen los elementos utilizados para llevar a cabo la simulación del caso de estudio No.1 en el modo muestra de la herramienta OptSim®.

- **Generador de datos *pseudo*-aleatorio**

Este componente simula una fuente de datos y genera una señal lógica *pseudo*-aleatoria o determinista, según el usuario desee.

Los parámetros básicos que permiten configurar este bloque se muestran en la tabla B.1.

Tabla B.1. Parámetros del componente generador de datos

Parámetro	Significado	Unidades
Name	Permite configurar el nombre del componente	
Bit rate	Tasa de bits de la señal lógica generada	[Gbps]

Sequence	Configura la generación del tipo de secuencia de bit (<i>pseudo</i> aleatoria o determinista)	
Pseudo random sequence mode		
Generating polynomial type	Configura el polinomio generador a utilizar (aleatorio o determinista) ¹	
Bit edge	Permite configurar el tiempo de inicio de la secuencia de bits con respecto al tiempo de inicio de la simulación (aleatorio o determinista)	
Bit edge with respect to simulation start time	Si el anterior parámetro es determinista, el usuario puede cambiar el <i>bit edge</i> respecto al tiempo de inicio de la simulación	
Starting point type	Permite configurar como es seleccionado el primer bit de la simulación entre la secuencia de bits <i>pseudo</i> -aleatoria (aleatorio o determinista)	
Starting point in the sequence	Si el anterior parámetro es determinista, permite configurar el primer bit de la simulación como el <i>n</i> -ésimo bit de la secuencia <i>pseudo</i> -aleatoria escogida.	
Logical level: out	Permite configurar la cantidad de bits por símbolo	

- **Driver eléctrico**

Este componente convierte la señal de entrada lógica a una señal eléctrica de salida. La herramienta ofrece múltiples modelos, tales como NRZ rectangular, *NRZ raised cosine*, *RZ rectangular*, *RZ raised cosine*, *RZ supergaussian* y *RZ soliton*. Para el trabajo de grado se utilizó el NRZ rectangular, puesto que es el más utilizado para el tipo de redes estudiadas.

Los parámetros básicos que permiten configurar este bloque se muestran en la tabla B.2.

¹ Cuando se hace referencia al término “aleatorio” se quiere decir que la herramienta configura automáticamente el valor del respectivo parámetro, a diferencia del término “determinista” en el cual el usuario configura a su manera dicho parámetro.

Tabla B.2. Parámetros del driver eléctrico

Parámetro	Significado
Low level	Es el valor de la señal de salida cuando un cero lógico es transmitido
High level	Es el valor de la señal de salida cuando un uno lógico es transmitido

- **Laser externamente modulado**

Este bloque modela una fuente de laser de onda continua (CW, *Continue Wave*) de tipo Lorentzian modulado externamente por una señal eléctrica, el cual emite de manera continua con una potencia constante. En la figura B.5, se ilustra el icono de este componente.



Figura B.5. Fuente laser de onda continua

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.3.

Tabla B.3. Parámetros de configuración del laser

Parámetro	Significado	Unidades
CW power	Potencia de salida del laser	[dBm]
Center Frequency	Longitud de onda de emisión del laser	
FWHM	Ancho del espectro de potencia	[MHz]
Laser Phase	Configura la fase del láser en el inicio de la simulación (Aleatoria o determinista)	-

- **Modulador óptico**

Este bloque modela un modulador de amplitud óptico externo que modula la luz radiada por un láser antes de su acoplo a la fibra. Su función principal es la de convertir los pulsos provenientes de una fuente eléctrica en pulsos ópticos, a partir de una entrada lumínica proveniente de un dispositivo laser. Para mayor comprensión respecto a los tipos de modulación óptica consultar [17]. En la figura B.6, se ilustra el icono de este componente.



Figura B.6. Dispositivo modulador óptico de amplitud

- **Modulador QAM**

Este componente genera una señal digital modulada en formato M-QAM (utilizando código Gray). El número de niveles de la modulación lo define el usuario y está determinado por la dimensión de la señal lógica de entrada. Por ejemplo, una señal lógica de 4 bits origina una modulación 16-QAM, una señal lógica de 6 bits produce una modulación de 64-QAM. Para este trabajo de grado se utilizó un formato de modulación de 16-QAM con base en la red de referencia que ofrece la herramienta de simulación para el servicio de CATV digital y con base en el estado del arte consultado. En la figura B.7, se ilustra el icono de este componente.



Figura B.7. Dispositivo modulador M-QAM

Los parámetros básicos que permiten configurar este bloque se muestran en la tabla B.4.

Tabla B.4. Parámetros del componente modulador M-QAM

Parámetro	Significado	Unidades
Frequency	Frecuencia portadora de la señal generada	[THz]
Output_Amplitude	Valor <i>r.m.s</i> de la envolvente de la señal de salida	-
Signal Lin logical level	Dimensión de la señal lógica de entrada, es decir, el número de bits por símbolo	-

La modulación QAM es una modulación digital en la que el mensaje esta contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida. Está basada en la transmisión de dos mensajes independientes por un único medio, lo cual se consigue modulando una misma portadora, desfasada 90° entre uno y otro mensaje. Esto origina dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda mejorando la eficiencia de ancho de banda que se consigue con esta modulación. En el caso de la modulación 16-QAM, utiliza símbolos de cuatro bits, lo que resulta en un alfabeto de 16 símbolos. En otras palabras, permite contar con 16 estados diferentes de salida, los cuales están determinados por el número de símbolos mapeados en su diagrama de constelación, como se observa en la figura B.8a. Cada uno de estos símbolos está representado a través de cuatro bits, de los cuales, dos de ellos corresponden a la componente en cuadratura y los otros dos

pertencen a la componente en fase [18] [19]. Como se sabe, en todo sistema digital, el diagrama del ojo de permite visualizar errores en los datos transmitidos, por lo que para 16-QAM el diagrama del ojo característico se muestra en la figura B.8b.

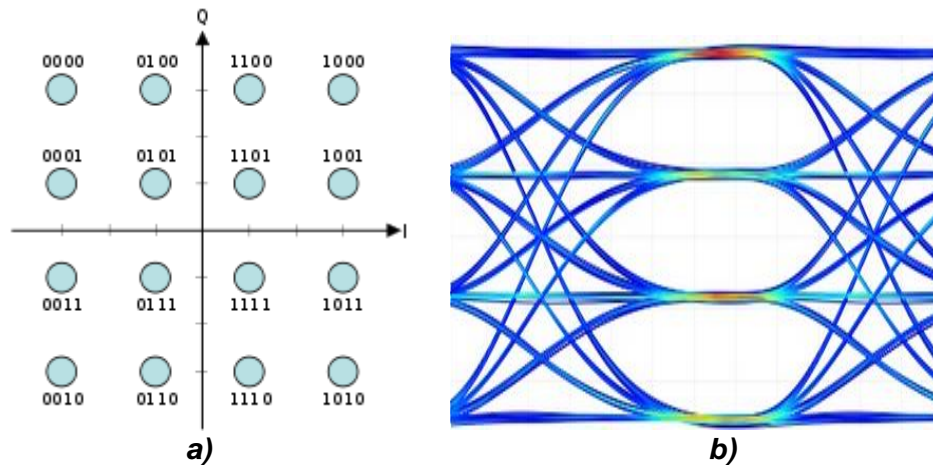


Figura B.8. Modulación 16-QAM: a) Diagrama de constelación, b) Diagrama del ojo. Tomada de: [20].

- **Filtro óptico**

Este dispositivo simula un filtro óptico real, el cual tiene la capacidad de seleccionar una banda de longitudes de onda y de eliminar el resto. El uso de este dispositivo es de gran importancia en cualquier sistema de comunicaciones ópticas ya que permite la eliminación del ruido introducido por componentes (por ejemplo amplificadores), la equalización de la respuesta de amplificadores ópticos y la selección de canales en sistemas WDM [21].

La herramienta proporciona cinco modelos de filtros ópticos, de los cuales el utilizado para este trabajo de grado fue el de coseno realzado, cuyas características pueden profundizarse en [15]. La figura B.9 muestra el icono para este componente.

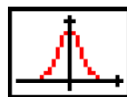


Figura B.9. Dispositivo filtro óptico

- **Fotodiodo**

Este dispositivo permite transformar la señal óptica a una señal eléctrica, generando una corriente eléctrica a partir de la potencia de una señal óptica. La herramienta dispone de dos tipos de fotodiodo: PIN y APD, de los cuales el mas utilizado es el primero debido a su fácil fabricación, su alta fiabilidad y bajo ruido [21]. Sus características pueden profundizarse en [15]. La figura B.10 muestra el icono para este componente.

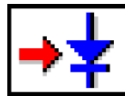


Figura B.10. Dispositivo fotodiodo

- **Filtro eléctrico**

Este dispositivo permite manipular y modificar el espectro de frecuencia de la señal de entrada para obtener en la salida una señal con mejor calidad, al eliminar el ruido introducido por el sistema de comunicación. La herramienta proporciona diferentes modelos de filtros, entre los cuales, el seleccionado en este trabajo de grado es el de tipo Bessel pasa-bajo (para la señal de datos) y pasa-banda (para la señal de video), debido a sus características, las cuales se exponen en [15]. La figura B.11 muestra el icono para este componente.

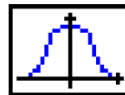


Figura B.11. Dispositivo filtro eléctrico

- **Demodulador QAM**

Este componente recibe una señal M-QAM, obtiene las señales banda base en cuadratura y saca como señal lógica de salida a la cadena de bits detectada. La figura B.12 muestra el icono para este componente.



Figura B.12. Dispositivo demodulador M-QAM

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.5.

Tabla B.5. Parámetros del demodulador M-QAM

Parámetro	Significado	Unidades
Frequency	Frecuencia portadora	[THz]
Decision_threshold	Valor del umbral de decisión del demodulador	-
Signal L_out logical level	Es la dimensión de la señal lógica de salida, es decir, el número de bits por símbolo.	-

- **Señal sinusoidal**

Este componente simula un generador de onda sinusoidal. Es utilizada en el sistema receptor de video para el proceso de demodulación como referencia de la portadora. La figura B.13 muestra el icono para este componente.



Figura B.13. Componente señal sinusoidal

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.6.

Tabla B.6. Parámetros del componente de señal sinusoidal

Parámetro	Significado	Unidades
<i>Frequency</i>	Frecuencia de la señal	[THz]
<i>Amplitude</i>	Amplitud pico de la señal	-
<i>Phase</i>	Es la fase de partida de la señal	[rad]

- **Generador de Señal de reloj**

Este componente simula una señal de reloj, proporcionando pulsos a una tasa de bits dada. En este caso, permite la sincronización y la recuperación de la señal de televisión en el receptor. La figura B.14 muestra el icono para este componente.

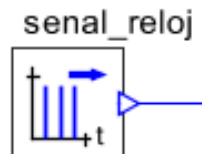


Figura B.14. Dispositivo analizador de señales eléctricas

- **Analizador de señales eléctricas.**

Este componente simula un osciloscopio para señales eléctricas. Permite visualizar la amplitud de la señal eléctrica, el diagrama del ojo, espectro de potencia de la señal eléctrica y el histograma en el instante óptimo de muestreo. La figura B.15 muestra el icono para este componente.



Figura B.15. Dispositivo analizador de señales eléctricas

- **Analizador de diagrama de constelación**

Este componente genera el diagrama de constelación de una señal demodulada, previamente separada en sus componentes de fase y cuadratura, los cuales son la entrada de este componente. La figura B.16 muestra el icono para este componente.



Figura B.16. Dispositivo analizador del diagrama de constelación

- **Analizador de señales ópticas**

Este componente permite examinar las señales ópticas mediante diagramas que representan la amplitud, la fase, la frecuencia instantánea y el espectro de potencia de la señal óptica. La figura B.17 muestra el icono para este componente.



Figura B.17. Dispositivo analizador de señales ópticas

B.2.2. Caso de estudio No.2. Transmisión de VoIP, Internet CATV Analógico

A continuación se describen los elementos utilizados para llevar a cabo la simulación del caso de estudio No.2 en el modo bloque de la herramienta OptSim®.

- **Generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias**

Este modelo genera una secuencia binaria de diferentes tipos. Una instancia de modelo simple puede ser usada para proveer múltiples patrones de salida, opcionalmente desplazados entre sí, para manejar diferentes canales de una multiplexación por división de longitud de onda. O, cada canal puede tener su propia instancia de modelo configurada para proveer diferentes patrones que las otras instancias de modelo. La figura B.18 muestra el icono para este componente.



Figura B.18. Generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.7.

Tabla B.7. Parámetros del generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias.

Parámetro	Significado	Unidades
patternType	El tipo de patrón de bit que será generado	-
BitRate	La velocidad de bit de la secuencia binaria generada	[bps]
PatternLength	El número de bits en la secuencia de bit generada	[Bits]
StartTime	El tiempo de inicio de la secuencia de bits	[segundos]
offset	El número de bits para compensar la primera señal de salida vs. La secuencia binaria estándar.	[Bits]
Shift	El número de bits para desplazar cada secuencia binaria de salida sucesiva	[Bits]
preBits	El número de bits cero para el inicio de la secuencia	[Bits]
postBits	El número de bits cero antes de finalizar la secuencia	[Bits]

- **Generador de señales eléctricas**

Este modelo convierte una señal de entrada binaria en una señal eléctrica de salida. La señal de salida puede ser especificada como voltaje o corriente. La figura B.19 muestra el icono para este componente.

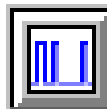


Figura B.19. Generador de señales eléctricas en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.8.

Tabla B.8. Parámetros del generador de modelos de secuencia binarias pseudo-aleatorias.

Parámetro	Significado	Unidades
DriveType	Selecciona el tipo de modelo para la generación de la señal.	-
SignalType	Si el valor de la salida es especificado como voltaje[Volts] o corriente[Amps]	-
ModulationType	Selecciona el tipo de codificación de canal utilizada por el generador.	-
Vmax	El valor máximo de la señal de salida eléctrica	[Volts] ó [Amps]
Vmin	El valor mínimo de la señal de salida eléctrica	[Volts] ó [Amps]
PointsPerBit	Número de puntos muestreados por bit en la señal eléctrica.	-
Tr	Tiempo de subida de la señal de salida eléctrica	[segundos]
Tf	Tiempo de bajada de la señal de salida eléctrica	[segundos]

- **Modulador Mach-Zehnder**

Este modelo representa un modulador óptico-eléctrico. Este dispositivo se utiliza para realizar una modulación de la portadora óptica de forma externa al láser transmisor. El modulador Mach-Zehnder recibe una intensidad óptica constante en el tiempo producida por el láser de onda continua y genera una señal modulada con la forma deseada. La figura B.20 muestra el icono para este componente.

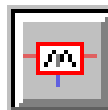


Figura B.20. Modulador Mach-Zehnder en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.9.

Tabla B.9. Parámetros del Modulador Mach-Zehnder.

Parámetro	Significado	Unidades
ModulationType	Tipo de función de Modulación	-
vPi	V _{Pi} del modulador	[Volts]
vBias	Voltaje Bias del modulador	[Volts]
vOffset	Voltaje offset del modulador	[Volts]

onOffRatio	Extinsion o relación on-off	[dB]
ChirpFactor	Parametro chirp para el modulador	-
InsertionLoss	Perdidas de inserción	[dB]

- **Láser de onda continua**

Este modelo produce la señal óptica de salida de uno o más láseres. Este modelo es comúnmente usado en conjunto con el modelo de modulación externa para codificar una señal binaria sobre la fuente de onda continua. La figura B.21 muestra el icono para este componente.



Figura B.21. Láser de onda continua en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.10.

Tabla B.10. Parámetros del Láser de onda continua.

Parámetro	Significado	Unidades
peakPower	Potencia pico emitida por el láser de onda continua.	[Watts]
Wavelength	Longitud de onda del laser	[metros]
Mode	Tipo de longitud de onda	-
RIN	Ruido de intensidad relativa del laser	[dB/Hz]
phase	Selecciona la amplitud de la fase de una manera al azar.	[Grados]

- **Generador sinusoidal analógico**

Este modelo crea una señal eléctrica analógica con forma de onda seno. Este modelo puede ser usada para crear una simple onda seno o una combinación de ondas seno. La figura B.22 muestra el icono para este componente.

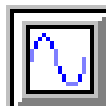


Figura B.22. Generador de señales eléctricas en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.11.

Tabla B.11. Parámetros del generador de señales eléctricas.

Parámetro	Significado	Unidades
numChannel	Número de canales	-
Vpp	Valor pico a pico	[A] ó [V]
Frequency	Frecuencia de la onda seno	[Hz]
Phase	Fase de la onda seno	[Grados]
NoSamples	Determina el número de datos muestreados en un modo aperiódico	-
TimeStep	Determina el tiempo de parada de la señal muestreada en el modo aperiódico	[Segundos]
TimeStart	Determina el tiempo de inicio de la señal	[Segundos]
FrequencyStep	Espaciamiento entre las frecuencias de los canales de entrada	[Hz]

- **Láser directamente modulado**

Este modelo se encarga de generar la información que se desea transmitir y generar la modulación. El comportamiento de este modelo puede estructurarse en tres circuitos en cascada: La fuente que corresponde a la señal eléctrica de entrada en el modelo, los elementos parásitos que corresponden a un circuito RL y finalmente la cavidad del láser. La figura B.23 muestra el icono para este componente.

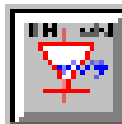


Figura B.23. Láser directamente modulado en OptSim®

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.12.

Tabla B.12. Parámetros del Láser directamente modulado.

Parámetro	Significado	Unidades
Wavelength	Longitud de onda del laser	[metros]
Mode	Tipo de longitud de onda	-

DeltaFreq	Frecuencia o longitud de onda espaciada para múltiples líneas de salida	[metros] ó [Hz]
RIN	Ruido de intensidad relativa del laser	[dB/Hz]
Parasitics	Activación o desactivación de los efectos parásitos	-
Cp	Capacitancia parasita del laser	[F]
Lp	Inductancia parasita del laser	[H]
DriveScheme	Definición del manejo de la señal	-
Io	Corriente bias del laser	[A]
Saturation	Definición de la ganancia de saturación	-
Bias_Value	Definición del bias	-
Rd	Resistencia de cavidad del laser	[ohm]
Von	Voltaje de encendido del laser	[Volts]

- **Receptor óptico compuesto**

Este bloque modela un receptor óptico y todos sus partes estándares. El modelo en *OptSim* está compuesto por un fotodetector, un preamplificador, un post-amplificador y un filtro. El modelo del fotodetector convierte una señal de entrada óptica a una corriente eléctrica. A continuación, pasa por el modelo del preamplificador que la convierte a un nivel de voltaje. Finalmente, el modelo de post-amplificador contiene un conjunto de filtros banda-base que dan forma a las ondas de salida. La figura B.24 muestra el icono para este componente.



Figura B.24. Receptor óptico compuesto en OptSim®.

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.13.

Tabla B.13. Parámetros del Láser directamente modulado.

Parámetro	Significado	Unidades
<i>n_representation</i>	Selecciona el tipo de tratamiento que se le hace al ruido (Cuasi-Analítico o Monte-Carlo)	-
<i>pd_APD_Multiplier</i>	Valor del multiplicador APD (1.0 para un detector PIN).	-
<i>pd_ionizationCoef</i>	Coefficiente de ionización (1.0 para un detector PIN).	-
<i>fe_tz</i>	Coefficiente de transimpedancia	[Hz]
<i>fe_zero</i>	Cero simple situado en las frecuencias bajas de transición(roll-off).	[Hz]
<i>fe_pole</i>	Cero simple situado en las frecuencias altas de transición(roll-off)	[Hz]
<i>ftt_type</i>	Tipo de filtro	-
<i>ftt_bandwidth</i>	Filtro de 3dB de ancho de banda.	[Hz]
<i>ftt_order</i>	Orden del filtro	-

- **Filtro eléctrico**

Este modelo implementa una variedad de filtros eléctricos estándares, entre los que se encuentran: Butterworth, Chebyshev, Bessel e ideal, en configuración pasa-bajo, pasa-alto, pasa-banda. La figura B.25 muestra el icono para este componente.

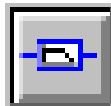


Figura B.25. Filtro eléctrico en OptSim®.

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.14.

Tabla B.14. Parámetros del Filtro eléctrico.

Parámetro	Significado	Unidades
<i>type</i>	Tipo de filtro	-
<i>Bandwidth</i>	Ancho de banda del filtro con 3dB	[Hz]
<i>Order</i>	Orden del filtro	-

- **Medidor de la razón de error de bit**

Este modelo calcula la razón de error de bit para la señal eléctrica de entrada como también un número de parámetros útiles tales como el factor Q, las propiedades del diagrama del ojo tales como: ancho alto, área y razón de extinción. La razón de error de bit puede ser calculada usando el algoritmo Cuasi Analítico o Montecarlo; la elección del algoritmo depende de la naturaleza de las fuentes de ruido dominantes en la simulación. La figura B.26 muestra el icono para este componente.

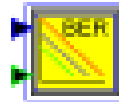


Figura B.26. Dispositivo analizador del parámetro razón de error de bit.

- **Analizador de señales de espectro**

Este bloque es utilizado como visualizador del espectro de la señal en el nodo conectado a su puerto de entrada. La figura B.27 muestra el icono para este componente.

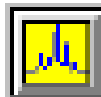


Figura B.27. Dispositivo analizador de señales de espectro.

- **Multiplot**

Este modelo combina las características de cinco diferentes analizadores, los cuales son: Analizador de la señal, analizador del diagrama del ojo, analizador del espectro, analizador del *chirp* y auto correlación óptica. La figura B.28 muestra el icono para este componente.

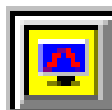


Figura B.28. Dispositivo Multiplot..

Los elementos utilizados para la implementación de la red óptica de distribución que está definida por la topología de red se describen a continuación:

- **Fibra óptica monomodo**

Con base en [22], potencialmente esta es la fibra que proporciona la mayor capacidad de transportar volúmenes de información, cuya banda de paso está en el orden de los 100GHZ/Km. Se denomina monomodo ya que solo un rayo de luz puede propagarse a la vez, es decir, su modo de propagación o camino del haz luminoso es único, como se muestra en la figura B.29.

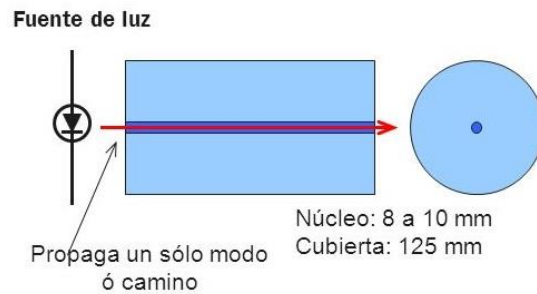


Figura B.29. Fibra monomodo. Tomada de [23].

Estas fibras poseen un núcleo cuyo diámetro se encuentra en el mismo orden de magnitud que la longitud de onda de las señales ópticas transmitidas, aproximadamente de 8 a 10 micrómetros. La herramienta OptSim® ofrece varios tipos de fibra monomodo y tiene en cuenta efectos propios de la fibra tales como atenuación, dispersión (cromático y por modo de polarización) y no linealidades como mezcla de cuatro ondas, efecto *Raman*, entre otros. Para la realización de este trabajo de grado, se utilizó la fibra SMF-28 Corning, cuyas características cumplen por las sugeridas en el estándar IEEE 802.3ah de GEPON, estas son longitud de onda nominal (1310-1550 nm) y atenuación máxima (0.4 dB/Km) como se muestra en la figura B.30.

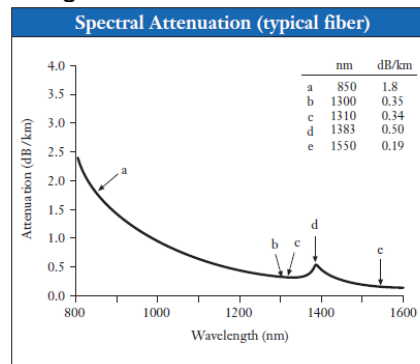


Figura B.30. Características de la Fibra SMF-28 Corning. Tomado de [24].

Aunque algunos sistemas operan en la región de los 1300 nm, es deseable operar en la tercera ventana con el objetivo de reducir las pérdidas de la fibra. En la región de 1550 nm, la fibra monomodo estándar muestra un aumento considerable de la dispersión cromática, lo cual da como resultado una distorsión no lineal [25] [26]. Adicionalmente, cuando las fibras ópticas se someten a niveles de potencia óptica elevados se convierte entonces en la principal fuente de degradación.

- **Divisor óptico o *splitter* óptico**

Este dispositivo, también denominado divisor óptico es un elemento pasivo utilizado para las distribuciones de redes ópticas, especialmente para redes FTTH y se caracteriza por dividir las señales que viajan a través de una fibra óptica en N puertos de salida, con un nivel de atenuación de acuerdo al número de salidas y sin la necesidad de alimentación eléctrica [27]. La figura B.31 muestra el icono para este componente:

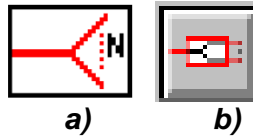


Figura B.31. Dispositivo splitter óptico: a) Icono en modo muestra, b) Icono en modo bloque.

En la tabla B.15 se muestra el nivel de atenuación del *splitter* según su relación 1:N, donde *N* hace referencia a la cantidad de puertos de salida.

Tabla B.15. Atenuación según la relación del splitter. Tomada de [28].

Relación del Splitter (1:N)	Atenuación
1:2	<4.1
1:4	<7.5
1:8	<11
1:16	<13.7
1:32	<16

- **Circulador óptico.**

El circulador óptico es un elemento compuesto por varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. En OptSim el circulador está representado como lo muestra la figura B.32.



Figura B.32. Circulador óptico en OptSim®.

Este dispositivo, utilizado para la topología de red en anillo, se caracteriza por propagar las señales en el sentido de las manecillas del reloj hacia los puertos de salida. Como se observa en la figura B.32, el circulador está compuesto por tres puertos de entrada y tres puertos de salida (todos en el dominio óptico), de tal manera que si por los puertos 1 y 2 se ingresa una longitud de onda, esta sale por el puerto 3 de salida. Luego, el mismo procedimiento con los demás puertos que componen el dispositivo. Para este trabajo de grado, se utilizaron los puertos de entrada 1, 2 y 3 para la señal de Internet/VoIP, la señal de video y la señal resultante después de circular por la red, respectivamente; y solamente el puerto 3 de salida por el que sale hacia la red la señal de datos con la señal de video conjuntamente, por lo que los puertos 1 y 2 de salida no fueron utilizados. Por lo anterior, con ayuda del modelo de jerarquías de OptSim se encapsuló en un elemento con los puertos 1 y 2 de entrada conformando un solo puerto de entrada, resultando un elemento con dos puertos de entrada y uno de salida.

- **Modelo de Lazo de repetición**

El dispositivo modelo de lazo de repetición (*Repeat Loop Model*), propio del modo bloque de OptSim®, permite crear configuraciones de red en anillo y su comportamiento es similar al circulador óptico. Como se observa en la figura B.33, este dispositivo está conformado por cuatro puertos: *Input* (entrada eléctrica, óptica o señal binaria), *Output* (salida que depende de la entrada), *Loop Begin* y *Loop End*. Para el caso de la topología en anillo, los puertos utilizados son el *Loop Begin*, que representa el punto de inicialización del anillo y el *Loop End*, que indica el punto donde el anillo termina, formando un lazo cerrado. El transmisor se conecta al puerto *Input*. Para una topología en anillo, el puerto *Output* no se utiliza, pero hace parte de otra funcionalidad que permite este dispositivo, como se describe a continuación.

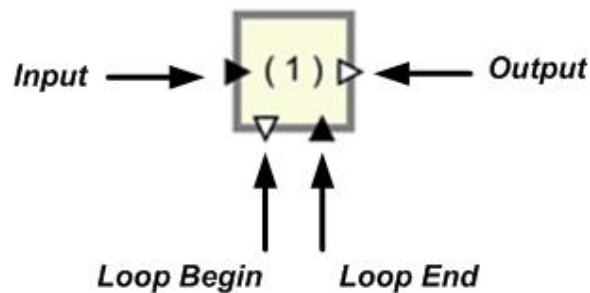


Figura B.33. Modelo de lazo de repetición.

Los parámetros básicos que permiten configurar este dispositivo se muestran en la tabla B.16.

Tabla B.16. Propiedades del dispositivo Repeat Loop Model.

Parámetro	Significado	Unidades
NumReps	Es utilizado para establecer una sección de la red que el usuario desee repetir durante la simulación, estableciendo el número de repeticiones o número de veces deseadas para que la señal circule por dicha sección antes de terminar la simulación.	Repeticiones
_vergil_signalType	Define la naturaleza en el que se va a utilizar el elemento. Por ejemplo: eléctrico, óptico, entre otros.	-

ANEXO C. PROCEDIMIENTOS MATEMATICOS UTILIZADOS Y CARACTERIZACIÓN DEL PARÁMETRO CSO

En este anexo se describen los procedimientos matemáticos utilizados en el presente trabajo de grado, como son el cálculo de atenuación en el enlace FTTH y el cálculo de la BER a partir del EVM. Además se brinda una breve profundización del parámetro Composición de Segundo Orden o CSO en función del sistema.

C.1. CALCULO DEL ENLACE

Para el dimensionamiento de una red o un enlace FTTH, se requiere establecer y sintetizar los siguientes parámetros:

- ✓ Distancia máxima de transmisión.
- ✓ Tipo de fibra óptica.
- ✓ Atenuación en el ODN.
- ✓ Potencia máxima en el transmisor y Sensibilidad máxima en el receptor.

- **Distancia máxima de transmisión**

Dadas las limitaciones existentes que existen en cuanto a infraestructura óptica se refiere, el parámetro principalmente restrictivo es la longitud máxima del enlace, o lo que es lo mismo, la longitud máxima de la fibra entre el OLT y el ONT.

La distancia máxima de la fibra entre el OLT y el ONT es dado por la recomendación IEEE 802.3 ah, en la cual la longitud máxima de la fibra es igual a 20 Km, por lo que se ha de escoger unas cantidades inmediatamente inferiores a la cifra mencionada.

- **Tipo de fibra óptica**

La elección de la fibra óptica viene determinada por diferentes parámetros, siendo los más trascendentales y condicionales la dispersión y la atenuación. La fibra que mejor se ajusta a estas características es la fibra monomodo, debido a que su elevada capacidad de transmisión y baja atenuación, la convierte en el medio más atractivo para las redes FTTH.

El hecho de utilizar fibra óptica monomodo en FTTH permite simplificar el servicio, el mantenimiento y el desarrollo. Por lo tanto, se recomienda el uso de este tipo de fibra para la red de acceso FTTH. Así lo hace la recomendación IEEE, que señala como opción primaria la utilización de fibras G.652.

- **Potencia máxima de transmisión y Sensibilidad máxima en el receptor**

Es importante esclarecer que en la conexión entre OLT y ONT, la norma IEEE 802.3 ah define umbrales mínimos y máximos de potencia, por lo que estos valores son los que determinaran los puntos de corte, tanto para el establecimiento y caída de conexión, como de saturación.

En la recomendación IEEE 802.3ah, define que el valor máximo de transmisión debe ser 7dBm y el valor máximo de la sensibilidad del receptor debe -27dBm.

- **Atenuación en la red de distribución óptica**

Un concepto que es crítico al momento del despliegue de la red GEPON, es la atenuación que se puede presentar en la red. Los elementos que aportan a la atenuación de la señal son principalmente los splitters y la fibra óptica.

En la recomendación IEEE 802.3ah, se define que el valor máximo de pérdidas de inserción en el canal puede ser de 23.5 dB.

En definitiva, el cálculo de la atenuación aportará información sobre las pérdidas máximas de la red, y por lo tanto incidirá directamente en la capacidad máxima de transmisión del sistema o en la distancia máxima de cada enlace, dado que ambos parámetros son inversamente proporcionales entre sí. La ecuación de atenuación para este sistema se describe a continuación:

$$\text{Atenuación}[dB] = L_{OLT-ONT} \cdot F_a + a \cdot SOP_{1:2} + b \cdot SOP_{1:4} + c \cdot SOP_{1:1}$$

Dónde:

- $L_{OLT-ONT}$ es la longitud de fibra entre la OLT y ONTi (con $i = 1$ a 4) en km.
- $F_a = 0.25$ dB/Km es la atenuación de la fibra en dB/Km.
- $SOP_{1:2} = 3$ dB es la atenuación del *splitter* óptico pasivo con una entrada y dos divisiones (1:2).
- a es el número de *splitters* ópticos pasivos con una entrada y dos divisiones.
- b es el número de *splitters* ópticos pasivos con una entrada y cuatro divisiones.
- c es el número de *splitters* ópticos pasivos con una entrada y una división.
- $SOP_{1:4} = 6$ dB es la atenuación del *splitter* óptico pasivo con una entrada y cuatro divisiones.
- $SOP_{1:1} = 0$ dB es la atenuación del *splitter* óptico pasivo con una entrada y una división.

A continuación, en la tabla C.1 y C.2 se registran las atenuaciones presentes en la red de distribución óptica pasiva, producto de la fibra óptica y los splitters, en topología en árbol, en anillo y en bus.

Tabla C.1. Atenuación en la Topología en árbol. Por los autores.

$L_{OLT-ONT}[Km]$	Atenuación[dB] entre OLT y ONTi con (i=1,2,3,4) a = 0, b = 1, c=0
16.5 Km	13.125
18.0 Km	13.5
19.5 Km	13.875
20.0 Km	14

Tabla C.2. Atenuación en la Topología en bus y en anillo. Por los autores.

$L_{OLT-ONT}[Km]$	Atenuación[dB] entre OLT y ONT 1 $a = 1$ y $b = 0$	Atenuación[dB] entre OLT y ONT 2 $a = 2$ y $b = 0$	Atenuación[dB] entre OLT y ONT 3 $a = 3$ y $b = 0$	Atenuación[dB] entre OLT y ONT 4 anillo $a = 4$, $b = 0$, $c = 0$	Atenuación[dB] entre OLT y ONT 4 bus $a = 3$, $b = 0$, $c = 1$
16.5 Km	10.125	13.125	16.125	19.125	18.125
18.0 Km	10.5	13.5	16.5	19.5	18.5
19.5 Km	10.875	13.875	16.875	19.875	18.875
20.0 Km	11	14	17	20	19

Las atenuaciones calculadas para los diferentes enlaces entre el OLT y cada ONT en las diferentes topologías se encuentran por debajo del valor de pérdidas de inserción máximo en el canal establecido por el estándar 802.3ah.

C.2. MAGNITUD DEL VECTOR DE ERROR Y TASA DE ERROR DE BIT

Como se describe en [29], la magnitud del vector de error (EVM, *Error Vector Magnitude*) es una medida para evaluar la calidad de una señal modulada. Como se muestra en la figura C.1, EVM es un escalar que expresa la diferencia entre el valor del voltaje complejo esperado de un símbolo demodulado (I-Q de referencia) y el valor del símbolo recibido (I-Q medido). En el contexto de este trabajo de grado, el valor I-Q de referencia es el medido en el diagrama de constelación Back-To-Back, mientras y el valor I-Q medido es el que se obtiene del diagrama de constelación en recepción.

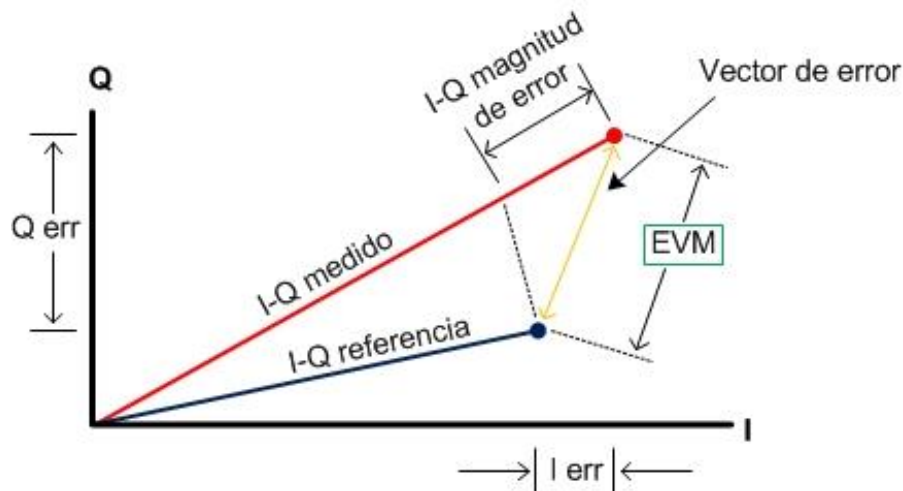


Figura C.1. Representación gráfica de EVM. Tomado de [29].

Para el cálculo del valor de EVM, se procede a encontrar los valores de I_{err} y Q_{err} , mediante las ecuaciones C.1 y C.2:

$$I_{err} = I_{referencia} - I_{medido} \quad (C.1)$$

$$Q_{err} = Q_{referencia} - Q_{medido} \quad (C.2)$$

Luego, el valor de EVM se encuentra mediante la ecuación C.3:

$$EVM = \sqrt{I \text{ err}^2 + Q \text{ err}^2} \quad (C.3)$$

Por regla, EVM es usualmente normalizada a la raíz cuadrada de la potencia media del símbolo y por convención, es expresado como un porcentaje del nivel de la señal pico en el diagrama de constelación.

Como se sabe, el BER es el parámetro de desempeño más significativo de cualquier sistema de comunicación digital y depende de la relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) de la señal recibida que a su vez está determinada por la potencia de la señal transmitida, la atenuación y dispersión del enlace, y el ruido en recepción. Por lo que, el BER en función de la SNR para un sistema M-QAM se describe en la ecuación C.4:

$$BER = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot \text{erfc} \left(\sqrt{3 \cdot \frac{SNR}{2 \cdot (M-1)}} \right)}{\log_2 M} \quad (C.4)$$

Donde el valor de la SNR puede aproximarse en función de EVM, como se muestra en la ecuación C.5:

$$SNR = -20 \cdot \log \left(\frac{EVM}{100} \right) \quad (C.5)$$

Evaluando la ecuación C.6 para la modulación 16-QAM, la expresión del BER es:

$$BER = \frac{3}{8} \cdot \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{10}} \right) \quad (C.6)$$

Utilizando el anterior procedimiento y con ayuda del software Matlab®, se llevó a cabo el cálculo del BER del servicio CATV Digital en el presente trabajo de grado.

C.3. DISTORSIÓN NO LINEAL [30] [31]

La transmisión de señales multicanal por medio de fibras ópticas (dispersivas y no lineales) origina términos de distorsión a la salida del fotodetector. Un caso de gran impacto es el de la distorsión de intermodulación, la cual es una combinación lineal de frecuencias de subportadoras; por lo general los términos de distorsión de orden superior suelen despreciarse. Las distorsiones no lineales de mayor relevancia en un sistema CATV son las de segundo y tercer orden a la salida del fotodetector y se emplean los parámetros CSO y CTB, respectivamente, para analizar su impacto.

La expresión teórica del CSO que se genera a la salida del fotodetector para una frecuencia f_d y en función de la distancia z , es la siguiente:

$$CSO = 20 \log_{10} |\pi^2 \beta_2 f_d^2 (m_i g(z) - m_f z)| + 10 \log_{10} (2N_{i\pm j} + N_{2i}) \quad (C.7)$$

$$g(z) = \frac{P_0 k n_2}{\alpha^2} [\alpha + e^{-\alpha} - 1] \quad (C.8)$$

Donde $\beta_2 = -D\lambda^2/2\pi c$ es el coeficiente de dispersión de la fibra, α es la pérdida de la fibra, $n_2 = N_2/A_{eff}$ es el índice no linealidad, $N_{i\pm j}$ es el número de términos de distorsión que contribuyen, P_0 es la potencia óptica a la entrada de la fibra, $N_{2i} = 1$ si existe un armónico de segundo orden en dicha frecuencia, ó $N_{2i} = 1$ en caso contrario, $m_f = m_i g(z)/z$ es el índice de modulación de fase, f_d es la frecuencia deseada y z distancia de propagación ; m_i es el índice de modulación, D es la dispersión cromática, A_{eff} es el área efectiva y N_2 es el coeficiente de no linealidad.

En [31] se considera un sistema CATV de distribución de canales de video analógico, donde se utilizan 70 subportadoras espaciadas en intervalos de 6 MHz cubriendo la banda 60-474 MHz. En el estudio mencionado se realiza una variación de la longitud de la fibra desde 5 Km hasta 50 Km, para la modulación directa y modulación externa, con el fin de observar el comportamiento de la distorsión, debido a los efectos no lineales y las pérdidas de la fibra, se obtienen los siguientes resultados. En la modulación directa: La distorsión de segundo orden, en función del límite inferior y superior de la fibra, presenta un valor aproximadamente de -45 dBc y -20 dBc, respectivamente; en este caso los niveles de distorsión se encuentran por fuera de los valores recomendados. Por otro lado, la modulación externa la distorsión de segundo orden, en función del límite inferior y superior de la fibra, tiene un valor de aproximadamente -95 dBc y -60 dBc, respectivamente. En este caso los valores de distorsión son tolerables.

ANEXO D. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES

En este anexo se presentan los resultados obtenidos de los parámetros de desempeño en las simulaciones para los escenarios descritos en el capítulo cuatro.

D.1. CASO DE ESTUDIO NO.1. SERVICIO TRIPLE PLAY CONFORMADO POR INTERNET/VOIP Y CATV DIGITAL

A continuación se presentan los datos obtenidos para los casos de estudio 1a y caso de estudio 1b.

Tabla D.1. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VOIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	25.200596	0.010386	-13.626491
ONT 2		1e-40	25.261718	0.010949	-13.626491
ONT 3		1e-40	25.269051	0.012128	-13.626491
ONT 4		1e-40	25.225720	0.010507	-13.626491
ONT 1	18	1e-40	25.112282	0.012573	-13.988793
ONT 2		1e-40	24.880961	0.012182	-13.988793
ONT 3		1e-40	25.197478	0.012636	-13.988793
ONT 4		1e-40	24.872886	0.012010	-13.988793
ONT 1	19.5	1e-40	24.853134	0.012686	-14.343373
ONT 2		1e-40	24.806166	0.012432	-14.343373
ONT 3		1e-40	24.661703	0.012878	-14.343373
ONT 4		1e-40	24.443367	0.012110	-14.343373
ONT 1	20	1e-40	24.512361	0.012800	-14.464580
ONT 2		1e-40	24.488600	0.013205	-14.464580
ONT 3		1e-40	24.181059	0.013756	-14.464580
ONT4		1e-40	24.172475	0.012210	-14.464580

Tabla D.2. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en árbol (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.46233e-4	11.1787	0.1386	-7.863090
ONT 2		1.46265e-4	11.1786	0.1134	-7.863090
ONT 3		1.46263e-4	11.1786	0.1339	-7.863090
ONT 4		1.46188e-4	11.1789	0.1193	-7.863090
ONT 1		1.46813e-4	11.1762	0.1824	-8.158627

ONT 2	18	1.46796e-4	11.1763	0.2189	-8.158627
ONT 3		1.46860e-4	11.1760	0.1494	-8.158627
ONT 4		1.46867e-4	11.1760	0.1695	-8.158627
ONT 1	19.5	1.47333e-4	11.1740	0.2065	-8.447197
ONT 2		1.47352e-4	11.1740	0.2353	-8.447197
ONT 3		1.47352e-4	11.1740	0.1867	-8.447197
ONT 4		1.47302e-4	11.1742	0.2656	-8.447197
ONT 1	20	1.47961e-4	11.1714	0.2199	-8.546120
ONT 2		1.47985e-4	11.1713	0.2759	-8.546120
ONT 3		1.47984e-4	11.1713	0.2222	-8.546120
ONT4		1.47967e-4	11.1714	0.2720	-8.546120

Tabla D.3. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	27.814135	0.008900	-10.616148
ONT 2		1e-40	25.326929	0.010676	-13.626977
ONT 3		1e-40	22.881989	0.014631	-16.637357
ONT 4		3.13276e-34	21.766976	0.017400	-18.137520
ONT 1	18	1e-40	26.861447	0.009971	-10.978448
ONT 2		1e-40	24.839620	0.011045	-13.988110
ONT 3		1e-40	22.454535	0.015446	-16.998638
ONT 4		7.34947e-31	21.292203	0.017500	-18.498261
ONT 1	19.5	1e-40	26.719005	0.010080	-11.333022
ONT 2		1e-40	24.618933	0.011417	-14.345247
ONT 3		2.7267e-38	22.244092	0.015611	-17.352790
ONT 4		5.37417e-30	21.175517	0.017900	-18.852740
ONT 1	20	1e-40	26.572500	0.010167	-11.449996
ONT 2		1e-40	24.384460	0.011707	-14.460753
ONT 3		7.49498e-36	22.240777	0.015717	-17.472093
ONT4		6.15343e-30	21.0750	0.018000	-18.974650

Tabla D.4. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en bus (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.37464e-4	11.2169	0.1637	-4.852743
ONT 2		1.46279e-4	11.1785	0.1403	-7.862215
ONT 3		1.50636e-4	11.1603	0.2025	-10.873452

ONT 4		1.51899e-4	11.1551	0.2046	-12.373399
ONT 1	18	1.38677e-4	11.2115	0.2219	-5.148277
ONT 2		1.46817e-4	11.1762	0.2564	-8.158253
ONT 3		1.50926e-4	11.1591	0.3130	-11.168519
ONT 4		1.52137e-4	11.1541	0.3212	-12.668179
ONT 1	19.5	1.3967e-4	11.2071	0.2810	-5.436853
ONT 2		1.47309e-4	11.1741	0.2970	-8.447456
ONT 3		1.51151e-4	11.1581	0.3487	-11.459952
ONT4		1.52303e-4	11.1534	0.3307	-12.959902
ONT 1	20	1.40984e-4	11.2013	0.2981	-5.535799
ONT 2		1.48066e-4	11.1710	0.3667	-8.545761
ONT 3		1.51476e-4	11.1568	0.3524	-11.555579
ONT4		1.52471e-4	11.1527	0.3962	-13.055837

Tabla D.5. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	27.455407	0.009800	-10.627928
ONT 2		1e-40	25.116138	0.010731	-13.638186
ONT 3		1e-40	22.832161	0.015817	-16.648447
ONT4		2.21711e-26	20.530153	0.017900	-19.658707
ONT 1	18	1e-40	26.837916	0.010074	-10.991281
ONT 2		1e-40	24.449580	0.011354	-13.999501
ONT 3		1e-40	22.402928	0.015942	-17.009733
ONT4		1.34485e-24	20.159317	0.018200	-20.019993
ONT 1	19.5	1e-40	26.647866	0.010098	-11.346386
ONT 2		1e-40	24.156326	0.012357	-14.357087
ONT 3		4.64116e-37	22.214993	0.016953	-17.366688
ONT4		2.2066e-22	19.939433	0.021500	-20.377137
ONT 1	20	1e-40	26.455951	0.010161	-11.461220
ONT 2		1e-40	24.091343	0.012482	-14.471490
ONT 3		9.8613e-36	22.185102	0.017025	-17.481751
ONT4		2.72524e-21	19.576200	0.022100	-20.492013

Tabla D.6. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en anillo (Caso 1a). Por los autores.

SERVICIO CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.37479e-4	11.2168	0.1870	-4.864656
ONT 2		1.46284e-4	11.1785	0.2690	-7.874921
ONT 3		1.50654e-4	11.1602	0.2797	-10.885183
ONT4		1.52827e-4	11.1513	0.2474	-13.895440
ONT 1	18	1.38861e-4	11.2107	0.2405	-5.159518
ONT 2		1.46927e-4	11.1758	0.3053	-8.169997
ONT 3		1.50946e-4	11.1590	0.3372	-11.179824
ONT4		1.52962e-4	11.1507	0.3371	-14.190085
ONT 1	19.5	1.39887e-4	11.2061	0.2701	-5.449654
ONT 2		1.47346e-4	11.1740	0.3179	-8.458032
ONT 3		1.51156e-4	11.1581	0.3492	-11.469078
ONT4		1.53078e-4	11.1502	0.3410	-14.478230
ONT 1	20	1.41277e-4	11.2000	0.3272	-5.547252
ONT 2		1.48209e-4	11.1704	0.3694	-8.557500
ONT 3		1.51504e-4	11.1567	0.3550	-11.567757
ONT4		1.53224e-4	11.1496	0.3580	-14.578016

Tabla D.7. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	25.285176	0.010022	-13.637403
ONT 2	18	1e-40	24.917653	0.011840	-13.990738
ONT 3	19.5	1e-40	24.662017	0.012821	-14.343373
ONT4	20	1e-40	24.340125	0.013256	-14.460347
ONT 1	18	1e-40	25.130055	0.012202	-13.990738
ONT 2	16.5	1e-40	25.265240	0.010337	-13.637403
ONT 3	20	1e-40	24.361781	0.015284	-14.460347
ONT4	19.5	1e-40	24.443645	0.012674	-14.343373
ONT 1	19.5	1e-40	24.853412	0.012633	-14.343373
ONT 2	20	1e-40	24.317896	0.012926	-14.460347
ONT 3	16.5	1e-40	25.426021	0.011497	-13.637403
ONT4	18	1e-40	24.869604	0.011652	-13.990738
ONT 1	20	1e-40	24.645634	0.013112	-14.460347
ONT 2	19.5	1e-40	24.806489	0.012429	-14.343373

ONT 3	18	1e-40	25.181325	0.012166	-13.990738
ONT4	16.5	1e-40	25.177612	0.010761	-13.637403

Tabla D.8. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en árbol (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.46221e-4	11.1787	0.1600	-7.877389
ONT 2	18	1.46997e-4	11.1755	0.1819	-8.163676
ONT 3	19.5	1.47354e-4	11.1740	0.2620	-8.448396
ONT4	20	1.48035e-4	11.1711	0.2950	-8.546120
ONT 1	18	1.46817e-4	11.1762	0.1844	-8.163676
ONT 2	16.5	1.46276e-4	11.1785	0.0978	-7.877389
ONT 3	20	1.48075e-4	11.1709	0.2958	-8.546120
ONT4	19.5	1.47687e-4	11.1725	0.2224	-8.448396
ONT 1	19.5	1.47275e-4	11.1743	0.2202	-8.448396
ONT 2	20	1.48076e-4	11.1709	0.2928	-8.546120
ONT 3	16.5	1.46298e-4	11.1784	0.1657	-7.8777389
ONT4	18	1.46914e-4	11.1758	0.1813	-8.163676
ONT 1	20	1.47961e-4	11.1714	0.2253	-8.546120
ONT 2	19.5	1.47313e-4	11.1741	0.2371	-8.448396
ONT 3	18	1.46841e-4	11.1761	0.1747	-8.163676
ONT4	16.5	1.46316e-4	11.1783	0.1064	-7.877389

Tabla D.9. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	27.450702	0.0085232	-10.627060
ONT 2	18	1e-40	24.945621	0.0104555	-13.992259
ONT 3	19.5	3.4078e-38	22.245658	0.0159483	-17.353147
ONT 4	20	4.31238e-30	21.08980	0.0181595	-18.972548
ONT 1	18	1e-40	26.907560	0.0087287	-10.980393
ONT 2	16.5	1e-40	25.305548	0.0101362	-13.637770
ONT 3	20	1.8465e-36	22.243177	0.0163848	-17.469802
ONT 4	19.5	6.95431e-31	21.279714	0.0180153	-18.855470
ONT 1	19.5	1e-40	26.719429	0.00888243	-11.449996
ONT 2	20	1e-40	24.520092	0.0120757	-14.462999
ONT 3	16.5	1e-40	22.859707	0.0134867	-16.647814

ONT 4	18	5.30528e-31	21.299141	0.0166418	-18.501867
ONT 1	20	1e-40	26.572500	0.00896813	-11.449996
ONT 2	19.5	1e-40	24.899107	0.0106552	-14.343954
ONT 3	18	1e-40	22.698906	0.0136423	-17.001813
ONT 4	16.5	6.12723e-35	21.783275	0.0160069	-18.147295

Tabla D.10. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en bus (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.37537e-4	11.2166	0.0962	-4.867041
ONT 2	18	1.46865e-4	11.1760	0.2527	-8.165090
ONT 3	19.5	1.51183e-4	11.1580	0.3252	-11.458530
ONT 4	20	1.52512e-4	11.1525	0.3336	-13.056321
ONT 1	18	1.38637e-4	11.2117	0.1609	-5.153326
ONT 2	16.5	1.46268e-4	11.1785	0.2096	-7.877848
ONT 3	20	1.5147e-4	11.1568	0.3342	-11.555311
ONT 4	19.5	1.5231e-4	11.1534	0.2930	-12.958040
ONT 1	19.5	1.39756e-4	11.2067	0.2107	-5.438051
ONT 2	20	1.48123e-4	11.1707	0.3214	-8.548847
ONT 3	16.5	1.5063e-4	11.1603	0.2141	-10.887288
ONT 4	18	1.52161e-4	11.1540	0.2390	-12.673082
ONT 1	20	1.40984e-4	11.2013	0.2708	-5.535799
ONT 2	19.5	1.4737e-4	11.1739	0.2904	-8.447204
ONT 3	18	1.50983e-4	11.1588	0.2505	-11.174944
ONT 4	16.5	1.51878e-4	11.1551	0.2234	-12.387271

Tabla D.11. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1e-40	27.238072	0.00850684	-10.639067
ONT 2	18	1e-40	24.846953	0.0110389	-14.002589
ONT 3	19.5	7.75195e-37	22.218235	0.0168542	-17.366903
ONT 4	20	3.1666e-21	19.577735	0.0209002	-20.494828
ONT 1	18	1e-40	26.839481	0.00954785	-10.993688
ONT 2	16.5	1e-40	25.105740	0.0102692	-13.649325
ONT 3	20	7.42297e-36	22.188540	0.0171895	-17.484391
ONT 4	19.5	1.76317e-22	19.934993	0.0197559	-20.376186
ONT 1	19.5	1e-40	26.641306	0.0097243	-11.343899

ONT 2	20	1e-40	24.383802	0.0131832	-14.471629
ONT 3	16.5	1e-40	22.824358	0.0139675	-16.659586
ONT 4	18	1.39242e-24	20.157025	0.01777857	-20.024002
ONT 1	20	1e-40	26.568211	0.00987139	-11.460743
ONT 2	19.5	1e-40	24.638910	0.0129123	-14.355124
ONT 3	18	3.28242e-39	22.414056	0.0153597	-17.013706
ONT 4	16.5	2.37852e-26	20.523759	0.0173124	-19.669846

Tabla D.12. Resultados obtenidos para el servicio CATV Digital con la topología de red en anillo (Caso 1b). Por los autores.

SERVICIO DE CATV DIGITAL					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	1.37636e-4	11.2161	0.1370	-4.878455
ONT 2	18	1.46971e-4	11.1756	0.2586	-8.174831
ONT 3	19.5	1.51178e-4	11.1580	0.3325	-11.471394
ONT 4	20	1.5327e-4	11.1494	0.3421	-14.580217
ONT 1	18	1.38822e-4	11.2108	0.2028	-5.164616
ONT 2	16.5	1.46294e-4	11.1784	0.2369	-7.888721
ONT 3	20	1.51501e-4	11.1567	0.3438	-11.570069
ONT 4	19.5	1.53073e-4	11.1502	0.3368	-14.479295
ONT 1	19.5	1.39807e-4	11.2065	0.2403	-5.448304
ONT 2	20	1.48060e-4	11.1701	0.3325	-8.555921
ONT 3	16.5	1.5066e-4	11.1602	0.2569	-10.898983
ONT 4	18	1.52941e-4	11.1508	0.2714	-14.196199
ONT 1	20	1.41094e-4	11.2008	0.2984	-5.547966
ONT 2	19.5	1.47368e-4	11.1739	0.3265	-8.4590957
ONT 3	18	1.50926e-4	11.1591	0.2723	-11.186625
ONT 4	16.5	1.52818e-4	11.1513	0.2273	-13.909244

D.2. CASO DE ESTUDIO NO.2. SERVICIO TRIPLE PLAY CONFORMADO POR INTERNET/VoIP Y CATV ANALÓGICO

A continuación se presentan los datos obtenidos para los casos de estudio 2a y caso de estudio 2b.

Tabla D.13. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1		8.6200e-041	22.4914	8.9e-11	-15.373937252839672
ONT 2		4.1697e-040	22.4141	8.08e-11	-15.373937252839672

ONT 3	16.5	4.7208e-037	22.0507	8.92e-11	-15.373937252839672
ONT 4		3.0921e-038	22.1949	8.58e-11	-15.373937252839672
ONT 1	18	4.3631e-036	21.9299	9.68e-11	-15.751599994196051
ONT 2		1.5449e-035	21.8593	8.78e-11	-15.751599994196051
ONT 3		1.2536e-032	21.4648	9.54e-11	-15.751599994196051
ONT 4		6.8957e-034	21.6399	9.21e-11	-15.751599994196051
ONT 1	19.5	9.2712e-032	21.3399	10.54e-11	-16.12903239566802
ONT 2		2.4608e-031	21.2779	9.52e-11	-16.12903239566802
ONT 3		1.5208e-028	20.8444	10.25e-11	-16.12903239566802
ONT 4		7.2087e-030	21.0554	9.89e-11	-16.12903239566802
ONT 1	20	2.0723e-030	21.1389	10.86e-11	-16.25479457350885
ONT 2		5.1623e-030	21.0777	9.78e-11	-16.25479457350885
ONT 3		2.6795e-027	20.6354	10.52e-11	-16.25479457350885
ONT 4		1.3081e-028	20.8547	10.13e-11	-16.25479457350885

Tabla D.14. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en árbol (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 3		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 4		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 1	18	-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 3		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 4		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 1	19.5	-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 2		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 3		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 4		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 1	20	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 2		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 3		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 4		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806

Tabla D.15. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VOIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	6.2764e-094	26.2461	4.71e-11	-12.366545835745413
ONT 2		4.6184e-040	22.4088	8.08e-11	-15.37468727592467
ONT 3		1.6472e-012	16.8579	16.3e-11	-18.38427593845854
ONT 4		2.5082e-013	17.1766	15.79e-11	-18.384275860238503
ONT 1	18	1.8075e-087	25.9289	4.96e-11	-12.746870787604239
ONT 2		2.5108e-035	21.8319	8.74e-11	-15.753084491983882
ONT 3		6.7149e-011	16.1537	17.63e-11	-18.762053896536738
ONT 4		1.6221e-011	16.4368	18.03e-11	-18.762054929225702
ONT 1	19.5	4.4946e-080	25.5352	5.3e-11	-13.126734784073633
ONT 2		5.6977e-031	21.2238	9.42e-11	-16.136052303030134
ONT 3		1.4658e-009	15.4690	19.06e-11	-19.139676951282553
ONT 4		4.7027e-010	16.4368	19.52e-11	-19.139679441836694
ONT 1	20	1.1186e-077	25.3991	5.42e-11	-13.25325883083792
ONT 2		1.2657e-029	21.0169	9.67e-11	-16.262567265603654
ONT 3		3.8522e-009	15.2307	19.56e-11	-19.265518810247283
ONT 4		1.2961e-009	15.4984	20.03e-11	-19.265521132465004

Tabla D.16. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en bus (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.82	343.09	343.29	343.55	-0.26279757837167822
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2732587805972897
ONT 3		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2836118377287722
ONT 4		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2836118461273172
ONT 1	18	-29.26	342.34	342.54	342.8	-0.63739991825414732
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6480052807362955
ONT 3		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6584045539689249
ONT 4		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6584044859513227
ONT 1	19.5	-28.74	341.59	341.79	342.05	-1.012036637987954
ONT 2		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0227698434306083
ONT 3		-28.79	329.56	329.76	330.02	-7.0332089023522135
ONT 4		-28.79	329.56	329.76	330.02	-7.0332087345326784
ONT 1		-28.57	341.34	341.54	341.8	-1.1369228014642474
ONT 2		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1476951166434466

ONT 3	20	-28.62	329.31	329.51	329.77	-7.1581461228992396
ONT 4		-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.1581459709100299

Tabla D.17. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	2.9067E-094	26.2622	4.7e-11	-12.36774835749277
ONT 2		4.5020e-040	22.4102	8.08e-11	-15.376333712796386
ONT 3		1.6656e-012	16.8559	16.28e-11	-18.386067378688018
ONT 4		7.8312e-005	11.5505	33.3e-11	-21.396227051070476
ONT 1	18	3.4724E-086	25.8633	4.97e-11	-12.749255734243453
ONT 2		2.9349e-035	21.8228	8.73e-11	-15.756332811140545
ONT 3		6.8928e-011	16.1483	17.62e-11	-18.765578012743262
ONT 4		2.7654e-004	10.7654	38.98e-11	-21.775618741254284
ONT 1	19.5	1.1879E-077	25.3977	5.33e-11	-13.130289866354431
ONT 2		6.1091e-031	21.2192	9.44e-11	-16.136052303030134
ONT 3		1.5192e-009	15.4604	19.07e-11	-19.144878497360846
ONT 4		1.1016e-003	9.7184	41.65e-11	-22.154818196758693
ONT 1	20	5.8479E-075	25.2400	5.48e-11	-13.257202521590177
ONT 2		1.2396e-029	21.0184	9.69e-11	-16.262567265603654
ONT 3		4.0013e-009	15.2211	19.56e-11	-19.271267465318878
ONT 4		1.4125e-003	9.5024	43.16e-11	-22.281176917277929

Tabla D.18. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en anillo (Caso 2a). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.82	343.09	343.29	343.55	-0.26270800592049359
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2731359563125841
ONT 3		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2834781644614104
ONT 4		-29.93	325.04	325.24	325.50	-9.2937885852624422
ONT 1	18	-29.26	342.34	342.54	342.8	-0.63722264550950791
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6477631402865289
ONT 3		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6581417391892215
ONT 4		-29.37	324.29	324.49	324.75	-9.6684610146310117
ONT 1	19.5	-28.74	341.59	341.79	342.05	-1.0117728847464362
ONT 2		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0224114263130399
ONT 3		-28.79	329.56	329.76	330.02	-7.0328211919360504
ONT 4		-28.85	323.54	323.74	324.00	-10.043147972645096

ONT 1	20	-28.57	341.34	341.54	341.8	-1.1366303851037491
ONT 2		-28.58	335.32	335.52	335.78	-4.1472985756604874
ONT 3		-28.62	329.31	329.51	329.77	-7.1577177024066598
ONT 4		-28.68	323.29	323.49	323.75	-10.168046726816351

Tabla D.19. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en árbol (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	8.6200e-041	22.4914	8.89e-11	-15.373937252839672
ONT 2		4.1697e-040	22.4141	8.07e-11	-15.373937252839672
ONT 3		4.7208e-037	22.0507	8.92e-11	-15.373937252839672
ONT 4		3.0921e-038	22.1949	8.58e-11	-15.373937252839672
ONT 1	18	4.3631e-036	21.9299	9.68e-11	-15.751599994196051
ONT 2		1.5449e-035	21.8593	8.78e-11	-15.751599994196051
ONT 3		1.2536e-032	21.4648	9.54e-11	-15.751599994196051
ONT 4		6.8957e-034	21.6399	9.21e-11	-15.751599994196051
ONT 1	19.5	9.2712e-032	21.3399	10.54e-11	-16.12903239566802
ONT 2		2.4608e-031	21.2779	9.52e-11	-16.12903239566802
ONT 3		1.5208e-028	20.8444	10.25e-11	-16.12903239566802
ONT 4		7.2087e-030	21.0554	9.89e-11	-16.12903239566802
ONT 1	20	2.0723e-030	21.1389	10.86e-11	-16.25479457350885
ONT 2		5.1623e-030	21.0777	9.78e-11	-16.25479457350885
ONT 3		2.6795e-027	20.6354	10.52e-11	-16.25479457350885
ONT 4		1.3081e-028	20.8547	10.13e-11	-16.25479457350885

Tabla D.20. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en árbol (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 3		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 4		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2733147182479523
ONT 1	18	-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 3		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 4		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6481158884593818
ONT 1		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754

ONT 2	19.5	-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 3		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 4		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0229342487211754
ONT 1	20	-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 2		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 3		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806
ONT 4		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478773306121806

Tabla D.21. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en bus (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	6.2764e-094	26.2461	4.71e-11	-12.366545835745413
ONT 2		4.6184e-040	22.4088	8.08e-11	-15.37468727592467
ONT 3		1.6472e-012	16.8579	16.28e-11	-18.38427593845854
ONT 4		2.5082e-013	17.1766	15.79e-11	-18.384275860238503
ONT 1	18	1.8075e-087	25.9289	4.97e-11	-12.746870787604239
ONT 2		2.0233e-035	21.8439	8.75e-11	-15.752349838097354
ONT 3		6.6172e-011	16.1568	17.62e-11	-18.760607164071708
ONT 4		1.6071e-011	16.4387	18.04e-11	-18.76060719309401
ONT 1	19.5	4.4946e-080	25.5352	5.29e-11	-13.126734784073633
ONT 2		3.5222e-031	21.2546	9.46e-11	-16.129783419522798
ONT 3		1.4298e-009	15.4750	19.05e-11	-19.136824607733519
ONT 4		4.6355e-010	15.7372	19.57e-11	-19.136825373939988
ONT 1	20	1.1186e-077	25.3991	5.42e-11	-13.25325883083792
ONT 2		7.5041e-030	21.0523	9.71e-11	-16.25554627257247
ONT 3		3.7506e-009	15.2375	19.54e-11	-19.262206393947849
ONT 4		1.3551e-009	15.4877	20.09e-11	-19.262207536563739

Tabla D.22. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en bus (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.82	343.09	343.29	343.55	-0.26279757837167822
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.2732587805972897
ONT 3		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2836118377287722
ONT 4		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2836118377287722
ONT 1	18	-29.27	342.34	342.54	342.8	-0.63739991825414732
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6480600417182205
ONT 3		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6585124950734667
ONT 4		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6585124950734667

ONT 1	19.5	-28.74	341.59	341.79	342.05	-1.012036637987954
ONT 2		-28.75	335.57	335.77	336.03	-4.0228783847081786
ONT 3		-28.79	329.56	329.76	330.01	-7.0334216421978235
ONT 4		-28.79	329.56	329.76	330.01	-7.0334216421978235
ONT 1	20	-28.57	341.34	341.54	341.8	-1.1369228014642474
ONT 2		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1478214383721541
ONT 3		-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.1583931502830751
ONT 4		-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.1583931502830751

Tabla D.23. Resultados obtenidos para el servicio Internet/VoIP con la topología de red en anillo (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO INTERNET/VoIP					
# ONT	Distancia a OLT [Km]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	2.9067e-094	26.2622	4.7e-11	-12.36774835749277
ONT 2		4.4109e-040	22.4115	8.08e-11	-15.376925397150265
ONT 3		1.6656e-012	16.8559	16.3e-11	-18.386067378688018
ONT 4		8.5307e-005	11.5014	33.3e-11	-21.421770182335493
ONT 1	18	1.4500e-086	25.8827	4.96e-11	-12.748469525686001
ONT 2		2.3101e-035	21.8362	8.76e-11	-15.753996113741277
ONT 3		6.7036e-011	16.1541	17.62e-11	-18.762398622587199
ONT 4		2.9384e-004	10.7241	38.9e-11	-21.797431935404553
ONT 1	19.5	5.1192e-079	25.4758	5.27e-11	-13.128336137338758
ONT 2		4.3998e-031	21.2404	9.48e-11	-16.131430337620255
ONT 3		1.4488e-009	15.4718	19.05e-11	-19.138616340358634
ONT 4		1.1485e-003	9.6829	52.69e-11	-22.173037273681473
ONT 1	20	6.4351e-077	25.3552	5.4e-11	-13.254464239942543
ONT 2		1.0369e-029	21.0308	9.73e-11	-16.257785775098849
ONT 3		3.7995e-009	15.2342	19.83e-11	-19.263998271014827
ONT 4		1.4666e-003	9.4689	67.37e-11	-22.298227134811459

Tabla D.24. Resultados obtenidos para el servicio CATV Analógico con la topología de red en anillo (Caso 2b). Por los autores.

SERVICIO CATV ANALÓGICO						
# ONT	Distancia a OLT [Km]	CSO [dBc]	CNR en CH1 [dB]	CNR en CH2 [dB]	CNR en CH3 [dB]	Potencia en recepción [dBm]
ONT 1	16.5	-29.82	343.09	343.29	343.55	-0.26270800592049359
ONT 2		-29.84	337.07	337.27	337.53	-3.273091801989541
ONT 3		-29.88	331.06	331.26	331.52	-6.2834781644614104
ONT 4		-29.93	325.04	325.24	325.50	-9.2937885852624422
ONT 1	18	-29.27	342.34	342.54	342.80	-0.63728113681830667
ONT 2		-29.28	336.32	336.52	336.78	-3.6479373343455639
ONT 3		-29.32	330.31	330.51	330.77	-6.6583788683756113

ONT 4		-29.37	324.24	324.44	324.70	-9.6936986884956262
ONT 1	19.5	-28.74	341.59	341.79	342.05	-1.0119179632418107
ONT 2		-28.76	335.57	335.77	336.03	-4.022755725266955
ONT 3		-28.79	329.56	329.76	330.02	-7.0332880388902046
ONT 4		-28.85	323.49	323.69	323.95	-10.068653545739155
ONT 1	20	-28.56	341.34	341.54	341.8	-1.1368335602474069
ONT 2		-28.59	335.32	335.52	335.78	-4.1476546746893099
ONT 3		-28.63	329.31	329.51	329.77	-7.1582595499482924
ONT 4		-28.68	323.29	323.49	323.75	-10.168679241938369

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Escallon, J. Barrios y A. Toledo, "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, no. 12, pp. 12-19, 2008.
- [2] D. C. Kilper, R. Bach, D. J. Blumenthal, D. Einstein, T. Landolsi, L. Ostar, M. Preiss y A. E. Willner, "Optical Performance Monitoring," *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 294-304, 2004.
- [3] J. G. López, *et.al*, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, vol. 20, no. 31, pp. 23-35, 2011.
- [4] P. Montes y P. Carmona, "Diseño y simulación de una RED ÓPTICA PASIVA (PON) para prestar servicios Triple Play a un conjunto residencial," Tesis de grado, Programa Ingeniería De Sistemas Y Telecomunicaciones, Universidad Católica Popular Del Risaralda, 2009.
- [5] F. Hens y J. Caballero, "Triple Play: Building the converged network for IP, VoIP and IPTV," Vol. John Wiley & Sons, 2008.
- [6] G. Gómez y J. Grijalba, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2010.
- [7] X. Fernando, "Additive White Gaussian Noise (AWGN) Channel and Matched Filter Detection," Department of Electrical and Computer Engineering, Universidad de Ryerson, Presentacion, 2011.
- [8] J. Dinamarca, "Informe de Teoría de Comunicaciones Digitales "Análisis de Diagramas de Ojo," Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.
- [9] W. Damm, "Introducción al *Jitter*", Wireless Telecom Group, Reporte 2009.
- [10] J. Hinojosa, "Diseño De Una Propuesta De Red De Acceso Para Brindar Servicios De Internet, Telefonía, Datos Y Televisión A Través De FTTH, Para El Sector De Ñaquito Mediante La Tecnología RFOG Para Un Proveedor De CATV," Tesis de grado, Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Escuela Politécnica y Nacional, 2014.
- [11] F. Guevara, "Estudio Técnico De La Red De Comunicaciones Para Brindar Los Servicios De Voz, Internet Y Video Por Demanda De Una Urbanización," Tesis de grado, Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Escuela Politécnica y Nacional, 2010.
- [12] S.L. Criollo y F.R. Lasso, "Impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10 Gb/s," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2014
- [13] "Eye Pattern, Eye Diagram, Eye Opening," [En línea]. Disponible en: http://www.ktword.co.kr/m/abbr_view.php?m_temp1=887
- [14] T. Kusakabe, *et. al.*, "Evaluation of optical network of multichannel baseband Digital Broadcast over FTTH," *ITE Transactions on Media Technology and Applications (MTA)*, vol. 2, n. 3, pp. 266-276, 2014.
- [15] RSoft Design Group, OptSim Models Reference- Sample Mode, Ossining NY: RSoft Design, 2010.
- [16] RSoft Design Group, OptSim Models Reference- Block Mode, Ossining NY: RSoft Design, 2010.

- [17] A. Macho, "Estudio y caracterización de un modulador electroóptico Mach Zender," *ETSIT*, 2012.
- [18] I. Hernández, "Modulación QAM," 2007.
- [19] O. Muñoz, R. Castillo, "Análisis y evaluación del desempeño del decodificador Reed Solomon con el algoritmo euclidiano," Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería electrónica y telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2012.
- [20] Lumerical, "Diagrama del ojo 16 QAM". [En línea]. Disponible: https://kb.lumerical.com/en/pic_circuits_adv_mod_optical_qam-16_discussion_and_results.html
- [21] Universidad de Valladolid, "Tutorial de comunicaciones ópticas- Fotodiodo PIN," 2006. [En línea]. Disponible: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_5_3.htm
- [22] L. Paredes y A. F. Andrade, "Dimensionamiento de una red de acceso EPON para la prestación de un servicio IPTV en Colombia," Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [23] E. Alderete, "Medios físicos de transmisión," 2014. [En línea]. Disponible: http://images.slideplayer.es/2/149628/slides/slide_23.jpg
- [24] Corning®, "Corning SMF-28 Optical Fiber," *Product Information*.
- [25] G. J. Meslener, "Chromatic dispersion induced distortion of modulated monochromatic light employing direct detection," 1984.
- [26] C. S. Ih, W. Gu, "Fibre induced distortions in a subcarrier multiplexed lightwave system," 1990.
- [27] FibreMex, "¿Cómo elegir un divisor óptico?," 2016. [En línea]. Disponible: <http://fibremex.com/fibraoptica/index.php?mod=contenido&id=3&t=3&st=128>
- [28] Televes, "Quad Play Solutions over Optical Fibre," *Informe Técnico*, 2016.
- [29] R. Roldan, "Quadrature Amplitude Modulated (QAM) Microwave Signal Transmission over Radio-over-Fibre Link using Semiconductor Optical Amplifier," Tesis de Maestría, Universidad de Limerick, Irlanda, 2008.
- [30] C. Desem, "Composite second order distortion due to self-phase modulation in externally modulated optical AM-SCM systems operating at 1550 nm," 1994.
- [31] F. Ramos Pascual, "Estudio De Efectos No Lineales En Dispositivos Fotónicos Y Su Aplicación En Sistemas Radio Sobre Fibra Óptica," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2000.