

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED *NG-HFC* FRENTE A
UNA RED *FTTH* PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS *QUAD
PLAY* CON ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO**



**Kewin Marthelo Burbano Segura
Alejandro Noriega Cuellar**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Popayán, 2023**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED *NG-HFC* FRENTE A
UNA RED *FTTH* PARA LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS *QUAD
PLAY* CON ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO**



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

**Kewin Marthelo Burbano Segura
Alejandro Noriega Cuellar**

Director: PhD. José Giovanny López

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT
Popayán, 2023



*Dedico este logro
A Dios, quien me ha dado la fuerza para seguir en este camino
A mi madre a quien amo, me dio la vida, me ha dado su apoyo y
es mi mayor motivación
A mis hermanas y sobrino por su amor, fuerza y apoyo en cada momento
A mi padre que desde el cielo me ha acompañado
De todo corazón, Gracias*

Marthelo Burbano Segura

*Dedico este logro
A mi familia,
por ser el pilar fundamental en mi vida y en mi formación académica.
Mamá, papá y hermana, gracias por su paciencia, comprensión y
amor incondicional durante todo este proceso.*

Alejandro Noriega Cuellar



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de proyecto, PhD. José Giovanni López Perafán, por su valiosa guía y acompañamiento en este proceso. Gracias por su disposición y compromiso para compartir su conocimiento y experiencia en el tema de investigación, lo cual fue fundamental para alcanzar nuestros objetivos.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los ingenieros profesores que hicieron parte de nuestra formación académica durante estos años. Su dedicación y compromiso en la enseñanza nos permitió adquirir los conocimientos y habilidades necesarias para enfrentar los retos del mundo laboral.

A nuestras familias y amigos, les agradecemos profundamente por su apoyo incondicional y motivación en la consecución de nuestras metas. Sus palabras de aliento, su confianza en nosotros y su amor incondicional fueron nuestro motor para seguir adelante en los momentos más difíciles.

Por último, queremos reconocer a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron al éxito de este proyecto. Su colaboración, críticas constructivas y retroalimentación fueron esenciales para enriquecer nuestra investigación y mejorar nuestra formación académica.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| AGRADECIMIENTOS | II |
| ÍNDICE DE TABLAS | VIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | X |
| LISTA DE ACRÓNIMOS | XIV |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I, MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1. FUNDAMENTOS SOBRE REDES <i>HFC</i>, <i>NG-HFC</i>, <i>FTTH</i> Y <i>EON</i> | 4 |
| 1.1 REDES DE ACCESO | 4 |
| 1.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS REDES DE CABLE COAXIAL .. | 6 |
| 1.2.1 CABLE COAXIAL | 6 |
| 1.2.2 PARÁMETROS DE LOS CABLES COAXIALES | 7 |
| 1.2.3 TIPOS DE CABLE COAXIAL | 8 |
| 1.3 Red <i>HFC</i> | 8 |
| 1.3.1 ARQUITECTURA DE UNA RED <i>HFC</i> | 9 |
| 1.4 DOCSIS (<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>) | 10 |
| 1.4.1 DOCSIS 1.0 | 10 |
| 1.4.2 DOCSIS 1.1 | 11 |
| 1.4.5 DOCSIS 2.0 | 11 |
| 1.4.6 DOCSIS 3.0 | 12 |
| 1.4.7 DOCSIS 3.1 | 13 |
| 1.5. DOCSIS 4.0 <i>Next Generation HFC</i> | 14 |
| 1.5.1 Nodo + 0 | 15 |
| 1.5.2 Arquitectura de Acceso Distribuido | 15 |
| 1.5.3 Combinando <i>DAA</i> y <i>Node + 0</i> | 16 |
| 1.6 ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS REDES DE FIBRA ÓPTICA | 16 |
| 1.6.1 FIBRA ÓPTICA | 17 |
| 1.6.1 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA | 18 |
| 1.7 REDES <i>FTTx</i> | 20 |
| 1.7.1 <i>FTTH</i> | 21 |
| 1.7.2 <i>FTTB</i> | 21 |
| 1.7.3 <i>FTTN</i> | 21 |
| 1.7.4 <i>FTTH</i> | 21 |
| 1.7.5 ARQUITECTURA GENERAL DE UNA RED <i>FTTH</i> | 22 |



| | |
|---|-----------|
| 1.8. FUNCIONAMIENTO GENÉRICO DE UNA RED PON | 22 |
| 1.8.1 Terminal de línea óptica – OLT..... | 22 |
| 1.8.2 Terminal de red óptica – ONT | 23 |
| 1.8.3 <i>Splitter</i> - Divisor Óptico..... | 23 |
| 1.9 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM).. | 25 |
| 1.9.1 Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM)..... | 26 |
| 1.10 DEGRADACIONES ÓPTICAS | 26 |
| 1.10.1 Fenómenos Lineales. | 26 |
| 1.10.2 Efectos no lineales | 29 |
| 1.11 ASPECTOS GENERALES DE LAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS.... | 31 |
| 1.12 REDES DE GRILLA FLEXIBLE Ó <i>ELASTIC OPTICAL NETWORKS</i>... | 31 |
| 1.12.1 Características de la rejilla de espectro flexible (<i>Flexgrid</i>)..... | 32 |
| 1.13 CANAL DESCENDENTE Ó <i>DOWNSTREAM</i> | 33 |
| 1.14 CANAL ASCENDENTE Ó <i>UPSTREAM</i> | 33 |
| 1.15 SERVICIOS <i>QUAD PLAY</i>..... | 33 |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA, ENTORNOS DE CO-SIMULACIÓN Y ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO | 35 |
| 2.1 METODOLOGÍA..... | 35 |
| 2.1.1 Metodología de Desarrollo..... | 35 |
| 2.1.2 Metodología de simulación..... | 37 |
| 2.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN | 38 |
| 2.2.1 MATLAB™ | 39 |
| 2.2.2 OptSim™ | 39 |
| 2.2.3 OptiSystem..... | 41 |
| 2.2.4 OMNet++™ | 42 |
| 2.2.5 Optilux™ | 42 |
| 2.3 MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EN REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS..... | 44 |
| 2.3.1 Algoritmos estáticos | 44 |
| 2.3.2 Algoritmos Dinámicos..... | 44 |
| 2.3.4 Algoritmos RSA | 45 |



| | |
|--|-----------|
| 2.4 BASES TEÓRICAS PARA LA COMPRENSIÓN DEL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO DE ACUERDO CON OPM (<i>OPTICAL PERFORMANCE MONITORING</i>)..... | 47 |
| 2.4.1 Factor Q | 48 |
| 2.4.2 Tasa de error de bit (BER, <i>Bit Error Rate</i>) | 48 |
| 2.4.3 Relación señal a ruido óptica (OSNR)..... | 49 |
| 2.4.4 Diagrama de ojo | 49 |
| 2.4.5 Jitter..... | 50 |
| 2.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL..... | 51 |
| 2.6 SISTEMA <i>QUAD PLAY</i>..... | 52 |
| 2.6.1 Topología de red..... | 53 |
| 2.6.2 Subsistema de Transmisión: | 53 |
| 2.6.3 Subsistema Multiplexor/Demultiplexor WDM:..... | 55 |
| 2.6.4 Subsistema de Canal de Acceso:..... | 55 |
| 2.6.5 Subsistema de Recepción: | 56 |
| 2.7 MODELO FÍSICO DE LA RED <i>QUAD PLAY</i>..... | 57 |
| 2.7.1 DEFINICIÓN DE PÁMETROS DE LA OFICINA CENTRAL <i>QUADPLAY</i> | 58 |
| 2.8 ENTORNO DE CO-SIMULACIÓN (MÓDULO <i>MATLAB</i>TM) | 66 |
| 2.8.1 ENTORNO DE CO-SIMULACIÓN CABLE COAXIAL | 66 |
| 2.8.2 MÓDULO DE CO-SIMULACIÓN DEL ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA EN LOS ESCENARIOS <i>FTTH</i> Y <i>NG-HFC</i> | 68 |
| CAPÍTULO III Evaluación de los parámetros <i>OPM</i> en la red <i>NG-HFC</i> y <i>FTTH</i> sobre el servicio de <i>Quad Play</i> haciendo uso del método de asignación dinámica del espectro..... | 73 |
| 3.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN | 73 |
| 3.1.1 Escenario red <i>FTTH</i> a 10Km | 75 |
| 3.1.2 Escenario red <i>FTTH</i> a 20Km | 79 |
| 3.1.3 Evaluación desempeño y elección cable coaxial para el tramo de acceso en la red <i>NG-HFC</i> | 83 |
| 3.1.4 Resultados Escenario red <i>NG-HFC</i> a 10Km usando cable coaxial <i>RG-59</i> frente a un escenario de red <i>NG-HFC</i> usando cable coaxial <i>RG-11</i> . | 84 |
| 3.1.5 Escenario red <i>NG-HFC</i> a 10Km..... | 85 |



| | |
|--|------------|
| 3.1.6 Escenario red <i>NG-HFC</i> a 20Km..... | 91 |
| 3.2 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED <i>FTTH</i> FRENTE A LA RED <i>NG-HFC</i> A UNA DISTANCIA DE 10KM | 94 |
| 3.2.1. Análisis para el servicio de Datos/VoIP RED <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 10km..... | 94 |
| 3.2.2. Análisis para el servicio de Broadcast video RED <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 10km | 96 |
| 3.2.1 Análisis para el servicio de RoF RED <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 10km..... | 96 |
| 3.3 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED <i>FTTH</i> FRENTE A LA RED <i>NG-HFC</i> A UNA DISTANCIA DE 20KM | 98 |
| 3.3.1 Análisis para el servicio de datos/VoIP RED <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 20km..... | 98 |
| 3.3.2 Análisis para el servicio de Broadcast video red <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 20km | 99 |
| 3.3.3 Análisis para el servicio de RoF video red <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 20km | 100 |
| 3.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EXACT FIT | 101 |
| 3.4.1 Escenario red <i>FTTH</i> con método de asignación dinámica de espectro a 10Km | 102 |
| 3.4.2 Escenario red <i>FTTH</i> con método de asignación dinámica de espectro a 20Km | 105 |
| 3.4.3 Escenario red <i>NG-HFC</i> con método de asignación dinámica de espectro a 10Km | 108 |
| 3.4.4 Escenario red <i>NG-HFC</i> con método de asignación dinámica de espectro a 20Km | 111 |
| 3.5 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED <i>FTTH</i> CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO FRENTE A LA RED <i>NG-HFC</i> CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINAMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 10KM | 115 |
| 3.5.1 Análisis para el servicio de Datos/VoIP red <i>FTTH</i> frente a la red <i>NG-HFC</i> a una distancia de 10km usando método de asignación dinámica de espectro | 115 |
| 3.6 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED <i>FTTH</i> CON METODO DE ASIGNACIÓN DINAMICA DE ESPECTRO FRENTE A LA RED <i>NG-HFC</i> CON | |



| | |
|---|------------|
| MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 20KM | 118 |
| 3.6.1 Análisis para el servicio de Datos/VoIP red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 20km usando método de asignación dinámica de espectro | 119 |
| 3.7 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SERIVICIO DE DATOS/VoIP EN LAS RED FTTH Y NG-HFC CON Y SIN MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 10KM | 120 |
| 3.7.1 Análisis general para los sistemas FTTH y NG-HFC con y sin asignación dinámica de espectro a una distancia de 10Km. | 120 |
| CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 121 |
| 4.1 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y LA SIMULACIÓN | 122 |
| 4.2. SOBRE EL TRABAJO..... | 123 |
| 4.3 SOBRE LA HERRAMIENTA | 124 |
| 4.4 RECOMENDACIONES | 124 |
| 4.5 TRABAJOS FUTUROS | 125 |
| REFERENCIAS..... | 127 |
| ANEXOS | 131 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2.1, Cuadro comparativo de las herramientas de simulación | 43 |
| Tabla 2.2, Características eléctricas cable RG-11 y RG-59 | 56 |
| Tabla 2.3, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación servicio de Internet-VoIP. | 59 |
| Tabla 2.4, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación del servicio de vídeo. | 60 |
| Tabla 2.5, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación del servicio RoF, módulo RoF. | 63 |
| Tabla 3.1 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 1 ONT..... | 76 |
| Tabla 3.2 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 2 ONT..... | 76 |
| Tabla 3.3 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 4 ONT..... | 77 |
| Tabla 3.4 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 8 ONT..... | 78 |
| Tabla 3.5 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 16 ONT..... | 78 |
| FTTH 10Km..... | 78 |
| Tabla 3.6 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 1 ONT..... | 80 |
| Tabla 3.7 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 2 ONT..... | 80 |
| Tabla 3.8 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 4 ONT..... | 81 |
| Tabla 3.9, Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 8 ONT..... | 82 |
| Tabla 3.10, Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 16 ONT..... | 82 |
| Tabla 3.11 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con cable coaxial RG 59 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 84 |
| Tabla 3.12 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con cable coaxial RG 11 con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km..... | 84 |
| Tabla 3.13, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway a una distancia de 10 Km..... | 88 |
| Tabla 3.14, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 88 |
| Tabla 3.15, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway a una distancia de 10 Km..... | 89 |
| Tabla 3.16, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km..... | 90 |
| Tabla 3.17, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 10 Km..... | 90 |
| Tabla 3.18, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway a una distancia de 20 Km..... | 91 |
| Tabla 3.19, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway a una distancia de 20 Km..... | 92 |
| Tabla 3.20 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway a una distancia de 20 Km..... | 92 |
| Tabla 3.21, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 20 Km..... | 93 |
| Tabla 3.22 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 20 Km..... | 94 |
| Tabla 3.33 parámetros para los sistemas FTTH y NG-HFC con asignación dinámica de espectro. | 102 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 3.24 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT. | 103 |
| Tabla 3.25 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT. | 103 |
| Tabla 3.26 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT. | 104 |
| Tabla 3.27 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT. | 104 |
| Tabla 3.28 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT. | 105 |
| Tabla 3.29 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT. | 105 |
| Tabla 3.30 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT. | 106 |
| Tabla 3.31 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT. | 106 |
| Tabla 3.32 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT. | 107 |
| Tabla 3.33 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT. | 108 |
| Tabla 3.34 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 1 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 108 |
| Tabla 3.35 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 2 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 109 |
| Tabla 3.36 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 4 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 110 |
| Tabla 3.37 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 110 |
| Tabla 3.38 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 16 Coax Gateway a una distancia de 10 Km. | 111 |
| Tabla 3.39 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 1 Coax Gateway a una distancia de 20 Km. | 112 |
| Tabla 3.40 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 2 Coax Gateway a una distancia de 20 Km. | 112 |
| Tabla 3.41 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 4 Coax Gateway a una distancia de 20 Km. | 113 |
| Tabla 3.42 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 8 Coax Gateway a una distancia de 20 Km. | 114 |
| Tabla 3.43 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 16 Coax Gateway a una distancia de 20 Km. | 114 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1, Capas de Redes de Telecomunicaciones [53] | 5 |
| Figura 1.2, Esquema de cable coaxial [6]..... | 7 |
| Figura 1.3, Arquitectura HFC. [7]..... | 9 |
| Figura 1.4, Node +0. [15]..... | 15 |
| Figura 1.5, Fibra tipo Monomodo[9] | 19 |
| Figura 1.6, Tipo de fibra Multimodo. [9]..... | 20 |
| Figura 1.7, Esquema de diferentes arquitecturas FTTx [21]..... | 20 |
| Figura 1.8, Ilustración de fibra óptica hasta el hogar [54]..... | 21 |
| Figura 1.9, Esquema de red FTTH-GPON empleando un Amplificador de Fibra Dopado con Erblio (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier). [16]..... | 22 |
| Figura 1.10, Modelo de despliegue de red más usado por operadores [10]..... | 23 |
| Figura 1.11, Esquema interno de un splitter tipo FBT (splitter 1:4) [11] | 24 |
| Figura 1.12, Esquema interna de un Splitter tipo PLC [11]..... | 25 |
| Figura 1.13, Ilustración funcionamiento de la técnica WDM[50]..... | 25 |
| Figura 1.14, Clasificación de los efectos lineales, Adaptado de[41]..... | 27 |
| Figura 1.15, Atenuación de la fibra óptica en función de la frecuencia y longitud de onda [45]. | 27 |
| Figura 1.16, Representación gráfica de la Polarización por modo de dispersión. [45] 28 | |
| Figura 1.17, Clasificación de los efectos lineales, Adaptado de[41]..... | 29 |
| Figura 1.19, Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga[45]. | 30 |
| Figura 1.20, Modelo de arquitectura para una red óptica de grilla flexible[21]. .. | 32 |
| Figura 1.21, Ilustración rejilla flexible (a) conformación de slices (b) composición de slots [19]..... | 32 |
| Figura 2.1, Modelo lineal o cascada clásico | 36 |
| Figura 2.2, Esquema modelo de metodología de simulación adaptado de [21]. | 38 |
| Figura 2.3, Logotipo de Matlab™ tomado de [26]. | 39 |
| Figura 2.4, Logo de OptSim tomado de [27]..... | 41 |
| Figura 2.5, Logo OMNet++™ tomado de [28] | 42 |
| Figura 2.6, Logo de Optilux™ tomado de [31]..... | 43 |
| Figura 2.7, Representación funcionamiento algoritmo First Fit tomado de [37].. | 45 |
| Figura 2.8, Representación funcionamiento algoritmo Random Fit tomado de [37]. | 45 |
| Figura 2.9, Representación funcionamiento algoritmo Last Fit tomado de [37].. | 46 |
| Figura 2.10, Representación funcionamiento algoritmo tipo péndulo tomado de [18]. | 46 |
| Figura 2.11, Parámetros diagrama de ojo, Adaptado de [40]. | 50 |
| Figura 2.12, Diagrama de ojo con 0.5 UI (UI, Units Interval) de Jitter agregado intencionalmente a los datos. Tomado de (Hewlett-Packard Journal, 1995)..... | 50 |
| Figura 2.13, Modelo General de la Red FTTH-GPON Triple Play, Tomado de [21]. | 51 |
| Figura 2.14, Modelo lógico de la transmisión QuadPlay, Adaptado de [21]. | 52 |
| Figura 2.15, Modelo lógico NG-HFC | 52 |
| Figura 2.16, Modelo Lógico FTTH..... | 53 |
| Figura 2.17, Esquema general en OptSim de la red FTTH para servicios Quad Play. | 57 |



| | |
|--|----|
| Figura 2,18, Esquema general en OptSim de la red NG-HFC para servicios Quad Play. | 58 |
| Figura 2.19, Esquema de los Componentes de la Red de Servicios de Voz, Datos, Vídeo y Módulo RoF al Interior de la Oficina Central. | 58 |
| Figura 2.20, Elementos que Componen el Servicio de Internet/VoIP..... | 59 |
| Figura 2.21, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play – Diagrama del Ojo de Señal de Datos VoIP Tx y Rx de señal. | 59 |
| Figura 2.23, Elementos que conforman el servicio de vídeo. | 60 |
| Figura 2.24, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play - Diagrama de ojo señal de vídeo, Tx y Rx de señal..... | 61 |
| Figura 2.25, Diagrama de Constelación simulado 16-QAM Servicio de Vídeo a la entrada y salida del sistema..... | 61 |
| Figura 2.26, Módulo OFDM Back-to-Back..... | 62 |
| Figura 2.27, Elementos que conforman el servicio de RoF, módulo RoF..... | 63 |
| Figura 2.28, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play Diagrama de ojo señal RoF. | 64 |
| Figura 2.29, Diagrama de Constelación simulado 16-QAM Servicio RoF a la entrada y salida del sistema..... | 64 |
| Figura 2.30, Elementos que componen la ONT en la red de acceso FTTH. | 65 |
| Figura 2.31, Elementos que componen la COAX GATEWAY en la red de acceso NG-HFC. | 65 |
| Figura 2.32, Archivos co-simulación Matlab™ Optsim..... | 69 |
| Figura 2.33. Pseudocódigo lógica método de asignación. | 70 |
| Figura 2.34, Pseudocódigo función Exact-Fit..... | 71 |
| Figura 2.35, Esquema de la inclusión del algoritmo en la red por medio de CCM en la red FTTH. | 72 |
| Figura 3.1, Definición de los escenarios a simular..... | 74 |
| Figura 3.2 Escenario red FTTH con 1 ONT a una distancia de 10 Km..... | 75 |
| En la figura 3.2 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 1 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6. | 76 |
| Figura 3.3 Escenario red FTTH 2 ONT a una distancia de 10 Km. | 76 |
| Figura 3.4 Escenario red FTTH 4 ONT a una distancia de 10 Km. | 77 |
| Figura 3.5 Escenario red FTTH 8 ONT a una distancia de 10 Km. | 77 |
| Figura 3.6 Escenario red FTTH 16 ONT a una distancia de 10 Km. | 78 |
| Figura 3.7 Escenario red FTTH con 1 ONT a una distancia de 20 Km..... | 79 |
| Figura 3.8 Escenario red FTTH con 2 ONT a una distancia de 20 Km..... | 80 |
| Figura 3.9 Escenario red FTTH con 4 ONT a una distancia de 20 Km..... | 81 |
| Figura 3.10, Escenario red FTTH con 8 ONT a una distancia de 20 Km..... | 81 |
| Figura 3.11, Escenario Red FTTH con 16 ONT a una distancia de 20 Km. | 82 |
| Figura 3.12, Datasheet cable coaxial RG 59 fabricante KOAX 24_..... | 83 |
| Figura 3.13, Datasheet cable coaxial RG 11 fabricante KOAX 24_..... | 84 |
| Figura 3.14, Gráficas comparación escenario NG-HFC Cable coaxial RG 11 vs escenario NG-HFC cable coaxial RG 59..... | 85 |
| Figura 3.15, Diagrama topologías sistema FTTH vs NG-HFC [58]. | 86 |
| Figura 3.16, módulo nodo +0 NG-HFC [15]..... | 87 |
| Figura 3.17, Escenario red la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway..... | 87 |



| | |
|--|-----|
| a una distancia de 10 Km..... | 87 |
| Figura 3.18, Escenario red la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway..... | 88 |
| a una distancia de 10 Km..... | 88 |
| Figura 3.19, Escenario red la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway..... | 89 |
| a una distancia de 10 Km..... | 89 |
| Figura 3.20, Escenario red la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway..... | 89 |
| a una distancia de 10 Km..... | 89 |
| Figura 3.21, Escenario red la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway..... | 90 |
| a una distancia de 10 Km..... | 90 |
| Figura 3.22, Escenario red la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway..... | 91 |
| a una distancia de 20 Km..... | 91 |
| Figura 3.23, Escenario red la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway..... | 91 |
| a una distancia de 20 Km..... | 91 |
| Figura 3.24, Escenario red la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway..... | 92 |
| a una distancia de 20 Km..... | 92 |
| Figura 3.25, Escenario red la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway..... | 93 |
| a una distancia de 20 Km..... | 93 |
| Figura 3.26, Escenario red la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway..... | 93 |
| a una distancia de 20 Km..... | 93 |
| Figura 3.27, Gráficas monitoreo para Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, comparación FTTH frente NG-HFC..... | 95 |
| Figura 3.28, Gráficas desempeño para Video a 0.8 Gbps, 10 km, comparación FTTH NG-HFC..... | 96 |
| Figura 3.29, gráficas desempeño para RoF a 10 Gbps, 10 km, comparación FTTH NG-HFC..... | 97 |
| Figura 3.30, Gráficas desempeño para datos/VoIP a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG-HFC..... | 98 |
| Figura 3.31, gráficas desempeño para broadcast a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG- HFC..... | 99 |
| Figura 3.32, gráficas desempeño para RoF a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG-HFC..... | 100 |
| Figura 3.34, funcionamiento asignación de espectro del algoritmo Exact Flt.... | 102 |
| Figura 3.35 Escenario Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT a una distancia de 10 Km..... | 102 |
| Figura 3.36 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT a una distancia de 10 Km..... | 103 |
| Figura 3.37 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT a una distancia de 10 Km..... | 103 |
| Figura 3.37 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT a una distancia de 10 Km..... | 104 |
| Figura 3.38 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT a una distancia de 10 Km..... | 104 |
| Figura 3.39 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT a una distancia de 20 Km..... | 105 |
| Figura 3.40 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT a una distancia de 20 Km..... | 106 |
| Figura 3.41 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT a una distancia de 20 Km..... | 106 |



| | |
|---|-----|
| Figura 3.42 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT a una distancia de 20 Km. | 107 |
| Figura 3.43 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT a una distancia de 10 Km. | 107 |
| Figura 3.44, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 1 usuario. | 108 |
| Figura 3.45, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 2 Coax Gateway | 109 |
| Figura 3.46, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 4 usuarios. | 109 |
| Figura 3.47, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 8 usuarios. | 110 |
| Figura 3.48, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 16 usuarios. | 111 |
| Figura 3.49, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 1 usuario. | 111 |
| Figura 3.50, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 2 usuarios. | 112 |
| Figura 3.51, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 4 usuarios. | 113 |
| Figura 3.52, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 8 usuarios. | 113 |
| Figura 3.53, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 16 usuarios. | 114 |
| Figura 3.53 gráficas desempeño para Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro. | 115 |
| Figura 3.54 gráficas desempeño servicio de vídeo a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro. | 116 |
| Figura 3.55 gráficas desempeño servicio de RoF a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro. | 118 |
| Figura 3.56 gráficas desempeño servicio de Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 20 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro. | 119 |
| Figura 3.57 gráficas desempeño servicio de Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con y sin método de asignación dinámica de espectro. | |
| 120 | |
| Figura, Código Matlab™ que simula la transmisión línea cable coaxial RG 11.131 | |
| Figura, código Matlab™ que simula la transmisión línea cable coaxial RG 59. 132 | |



LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|----------------|---|
| AES | Estándar de Cifrado Avanzado (<i>Advanced Encryption Standard</i>) |
| ATM | Modo de Transferencia Asíncrona (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>) |
| ADSL | Línea de Abonado Digital Asimétrica (<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>) |
| BER | Tasa de Error de Bit (<i>Bit Error Rate</i>) |
| BVT | Transceptores de Ancho de Banda Variable (<i>Bandwidth Variable Transceivers</i>) |
| CATV | Televisión por Antena Comunitaria (<i>Community Antenna Television</i>) |
| CD | Dispersión Cromática (<i>Chromatic Dispersión</i>) |
| CPE | Equipo en las Instalaciones del Cliente (<i>Customer Premises Equipment</i>) |
| CSRZ | Retorno a cero con supresión de portador (<i>Carrier-Suppressed Return-to-Zero</i>) |
| CWDM | Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada (<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>) |
| DAA | Arquitectura de Acceso Distribuido (<i>Distributed Access Architecture</i>) |
| DOCSIS | <i>Data Over Cable Service Interface Specification</i> , (Especificación de Interfaz de Servicios de Datos por Cable) |
| DP-QPSK | Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura de Polarización Dual (<i>Dual-Polarization Quadrature Phase shift Keying</i>) |
| DPSK | Modulación por Cambio de Fase Diferencial (<i>Differential Phase-Shift Keying</i>) |
| DSA | Asignación Dinámica de Subportadoras (<i>Dynamic Subcarrier Assignment</i>) |
| DWDM | Multiplexación Densa por División de Longitudes de Onda (<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>) |
| EON | Red Óptica Elástica (<i>Elastic Optical Network</i>) |
| ETSI | Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>) |
| EΛAN | Redes de Agregación Lambda Elásticas (<i>Elastic Lambda Aggregation Networks</i>) |
| FIET | Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones |
| FTTB | Fibra hasta el edificio (<i>Fiber-To-The-Building</i>) |
| FTTH | Fibra hasta la casa (<i>Fiber-To-The-Home</i>) |
| FTTN | Fibra hasta el nodo (<i>Fiber-To-The-Node</i>) |
| FWM | Mezcla de cuatro ondas (<i>Four-Wave Mixing</i>) |
| GPON | Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (<i>Gigabit Passive Optical Network</i>) |
| HFC | Híbrido de Fibra Coaxial (<i>Hybrid Fiber-Coaxial</i>) |
| IP | Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>) |
| LAN | Red de Área Local (<i>Local Area Network</i>) |
| MSO | Operador de Sistema Múltiple (<i>Multiple System Operator</i>) |



| | |
|------------------|--|
| NG-HFC | Híbrido de Fibra Coaxial de Nueva Generación (<i>Next-Generation Hybrid Fiber Coaxial</i>) |
| NRZ | Codificación No Retorno a Cero (<i>Non-Return-to-Zero</i>) |
| OCDMA | Acceso Múltiple por División de Código Óptico (<i>Optical Code-Division Multiple-Access System</i>) |
| OFDM | Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>) |
| OFDMA-PON | Red Óptica Pasiva de Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access Passive Optical Network</i>) |
| OLT | Terminal de Línea Óptica (<i>Optical Line Termination</i>) |
| ONU | Unidad de Red Óptica (<i>Optical Network Unit</i>) |
| ONT | Terminal de Red Óptica (<i>Optical Network Termination</i>) |
| OSNR | Relación Señal a Ruido Óptica (<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>) |
| OTT | Servicio de Libre Transmisión (<i>Over-The-Top Service</i>) |
| PDH | Jerarquía Digital Plesiócrona (<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>) |
| PLC | Circuito de Ondas de luz plana (<i>Planar Lightwave Circuit</i>) |
| PM-QPSK | Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Multiplexada por Polarización (<i>Polarization-Multiplexed Quadrature Phase-Shift Keying</i>) |
| PON | Red Óptica Pasiva (<i>Passive Optical Network</i>) |
| QAM | Modulación de Amplitud en Cuadratura (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>) |
| QPSK | Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>) |
| QoS | Calidad del Servicio (<i>Quality of Service</i>) |
| RoF | Radio sobre Fibra (<i>Radio over Fiber</i>) |
| RSA | Asignación de Enrutamiento y Espectro (<i>Routing and Spectrum Allocation</i>) |
| RZ | Retorno a Cero (<i>Return to Zero</i>) |
| SBS | Difusión Estimulada de Brillouin (<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>) |
| SCTE | Sociedad de Ingenieros de Telecomunicaciones por Cable (<i>Society of Cable Telecommunications Engineers</i>) |
| SDH | Jerarquía Digital Síncrona (<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>) |
| SPM | Automodulación de Fase (<i>Self Phase Modulation</i>), |
| SRS | Difusión Estimulada de Raman (<i>Stimulated Raman Scattering</i>) |
| UTP | Par Trenzado no Apantallado (<i>Unshielded Twisted Pair</i>) |
| VDSL | Línea de Abonado Digital de muy Alta Tasa de Transferencia (<i>Very High Bit Rate Digital Subscriber Line</i>) |
| WDM | Multiplexación por División de Longitud de Onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>) |
| WXC | Conexión Cruzada de Longitud de Onda (<i>Wavelength Crossconnect</i>) |
| XPM | Modulación de Fase Cruzada (<i>Cross Phase Modulation</i>) |



INTRODUCCIÓN

Las redes híbridas de fibra coaxial (*HFC, Hybrid Fiber-Coaxial*) se implementaron inicialmente para ofrecer a los usuarios el servicio de televisión por suscripción (*CATV, Community Antenna Television*), utilizando en toda su topología cable coaxial, posteriormente con la implementación de nuevas arquitecturas de red se masifica el uso de la fibra óptica, con lo cual se resuelven dificultades presentes en redes de cobre tradicionales asociado al ruido, mejorando considerablemente la calidad de la señal. Con el uso de esta tecnología fue posible para los operadores de telecomunicaciones la inclusión de nuevos servicios como Internet y telefonía soportados sobre el mismo cable. [1]

Es importante recalcar que durante las últimas décadas se ha presentado un incremento en el número de usuarios que acceden a los servicios de las redes de datos y se ha experimentado un crecimiento exponencial en el volumen de tráfico de datos y una mayor demanda de servicios con mejor calidad, disponibilidad, velocidad y ancho de banda por parte de los usuarios. [2]

Los constantes estudios sobre la fibra óptica han permitido el desarrollo de nuevos y prometedores estándares en las redes de acceso como red óptica pasiva con capacidad de gigabit (*GPON, Gigabyte Passive Optical Network*) donde se destaca un ahorro significativo en los costos de despliegue al no requerir dispositivos electrónicos u optoelectrónicos activos para establecer comunicación entre el abonado y el operador, suponiendo menores costos de inversión en el mantenimiento de la red [2][3].

Dentro de las topologías propuestas en redes de acceso *GPON* destaca la arquitectura de fibra hasta la casa (*FTTH, Fiber To The Home*) que describe un despliegue puramente sobre fibra, permitiendo ofrecer considerables anchos de banda a precios razonables para proveedores de servicios y usuarios, abriendo el camino para que se soporten nuevas tecnologías sobre la fibra instalada. [4]

Actualmente existe un gran interrogante entre los operadores de telecomunicaciones respecto a si seguir explotando los recursos existentes de las redes de cobre resulta provechoso para hacer frente a la gran y creciente demanda en los servicios por parte de usuarios finales sobre las redes de datos; o si por el contrario las ventajas de desplegar redes puramente de fibra óptica sobrepasan las de una red de datos de cobre híbrida. Por lo cual, el desarrollo de este trabajo buscó analizar el desempeño de las redes anteriormente descritas sobre un entorno de simulación, al igual que incluir técnicas de asignación dinámica de espectro que permiten obtener un mejor desempeño en los parámetros de los sistemas de telecomunicaciones y comprobar la utilidad de emplear redes híbridas de cobre coaxial basados en una topología de nueva generación (*NG-HFC, Next-Generation Hybrid Fiber Coaxial*).

Es por las razones expuestas anteriormente que se planea emplear un método de asignación dinámica de espectro óptico para la prestación de servicios *Quad*



Play en redes *FTTH* y *NG-HFC* y de esta manera medir el desempeño a nivel físico de los parámetros ópticos.

En resumen, en este trabajo se analiza el desempeño de las redes de acceso, en particular la arquitectura *FTTH*, comparándola con la red híbrida de fibra coaxial *NG-HFC*. Además, se introduce el uso de técnicas de asignación dinámica de espectro óptico para la prestación de servicios *Quad Play*, lo que permitirá medir el desempeño a nivel físico de los parámetros ópticos. Con este análisis, se espera poder determinar si la red *NG-HFC* es una buena alternativa que la red de fibra en términos de calidad, disponibilidad, velocidad y ancho de banda, y si el uso de técnicas de asignación dinámica de espectro puede mejorar el desempeño de ambas redes.

ABSTRACT

Hybrid Fiber-Coaxial networks (HFC) were initially implemented to offer users the subscription television service (CATV, Community Antenna Television), using coaxial cable throughout its topology, later with the implementation of new network architectures, the use of fiber optics is widespread, thereby solving difficulties present in traditional copper networks associated with noise, considerably improving the quality of the signal. With the use of this technology, it was possible for telecommunications operators to include new services such as Internet and telephony supported on the same cable. [1]

It is important to emphasize that during the last decades there has been an increase in the number of users accessing data network services and there has been an exponential growth in the volume of data traffic and a greater demand for services with better quality, availability, speed and bandwidth by users. [2]

The constant studies on fiber optics have allowed the development of new and promising standards in access networks such as passive optical network with gigabyte capacity (GPON, Gigabyte Passive Optical Network) where significant savings in deployment costs are highlighted by not require active electronic or optoelectronic devices to establish communication between the subscriber and the operator, assuming lower investment costs in network maintenance [2][3].

Within the topologies proposed in GPON access networks, the architecture of fiber to the home (FTTH, Fiber To The Home) stands out, which describes a purely fiber-based deployment, allowing considerable bandwidth to be offered at reasonable prices for service providers and users. Opening the way for new technologies to be supported on the installed fiber. [4]

Currently there is a big question among telecommunications operators as to whether continuing to exploit the existing resources of copper networks is profitable to meet the large and growing demand for services by end users on data networks; or if, on the contrary, the advantages of deploying purely fiber optic networks exceed those of a hybrid copper data network. Therefore, the



development of this work seeks to analyze the performance of the networks described above in a simulation environment, as well as to include dynamic spectrum allocation techniques that allow better performance in the parameters of telecommunications systems and verify the usefulness of using hybrid coaxial copper networks based on a new generation topology. (NG-HFC, Next-Generation Hybrid Fiber Coaxial). It is for the reasons stated above that it is planned to use a dynamic optical spectrum allocation method for the provision of Quad Play services in FTTH and NHFC networks and in this way measure the performance of the optical parameters at the physical level.

In summary, this paper analyzes the performance of GPON access networks, in particular the FTTH architecture, comparing it with the hybrid NG-HFC coaxial fiber network. In addition, it introduces the use of dynamic optical spectrum allocation techniques for the provision of Quad Play services, which will allow measuring the performance at the physical level of the optical parameters. With this analysis, it is expected to determine whether the NG-HFC network is a better alternative than the fiber network in terms of quality, availability, speed and bandwidth, and whether the use of dynamic spectrum allocation techniques can improve the performance of both networks.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo y culminación de este trabajo, el contenido consta de cuatro capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

En el **capítulo 1**, se tratan aspectos relacionados a la teoría que enmarca las generalidades de las redes *FTTH* y *NG-HFC*, lo cual ofrecerá al lector una inmersión hacia estos sistemas para el entendimiento de los conceptos a tratar durante el desarrollo de estos sistemas.

A través del desarrollo del **capítulo 2**, el lector podrá comprender aspectos relacionados a los algoritmos utilizados actualmente para la asignación de espectro en redes ópticas, así mismo, se describirá las herramientas software de mayor aplicación para este tipo de sistemas (Matlab™, OptSim™, OMNeT++™), y que se integrarán con el desarrollo del trabajo, finalmente en este capítulo también se hablará sobre la metodología de trabajo escogida y su integración en el trabajo.

En lo que respecta al **capítulo 3**, se modelan las arquitecturas de red en cuestión sobre las herramientas software seleccionadas, integración de mecanismos de asignación de espectro y el caso de simulación para lograr medir su desempeño.

Finalmente, en el **capítulo 4**, se analiza los resultados obtenidos del proceso previo de las simulaciones, igualmente se describen las conclusiones y resultados encontradas del proceso, y finalmente se plantean algunos futuros trabajos encaminados a profundizar la investigación sobre esta temática.



CAPÍTULO I, MARCO TEÓRICO

1. FUNDAMENTOS SOBRE REDES *HFC*, *NG-HFC*, *FTTH* Y *EON*.

El desarrollo de cualquier proyecto requiere de una base sólida de información y conocimiento para asegurar su éxito y efectividad. En el caso de la gestión de redes de telecomunicaciones basadas en cable coaxial y fibra óptica, es especialmente importante contar con una amplia gama de información y estudios para poder desarrollar estrategias efectivas y adaptadas a las necesidades y demandas de los usuarios.

A través de este capítulo se describen los aspectos principales de la teoría que enmarca a las tecnologías de redes de acceso, cable coaxial tradicional, redes de cable coaxial híbridas y de nueva generación y redes de fibra óptica, a su vez se denotan sus componentes, los estándares, modulaciones, arquitecturas y nuevos conceptos que acompañan el progreso investigativo de las tecnologías de red en mención.

Por lo tanto, el fundamento de este capítulo se basa en información proveniente de diversas fuentes como libros, artículos y estudios de investigación a nivel mundial. Estas fuentes proporcionan una amplia gama de información sobre los diferentes estándares y modelos de asignación de espectro para la gestión de redes de telecomunicaciones basadas en cable coaxial y fibra óptica.

Los estándares son pautas y normas que definen cómo deben ser diseñados y utilizados los sistemas de telecomunicaciones. En el caso de las redes de cable coaxial y fibra óptica, existen estándares bien establecidos que aseguran una conexión de alta calidad y confiabilidad para los usuarios. Además, los modelos de asignación de espectro se utilizan para garantizar el uso eficiente y efectivo del espectro de frecuencias, lo que es esencial para evitar interferencias y asegurar una comunicación clara y sin interrupciones.

En resumen, el fundamento de este capítulo se basa en información de fuentes confiables y autorizadas, lo que permite desarrollar un proyecto con un enfoque científico y asertivo.

1.1 REDES DE ACCESO

Las redes de acceso son el segmento de la red que conecta mediante su propio terminal de abonado los usuarios finales con las centrales de los proveedores de servicios u Oficina Central. Su función es la de permitir al usuario acceder a los servicios de telecomunicaciones mediante diferentes tecnologías que se clasifican según el medio físico que utilizan. [1]

En definitiva, existen varias tecnologías de redes de acceso que permiten acceder a Internet y otros servicios desde el hogar, lo que proporciona una conectividad de red de borde o flanco. La figura 1.1 muestra el campo de las

redes de acceso en la infraestructura de las telecomunicaciones, donde la oficina central (CO) es el edificio donde se encuentran los equipos de intercambio y conmutación.

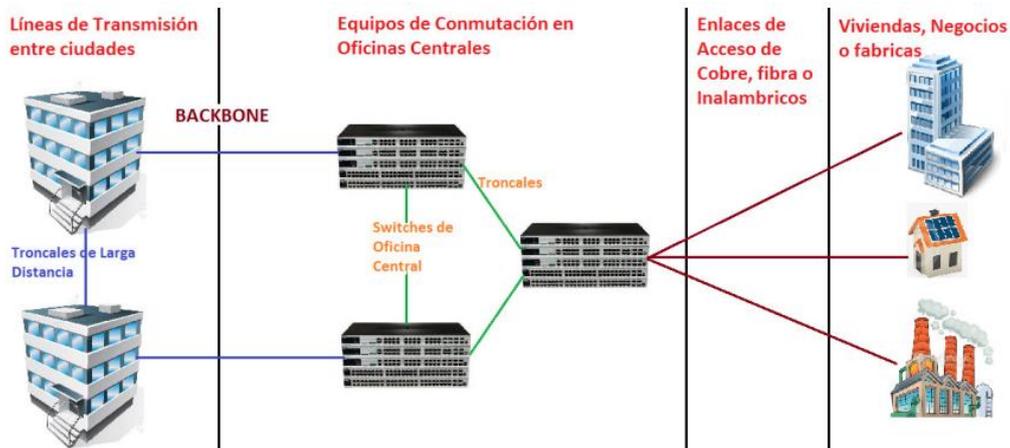


Figura 1.1, Capas de Redes de Telecomunicaciones [53]

Hay diferentes tipos de redes de acceso, dependiendo de la tecnología utilizada y de las necesidades de los usuarios. Algunas de las tecnologías de redes de acceso más comunes incluyen:

- Redes de acceso de cobre (*xDSL*): Utilizan el par de cobre que se encuentra en las líneas telefónicas para transmitir señales de voz y datos a los usuarios finales. Este tipo de redes de acceso es común en zonas urbanas y suburbanas.
- Redes de acceso de cable coaxial: Utilizan cables de tipo coaxial para transmitir señales de voz, video y datos a los usuarios finales. Este tipo de red de acceso es común en áreas urbanas y suburbanas.
- Redes de acceso de línea de alimentación eléctrica: Utilizan la infraestructura eléctrica existente para transmitir señales de voz y datos a los usuarios finales. Este tipo de red de acceso es común en áreas rurales y suburbanas.
- Redes de acceso de malla: Utilizan una red de dispositivos conectados inalámbricamente para transmitir señales de voz y datos a los usuarios finales. Este tipo de red de acceso es común en áreas urbanas y suburbanas.
- Redes de acceso de par trenzado no apantallado (*UTP, Unshielded Twisted Pair*): Utilizan cables de par trenzado no apantallado para transmitir señales de voz y datos a los usuarios finales. Este tipo de red de acceso es común en áreas urbanas y suburbanas.
- Redes de acceso de fibra óptica: Utilizan cables de fibra óptica para transmitir señales de voz y datos a velocidades mucho más altas que las redes de



acceso de cobre. Estas redes de acceso son comunes en zonas urbanas y suburbanas.

- Redes de acceso inalámbricas: Utilizan tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth y 5G para conectar a los usuarios finales con la red de telecomunicaciones. Este tipo de redes de acceso es común en áreas rurales y en lugares donde no hay infraestructura de telecomunicaciones fija.
- Redes de acceso por satélite: Utilizan satélites en órbita para transmitir señales de voz y datos a los usuarios finales. Este tipo de redes de acceso es común en áreas remotas donde no hay infraestructura de telecomunicaciones fija.

1.2 ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS REDES DE CABLE COAXIAL

El descubrimiento y desarrollo de redes cableadas de datos ha sido un hito crucial en la historia de las comunicaciones modernas. Antes de la llegada de estas redes, muchos usuarios se enfrentaban a problemas de recepción de señal debido a sus ubicaciones geográficas, especialmente aquellos que vivían en zonas rurales o remotas donde la señal de radio era débil o inexistente.

Frente a esto, las redes coaxiales fueron una solución clave, ya que permitieron a miles de usuarios conectarse a Internet y disfrutar de una conexión de alta velocidad, sin importar su ubicación geográfica. Estas redes transmiten señales de datos a través de un cable coaxial, que es un cable resistente que puede soportar altas frecuencias de señal y protegerlas de interferencias externas.

Aspectos como componentes del cable coaxial, arquitecturas de red, estándares de interfaz de usuario son tratados en las siguientes secciones

1.2.1 CABLE COAXIAL

El cable coaxial es físicamente un hilo cilíndrico formado por un núcleo de alambre de cobre rodeado por un aislante, un blindaje de metal trenzado y una cubierta externa; precisamente el blindaje, que no es más que una malla metálica que rodea el núcleo, le permite proteger los datos transmitidos absorbiendo las señales interferencia (ruido) evitando la distorsión. Proporciona un ancho de banda de 500 MHz, para lo que, entre otras aplicaciones, se utiliza mucho para la televisión por cable. El núcleo transporta señales eléctricas, puede ser sólido o estar hecho de hilos. [5] La figura 1.2, ejemplifica los componentes del cable coaxial.

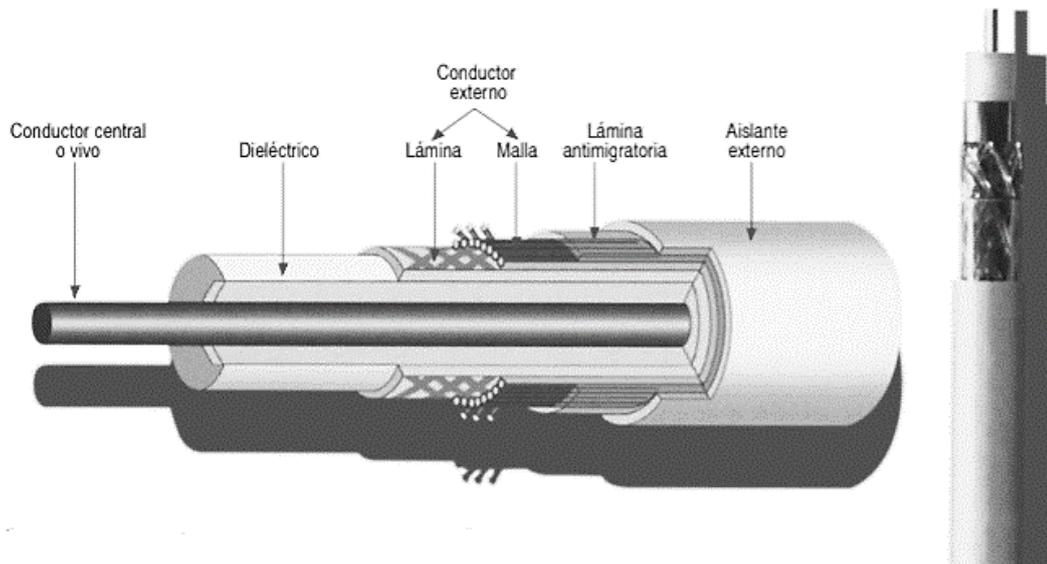


Figura 1.2, Esquema de cable coaxial [6]

1.2.2 PARÁMETROS DE LOS CABLES COAXIALES

- **Impedancia característica.**

Se define como la relación de tensión aplicada sobre la corriente absorbida por un cable coaxial de longitud infinita. Sus unidades son en ohmios y algunas de los valores nominales para los cables coaxiales son de 50, 75 y 93 ohmios. [7]

- **Impedancia de transferencia.**

Está expresada en mili-ohmios por metro y se define como la eficiencia del valor del apantallamiento del conductor externo. Cuanto más pequeño es el valor de este parámetro se considera un cable con mayor eficiencia. [7]

- **Capacidad.**

Es el valor de la capacidad eléctrica que se mide entre el conductor central y el conductor externo dividido por la longitud del cable, se expresan en unidades del orden de pico-faradios por metro y dependen de la geometría del cable y los materiales del aislante. [7]

- **Velocidad de propagación**

Se define como la relación expresada en porcentaje, entre la velocidad de propagación de la señal en el cable y la velocidad de propagación de la luz. Varía de acuerdo con el tipo de material aislante. [7]



- **Atenuación.**

Representa la pérdida de la potencia en una determinada frecuencia, se expresa en decibels (dB) cada 100 metros y depende del tipo de material que se emplea y la geometría del cable, la atenuación se incrementa al aumentar la frecuencia. [7]

- **Potencia transmisible.**

Se refiere a la potencia a que se puede transmitir la señal a una determinada frecuencia sin que se vea afectada por la temperatura del cable, disminuye al aumentar la frecuencia y está dada en unidades de vatios (W). [7]

- **Tensión de trabajo.**

Es la máxima tensión entre el conductor externo e interno, a la que puede trabajar constantemente el cable, sin que genere fenómenos que afectan la transmisión como el efecto corona que se refiere a descargas eléctricas parciales que provocan interferencias eléctricas, afectando la degradación de la señal. [7]

- **Pérdidas de Retorno, (SRL, *Structural Return Loss*).**

Son las pérdidas producidas por la desuniformidad en la construcción de los materiales empleados, produciendo variación en la impedancia generando un rebote de la señal [7].

1.2.3 TIPOS DE CABLE COAXIAL

Esencialmente, existen dos categorías de cable coaxial de acuerdo con la transmisión de señales que se encargara de transportar, por lo cual para transmisión de señales para banda ancha se utilizan cables coaxiales con que tienen una impedancia característica de 75 ohmios, este tipo de cable se utiliza frecuentemente en la transmisión de señales de televisión por cable. Por otro lado, para la transmisión en banda base se recomienda utilizar un cable con una impedancia característica de 50 ohmios, usualmente empleado en redes de área local (LAN, *Local Area Network*) [7].

1.3 Red HFC

Es una red híbrida que utiliza cables de fibra óptica y coaxiales, lo que permite que se reemplace los elementos activos de la red, aumentando la calidad y disponibilidad de la señal del entregada. Sin embargo, inicialmente solo fueron diseñados para recibir señales para su reproducción en televisión. Tampoco permitieron que los enviaran ninguna otra información a través de la red.



Se originó a partir de la red CATV, que nació en Estados Unidos en 1949, para solucionar el problema de la recepción de señales de TV transmitidas a comunidades y ciudades. Por ello, las antenas (consideradas como el centro transmisor) se ubican en alto, donde pueden obtener una buena recepción, y desde allí se distribuyen a los usuarios a través de cables coaxiales. Debido a este modo de funcionamiento, nació lo que ahora se llama *Downstream*. El cable coaxial que se utiliza para este tipo de red es de 75 ohmios porque proporciona menos atenuación al cubrir largas distancias, y para mantener un nivel de señal suficiente se colocan amplificadores cada 0,5 a 1Km. [12]

Las redes de televisión por cable han desarrollado su propia evolución, potenciadas por el uso de redes híbridas HFC, con el objetivo de que se convierta en un servicio competitivo también con la optimización de sus servicios y la variedad de aplicaciones que ofrece. Con la implementación de los estándares DOCSIS 3.0 y 3.1 se han superado algunas barreras como enviar y recibir información en la misma infraestructura. [5]

1.3.1 ARQUITECTURA DE UNA RED HFC

Una red HFC no presenta una arquitectura tan diferente que su predecesora de cable coaxial, en realidad constituye una actualización de esta a través de la introducción de fibra óptica hasta el *Head End* y los nodos de distribución. Una red HFC está constituida por fibra óptica y cable coaxial, generalmente se emplea fibra óptica para la Red Troncal, eliminando varios elementos activos mejorando la calidad de la señal transportada, a partir del receptor óptico se emplea cable coaxial y amplificadores de RF en los dos sentidos. [5] La figura 1.3, describe gráficamente la arquitectura de una red de acceso HFC.

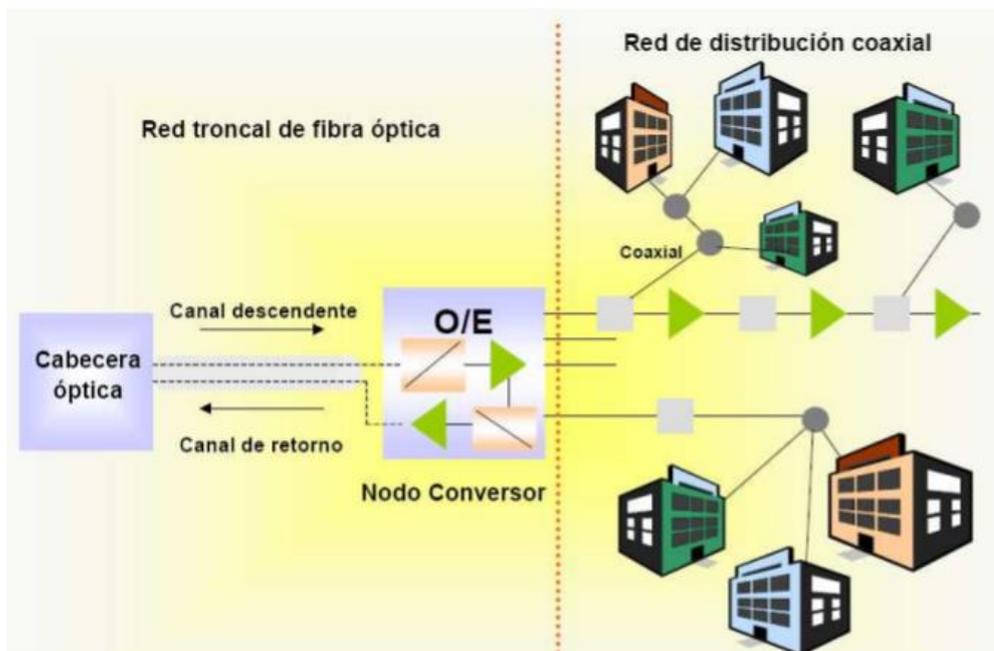


Figura 1.3, Arquitectura HFC. [7]



1.4 DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*).

Es en 1997, que aparece esta nueva tecnología llamada *Data Over Cable Service Interface Specification*, que en español significa “Especificación de interfaz para servicios de Datos por Cable”. DOCSIS Es un estándar que permite a operadores el acceso a internet sobre redes HFC, esto se crea con la finalidad de incorporar sistemas de comunicaciones en los que los operadores de cable transmitan a grandes velocidades una amplia plataforma de servicios haciendo uso de paquetes de datos. La versión 1.0 permitió que los usuarios tuviesen ciertos beneficios como acceso a internet y descargas de entretenimiento como PPV (Pago por ver) [51].

Es un estándar no comercial específico que define los requisitos de interfaz de comunicación y operación de los datos en el sistema de cable. Esto permite que la transmisión de datos de alta velocidad se agregue al sistema de televisión por cable CATV; muchos operadores de televisión por cable lo utilizan para proporcionar acceso a Internet a través de la infraestructura HFC (fibra híbrida y red coaxial) existente.

El estándar DOCSIS puede ser el estándar más importante en el campo de las redes cableadas, y una prueba de ello es su aceptación como estándar por parte de ITU (*International Telecommunication Union*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) y SCTE (*Society of Cable Telecommunications Engineers*).[13]

El estándar DOCSIS ha evolucionado a las versiones 1.1, 2.0, 3.0, 3.1 y 4.0 para proporcionar servicios adicionales y aplicaciones futuras, versiones coincidentes con mejoras productos que satisfacen la demanda del mercado, aseguran la confiabilidad de la red, y lograr una mayor disponibilidad del sistema. Los servicios y aplicaciones actuales de las redes HFC incluyen telefonía Voz sobre Internet (VoIP) y Video sobre IP, Tramas MPEG con calidad de servicio (QoS) y definiciones de seguridad extendidas para admitir estos y otros servicios, un decodificador llamado caja de decodificadora de televisión (STB, *Set Top Box*).

1.4.1 DOCSIS 1.0

DOCSIS 1.0 definió el uso de los equipos de Sistema de Terminación de Cable módems (CMTS, *Cable Modem Termination System*) en la cabecera de la red y los equipos cable módems (CM, *Cable Modem*) en los hogares de los suscriptores. También estableció la forma en que los datos se transmiten a través de los canales de *upstream* y *downstream*, así como los esquemas de modulación y corrección de errores que se utilizan en la transmisión de datos. [51]

Además, DOCSIS 1.0 definió el uso de servidores para la gestión y configuración de los equipos CMTS y CM, lo que permitió a los proveedores de servicios de Internet por cable administrar y controlar la red de acceso por cable de manera más eficiente. Desde entonces, se han publicado varias versiones del estándar



DOCSIS, cada una con mejoras y nuevas características que han mejorado la eficiencia y el rendimiento de las redes de acceso por cable. [51]

DOCSIS 1.0, aunque fue un avance significativo en la transmisión de datos a través de redes de acceso por cable, se basó en una tecnología de "mejor esfuerzo" que no podía garantizar una calidad de servicio (QoS) adecuada para los servicios en tiempo real, como la voz y el video. Como resultado, los proveedores de servicios de Internet por cable tuvieron dificultades para ofrecer servicios de voz y video de alta calidad a través de la red DOCSIS 1.0. Para abordar estas limitaciones, se creó la revisión del estándar DOCSIS 1.1.

1.4.2 DOCSIS 1.1

Para DOCSIS 1.1 (1999) La transmisión de televisión por cable y video fue evolucionando por lo que se estandarizó mecanismos de QoS (Calidad de Servicio).

En DOCSIS 1.1, se introdujeron flujos de servicio para proporcionar una mejor calidad de servicio (QoS). Los flujos de servicio permiten que diferentes tipos de tráfico, como voz, datos y video, se transmitan en diferentes flujos en el mismo cable módem, lo que permite una mejor clasificación y priorización de los paquetes. Incluyó mejoras significativas en la QoS, como la capacidad de priorizar el tráfico de voz y video y la implementación de técnicas de gestión de ancho de banda. Esto permitió a los proveedores de servicios de Internet por cable ofrecer servicios de voz y video de mayor calidad y más fiables a través de la red DOCSIS. [12].

Para proporcionar QoS, los paquetes que atraviesan la interfaz MAC se clasifican de acuerdo con los parámetros definidos para cada flujo de servicio. Tanto el CMTS como el CM conforman, controlan y priorizan el tráfico de paquetes para garantizar que los servicios en tiempo real, como la voz y el video, reciban la prioridad adecuada en la red DOCSIS. [12].

1.4.5 DOCSIS 2.0

DOCSIS 2.0 se lanzó en 2001 y se centró en mejorar la velocidad de los datos de transmisión ascendentes y en añadir soporte para la telefonía IP. DOCSIS 2.0 mejoró significativamente la velocidad de los datos de transmisión ascendentes, permitiendo velocidades de hasta 30 Mbps, lo que permitió a los proveedores de servicios de Internet por cable ofrecer servicios de Internet más rápidos a sus clientes. [12].

En cuanto a la telefonía IP, DOCSIS 2.0 añadió soporte para la tecnología *PacketCable*, que permitió a los proveedores de servicios de cable ofrecer servicios de telefonía por Internet (VoIP) a través de la red DOCSIS. Esto permitió a los proveedores de servicios de cable ofrecer servicios "*triple play*" (voz, datos y video) a sus clientes, lo que les permitió competir con los



proveedores de servicios de telecomunicaciones tradicionales que ofrecían servicios similares. [12].

Además, DOCSIS 2.0 también mejoró la calidad de servicio (QoS) para la telefonía IP, permitiendo una gestión más eficaz del ancho de banda y una mejor priorización de los paquetes de voz en la red DOCSIS. En general, DOCSIS 2.0 fue un paso importante en la evolución de la tecnología DOCSIS y permitió a los proveedores de servicios de Internet por cable ofrecer servicios de alta velocidad y de alta calidad a sus clientes. [12]

en DOCSIS 2.0, los CM y CMTS pueden coexistir con otros servicios de la red de cable. Además, las primeras versiones de DOCSIS tenían problemas para operar con estándares modificados debido a que los CM no tenían ciertas funcionalidades. Esto significaba que los proveedores de servicios de Internet por cable a menudo tenían que actualizar tanto los CM como los CMTS para asegurarse de que funcionasen de manera correcta. [52]

Sin embargo, en DOCSIS 2.0 se mejoró la compatibilidad hacia atrás, lo que significa que los CM DOCSIS 2.0 son compatibles con los CMTS de revisiones anteriores. Esto permitió a los proveedores de servicios de cable actualizar gradualmente sus redes a DOCSIS 2.0 sin tener que actualizar todos los CM y CMTS al mismo tiempo. Como resultado, DOCSIS 2.0 se adoptó rápidamente y se convirtió en una parte integral de las redes de cable modernas. [52]

1.4.6 DOCSIS 3.0

Con la aparición de DOCSIS 3.0 en agosto de 2006, se logró una mejora significativa en la capacidad de la red de cable para ofrecer servicios de alta velocidad y gran ancho de banda para servicios de televisión por cable, internet y VoIP.

DOCSIS 3.0 utilizó una nueva técnica de modulación llamada Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) y una nueva técnica de multiplexación llamada Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*), lo que permitió alcanzar velocidades de datos mucho más altas en ambas direcciones, ascendente y descendente. Además, DOCSIS 3.0 también introdujo soporte para el protocolo IPv6, lo que permitió que la red de cable se adaptara mejor al creciente número de dispositivos conectados a Internet. Con DOCSIS 3.0, la velocidad máxima teórica de datos en la dirección descendente es de hasta 1 Gbps y en la dirección ascendente es de hasta 200 Mbps. [52]

En resumen, DOCSIS 3.0 proporcionó una mayor eficiencia en el espectro de frecuencias y una mayor velocidad de datos para los servicios de televisión por cable, internet y voz sobre IP, lo que permitió a los proveedores de servicios de cable ofrecer mejores servicios a sus clientes y mantenerse al día con las crecientes demandas de ancho de banda en la era digital. tiene varias ventajas sobre las versiones anteriores, incluyendo:



- Mayor capacidad de transmisión: DOCSIS 3.0 permite la unión de múltiples canales de 6 MHz, lo que aumenta significativamente la capacidad de transmisión de datos y permite velocidades más altas *Upstream* y *Downstream*.
- Arquitectura escalable y flexible: DOCSIS 3.0 presenta una arquitectura de cabecera escalable y flexible con CMTS modular, lo que permite a los proveedores de servicios de cable agregar capacidad y servicios de manera más eficiente y rentable.
- Seguridad: DOCSIS 3.0 cuenta con mejoras significativas en la seguridad, incluyendo el estándar de encriptación avanzada (AES, *Advanced Encryption Standard*) de 128 bits y autenticación de clave pública.
- Capacidad para servicios convergentes: DOCSIS 3.0 puede manejar una variedad de servicios convergentes, incluyendo voz, video y datos, en una sola red.
- Soporte para IPv6: DOCSIS 3.0 incluye soporte para el protocolo de Internet IPv6, lo que permite una mayor cantidad de direcciones IP y una mejor integración con otros dispositivos y redes.
- Multidifusión IP: DOCSIS 3.0 también admite la multidifusión IP, lo que permite la transmisión de contenido de video en tiempo real y aplicaciones IPTV de manera más eficiente y rentable. [51]

En general, DOCSIS 3.0 proporcionó una plataforma de red más eficiente, escalable y segura para los proveedores de servicios de cable, lo que permitió ofrecer servicios de mayor calidad y más avanzados a sus clientes.

1.4.7 DOCSIS 3.1

La actualización DOCSIS 3.1, que se dio a conocer en octubre de 2013, introdujo mejoras significativas en el rendimiento de la red HFC. Con DOCSIS 3.1 se logró un gran avance en cuanto a la velocidad de transmisión de datos, permitiendo una velocidad de descarga de hasta 10 Gbps y una velocidad de carga de hasta 2.5 Gbps, lo cual es una mejora significativa en comparación con las versiones anteriores del estándar.

Para lograr estas velocidades, DOCSIS 3.1 utiliza técnicas de modulación más avanzadas, como OFDM y QAM altamente complejas, que permiten transmitir más datos en el mismo ancho de banda de la red. Además, se aumentó el ancho de banda de la red, lo cual también contribuyó a mejorar el rendimiento. Otra característica importante de DOCSIS 3.1 es el soporte para la tecnología de subportadoras de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), que permite utilizar múltiples subportadoras en la misma frecuencia para transmitir datos de manera más eficiente y con mayor calidad de señal.



Además, DOCSIS 3.1 incluye características de ahorro de energía, lo que significa que los dispositivos pueden ajustar automáticamente la potencia de transmisión para reducir el consumo de energía cuando la demanda de datos es baja.

También se desarrolló un algoritmo que reducía el “*bufferbloat*”, un problema que puede ocurrir en redes de alta velocidad cuando los paquetes se acumulan en los buffers de los dispositivos de red, lo que puede causar retrasos y otros problemas de rendimiento.

DOCSIS 3.1, es la variante que ha tratado de ponerse a la altura de lo que actualmente necesitan las redes de comunicaciones, da un salto considerable con relación a las anteriores. En esta variante se incorporan cambios sustanciales que difieren completamente de lo que se había implementado hasta el momento, en resumen, DOCSIS 3.1 representa un importante avance en la capacidad y el rendimiento de las redes HFC, lo que permite a los proveedores de servicios ofrecer velocidades de conexión más rápidas y servicios avanzados como la transmisión de video 4K y la realidad virtual. [12]

1.5. DOCSIS 4.0 Next Generation HFC.

DOCSIS 4.0, también conocido como *Next Generation HFC*, es la última versión del estándar DOCSIS para redes de cable. Introduce nuevas tecnologías y mejoras significativas en comparación con las versiones anteriores de DOCSIS.

Una de las principales características de DOCSIS 4.0 es la Arquitectura de acceso distribuido (DAA, *Distributed Access Architecture*), que reemplaza la arquitectura de acceso centralizado utilizada en versiones anteriores de DOCSIS. Con DAA, los nodos ópticos se colocan más cerca del cliente final, lo que reduce la cantidad de señales que deben viajar por el cable coaxial y mejora la calidad de la señal. Esto también permite una mejor capacidad de servicio y flexibilidad en la implementación de nuevas tecnologías.

Otra característica importante de DOCSIS 4.0 es el Nodo + 0, que significa que no hay amplificadores entre el nodo y la casa del cliente. Esto elimina la necesidad de amplificadores intermedios, lo que mejora la eficiencia energética y reduce la interferencia en la señal.

DOCSIS 4.0 también introduce dúplex completo DOCSIS (FDD, *Full Duplex DOCSIS*), que permite la transmisión de datos en ambos sentidos simultáneamente, mejorando significativamente la capacidad de la red. Además, el estándar utiliza DOCSIS de espectro extendido (ESD, *Extended Spectrum DOCSIS*) lo que permite el uso de frecuencias más altas para aumentar la capacidad de la red.

En resumen, DOCSIS 4.0 es una actualización importante que introduce nuevas tecnologías y mejoras significativas en la red de cable, como la arquitectura de acceso distribuido, Nodo + 0, FDD y ESD. Estas mejoras permiten una mayor



capacidad y flexibilidad en la implementación de nuevos servicios y tecnologías en la red.[15]

1.5.1 Nodo + 0

Con la implementación de Nodo + 0, se pueden alcanzar velocidades de descarga y carga de datos de hasta 10 Gbps en la red HFC, lo que permite soportar aplicaciones de alta demanda, como la realidad virtual, el *streaming* de video 4K y 8K, la telemedicina y la automatización industrial.

Además, la arquitectura de Nodo + 0 permite una mayor flexibilidad en el diseño de la red, ya que los nodos ópticos ya no son necesarios, lo que simplifica la topología de la red y reduce los costos de infraestructura. La implementación de Nodo + 0 también permite la integración con tecnologías de redes móviles, como 5G, para ofrecer servicios convergentes a través de una única red.

Para lograr velocidades significativamente más altas en redes de telecomunicaciones, se requiere la reducción del tamaño de los grupos de servicio. En particular, si se tiene un nodo de 500 hogares, se necesitaría reducir el tamaño del grupo de servicio a un número similar a los de PON (redes ópticas pasivas), es decir, de 32, 64 o 128 hogares. Esto se debe a que los nodos más grandes, como el de 500 hogares, requieren una gran cantidad de recursos para proporcionar una velocidad de conexión adecuada a todos los usuarios. (Figura 1.4) Además, las implementaciones de laboratorio actuales de FDD requieren Node + 0. [15] La figura 1.4, muestra la arquitectura del Node + 0, implementada en NG-HFC.

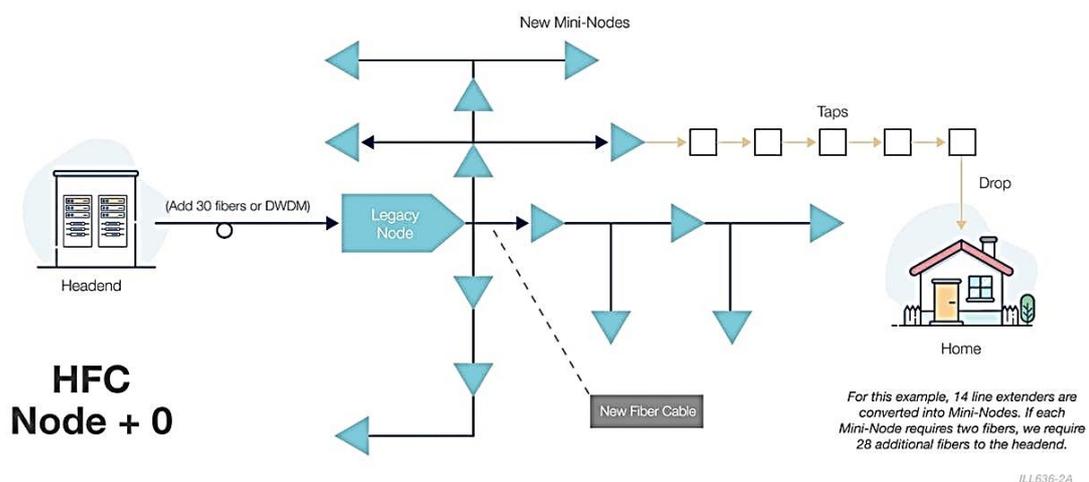


Figura 1.4, Node +0. [15]

1.5.2 Arquitectura de Acceso Distribuido.

La arquitectura de acceso distribuido es una solución que se utiliza para mejorar el rendimiento y la capacidad de la red de acceso de los operadores de servicios



de cable. En la arquitectura tradicional, la mayoría de los equipos de cabecera se encuentran en la cabecera del operador de servicios de cable, lo que limita la capacidad de la red y requiere una gran cantidad de espacio y energía en la cabecera.

Con DAA, la mayoría de los equipos de cabecera se colocan en el campo, lo que libera espacio y energía en la cabecera para otros fines. La capa física remota (PHY remota) y el control de acceso a medios remotos (MAC-PHY remota) son los componentes clave de DAA. Estos componentes permiten que la mayoría de las funciones de procesamiento de señal se realicen en el campo, en lugar de en la cabecera.

DAA tiene varias ventajas sobre la arquitectura tradicional. En primer lugar, permite que los operadores de servicios de cable amplíen su red de acceso para admitir nuevos nodos, como el Nodo + 0, que requieren un mayor rendimiento y capacidad. En segundo lugar, reduce la necesidad de espacio y energía en la cabecera, lo que puede reducir los costos operativos y de capital de los operadores de servicios de cable. Finalmente, mejora la capacidad de la red de acceso al reducir la cantidad de equipos de cabecera que deben ser transportados a través de la red.[15]

1.5.3 Combinando DAA y *Node* + 0.

Combinar DAA y *Node* + 0 permite una mejor utilización del espectro de frecuencia disponible en la red de cable, lo que se traduce en una mayor capacidad de transmisión de datos. Al reducir el número de amplificadores necesarios en la red, se reduce la interferencia y se mejora la calidad de la señal. Además, con el *Nodo* + 0, se reduce el número de hogares que comparten el mismo nodo, lo que también reduce la interferencia y mejora la calidad de la señal.

En conjunto, estas tecnologías permiten el uso de modulaciones de orden superior, lo que significa que se pueden transmitir más datos por unidad de tiempo, lo que aumenta la capacidad de la red. Además, la combinación de DAA y *Node* + 0 permite una arquitectura más escalable, lo que significa que es posible agregar más nodos a la red a medida que aumenta la demanda de ancho de banda. [15]

1.6 ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS REDES DE FIBRA ÓPTICA

La creciente demanda de servicios que requieren mayor capacidad y calidad, como la transmisión de datos de alta velocidad y la conexión a internet de alta velocidad, ha llevado a la fibra óptica a convertirse en una herramienta fundamental en las redes de telecomunicaciones actuales. La fibra óptica es un medio de transmisión de datos que utiliza luz para transmitir información a través de un cable. Este medio de transmisión proporciona una mayor velocidad de transmisión, una menor interferencia y una mayor seguridad en comparación con



los medios de transmisión convencionales.

Una de las características clave de la fibra óptica es su capacidad para transmitir datos a larga distancia sin pérdida de calidad. Los cables de fibra óptica están diseñados para ser altamente resistentes a las interferencias electromagnéticas, lo que permite una transmisión de datos más fiable y de mayor calidad. Además, la fibra óptica es más segura que otros medios de transmisión, ya que es difícil de interceptar y es resistente a la interferencia de señales externas.

En cuanto a las arquitecturas de red, la fibra óptica se puede utilizar en una variedad de configuraciones, desde redes de área local hasta redes de área amplia. En una red de área local, la fibra óptica se utiliza para interconectar dispositivos dentro de un edificio o campus. En una red de área amplia, la fibra óptica se utiliza para interconectar dispositivos en diferentes ubicaciones geográficas, como ciudades o países.

Además, la fibra óptica se utiliza en una variedad de aplicaciones, como la telefonía, la transmisión de datos, la televisión por cable y la conexión a internet de alta velocidad. En el campo de la medicina, la fibra óptica se utiliza para transmitir imágenes y señales en procedimientos quirúrgicos y diagnósticos.

En resumen, la fibra óptica es una herramienta fundamental en las redes de telecomunicaciones actuales debido a su capacidad para proporcionar una mayor velocidad de transmisión, una menor interferencia y una mayor seguridad en comparación con los medios de transmisión convencionales. Además, la fibra óptica se puede utilizar en una variedad de arquitecturas de red y aplicaciones, lo que la convierte en una solución versátil para las demandas de los usuarios de telecomunicaciones. Así mismo, las diferentes arquitecturas de red que se pueden implementar con fibra óptica permiten adaptarse a las necesidades específicas de cada servicio.

Aspectos como las características de la fibra óptica, arquitecturas de red, entre otros, serán desarrollados en la siguiente sección.

1.6.1 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica se define como un medio de transmisión que consiste en filamentos de vidrio que actúan como guía de ondas. A través de estas fibras, es posible transmitir pulsos de luz a largas distancias mediante la refracción de la luz en el material del núcleo de la fibra. Esta propiedad se conoce como refracción total y permite que la luz se propague a través de la fibra sin pérdida de señal, lo que la convierte en una tecnología de transmisión muy eficiente y confiable para comunicaciones de larga distancia. [9]

El principio de funcionamiento de la fibra óptica se basa en la ley de Snell de la refracción, que establece que la dirección de la luz se modifica al pasar de un medio a otro de diferente índice de refracción. En el caso de la fibra óptica, el núcleo tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento, lo que permite



que los pulsos de luz se propaguen por su interior mediante reflexiones internas totales.

Cuando un pulso de luz entra en el núcleo de la fibra óptica, se refracta hacia el centro de la fibra, lo que provoca que se desplace a lo largo de la misma. A medida que el pulso se desplaza, se refleja internamente en las paredes del núcleo, evitando que la luz se escape al revestimiento. De esta manera, la información contenida en el pulso de luz se transmite a largas distancias sin pérdida de calidad.

Además de su capacidad para transmitir señales a largas distancias sin pérdidas, la fibra óptica ofrece otras ventajas importantes en comparación con otros medios de transmisión como el cobre. Por ejemplo, la fibra óptica es inmune a las interferencias electromagnéticas y a las descargas atmosféricas, lo que significa que puede ser utilizada en entornos en los que otros medios de transmisión podrían sufrir interferencias.

En cuanto a las arquitecturas de red, la fibra óptica puede ser utilizada en diferentes topologías, como en anillo, estrella, o en malla. Cada una de estas topologías tiene sus propias ventajas y desventajas, y su elección depende del tamaño y la complejidad de la red, así como de las necesidades específicas de la aplicación.

Dentro de las ventajas de la fibra óptica frente a otros medios de transmisión se puede encontrar:

- Mayores tasas de transmisión
- El ancho de banda es mayor frente a otros sistemas
- Mayor inmunidad frente al ruido exterior y otros sistemas
- Posibilidad de alcanzar largas distancias sin pérdidas considerables
- Mayor seguridad en la transferencia de la información

Por otro lado, dentro de las desventajas de la fibra óptica se puede encontrar con:

- Mayor costo que otros medios de transmisión convencionales
- Requiere de elementos especiales para su interconexión y empalmes
- Personal capacitado en manejo de fibra óptica
- Mayor costo de instalación que otros medios de transmisión

1.6.1 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

De acuerdo con el modo de propagación existen dos tipos de fibra óptica, las cuales se detalla a continuación:

- **Fibra óptica monomodo:** Es la que actualmente se encuentra mayormente desplegada por parte de los operadores de servicios ya que esta ofrece mayor capacidad para el transporte de la información teniendo una banda de paso del orden de los 100GHz/km, puede alcanzar a llegar a los 40Km sin sufrir una degradación considerable en la señal. Dispone de un solo modo de propagación y varias longitudes de onda de luz propagándose a través del núcleo de la fibra.

Se puede decir que es esta fibra puede llegar a tener una atenuación promedio de 0,3 y 0,5 dB/Km, esta fibra alcanza un diámetro en el núcleo de entre 5 a 9 micrones y tiene un revestimiento de 125 micrones de diámetro, como se muestra en la figura 1.5, por lo cual alcanza una menor dispersión modal, principalmente es empleada para grandes distancias y se usa una fuente de luz láser en el transmisor. [10]



Figura 1.5, Fibra tipo Monomodo[9]

- **Fibra óptica multimodo:** en esta fibra óptica el haz de luz puede circular a través de múltiples caminos, es empleada principalmente en distancias cortas debido a que permite alcanzar distancias de hasta 2 km sin presentar pérdidas considerables. Se utiliza un diodo láser de baja intensidad como fuente de luz, como características principales de esta figura es que cuenta con un revestimiento de vidrio de 125 micrones de diámetro y en el núcleo de la fibra alrededor de 50 y 62.5 micrones, el núcleo de esta fibra posee un mayor índice de refracción, pero de la misma magnitud que la del revestimiento, como se muestra en la Figura 1.6; finalmente existen dos tipos de fibra óptica multimodo las cuales son de índice escalonado (alta dispersión modal) y de índice gradual (menor dispersión modal), al hablar de dispersión modal se refiere al fenómeno que afecta esta clase de fibras debido a la manera como viajan los rayos de luz, produciendo un retardo en la transmisión lo cual reduce el ancho de banda o distancia de la transmisión[10].

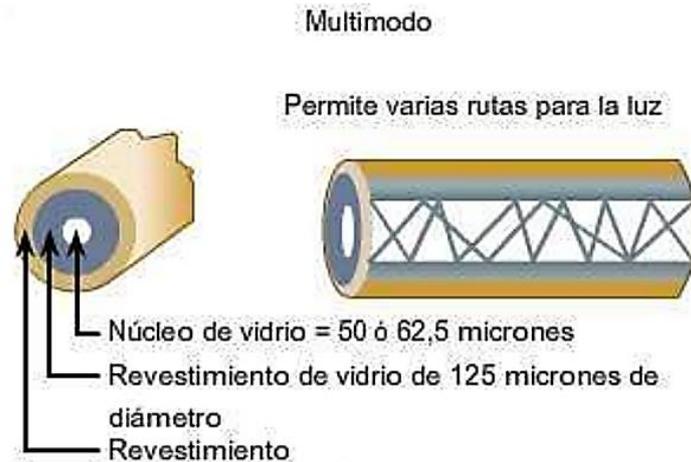


Figura 1.6, Tipo de fibra Multimodo. [9]

1.7 REDES FTTx.

Estas redes, consideradas de alta velocidad, son capaces de transmitir grandes cantidades de datos e información a muy altas velocidades, hasta un punto cercano al usuario final. La familia FTTx comprende un conjunto de tecnologías basadas en el transporte de señales digitales a través de fibras ópticas como medio de transmisión.

Diferentes niveles de cobertura, dependiendo de la proximidad de la fibra al usuario final, como se muestra en la figura 1.7, dan como resultado reducciones más o menos significativas en estos sistemas de racks. Todas las redes FTTx admiten configuraciones de red lógica de árbol, estrella, bus y anillo, todas capaces de utilizar componentes activos según la ubicación del usuario final o del cliente. [16]

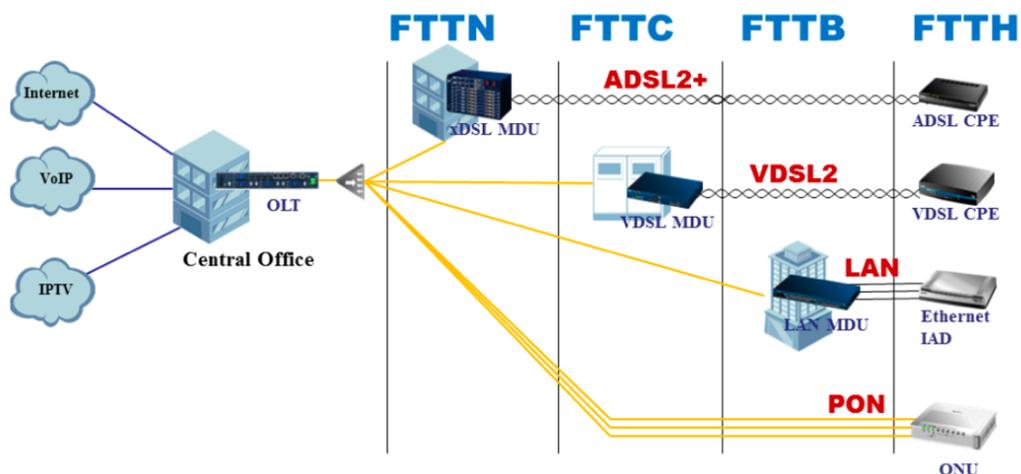


Figura 1.7, Esquema de diferentes arquitecturas FTTx [21]

Las redes FTTx se puede clasificar en:

1.7.1 FTTH.

Es la traducción de fibra hasta el hogar (FTTH, *Fiber-to-The-Home*), técnica enmarcada dentro de la tecnología FTTx y se basa en emplear líneas de fibra hasta el domicilio del usuario, actualmente es muy utilizada este tipo de arquitectura para la prestación de servicios de *Triple Play* (Internet de banda ancha, televisión y telefonía) en operadores de telecomunicaciones. [21] La figura 1.8, muestra de manera gráfica la configuración del sistema FTTH.



Figura 1.8, Ilustración de fibra óptica hasta el hogar [54]

1.7.2 FTTB

Se traduce como fibra hasta el edificio (FTTB, *Fiber-to-the-Building*) o también comúnmente llamada fibra hasta el sótano, aplica para espacios en los cuales conviven múltiples espacios de trabajo, la señal de fibra óptica que llega hasta el edificio es transmitida por medio de otros sistemas no ópticos tales como el par trenzado cable coaxial, conexión inalámbrica, entre otros[21].

1.7.3 FTTN

Fibra hasta el nodo (FTTN, *Fiber-to-the-Node*), denominado también fibra hasta el barrio o hasta el armario(FTTC), en esta arquitectura la fibra óptica es desplegada hasta un gabinete ubicado en medio de un sector poblado donde la señal es distribuida a través de cable coaxial o par trenzado, generalmente el área de servicio de un gabinete puede llegar en promedio a los 1.500m de radio y puede suministrar el servicio a cientos de clientes[21].

1.7.4 FTTH

La red de fibra óptica pura que llega al interior de la casa está formada íntegramente por fibra, por eso se denominan *Fiber To The Home* (FTTH). La fibra llega a la oficina del proveedor directamente en la casa del abonado, donde se encuentra la ONT, lo que permite la entrega de servicios de banda ancha y tecnologías avanzadas como telefonía, Internet y televisión. Las ventajas del uso de un medio de transmisión como la fibra es que presenta óptimas características de desplazamiento durante la multiplexación de datos, lo que da como resultado enlaces de varios kilómetros de longitud sin que se provoque pérdida de señal. [9]

1.7.5 ARQUITECTURA GENERAL DE UNA RED FTTH.

Como se muestra en la figura 1.9, en la topología GPON, la fibra que sale del OLT se fragmenta en los *splitters* de primer nivel de la nueva red de fibra. Estas fibras luego se dividen en múltiples fibras en el segundo nivel y luego hasta que se alcanza el punto de conexión final, que es el ONT ubicado en el hogar o negocio del usuario [9].

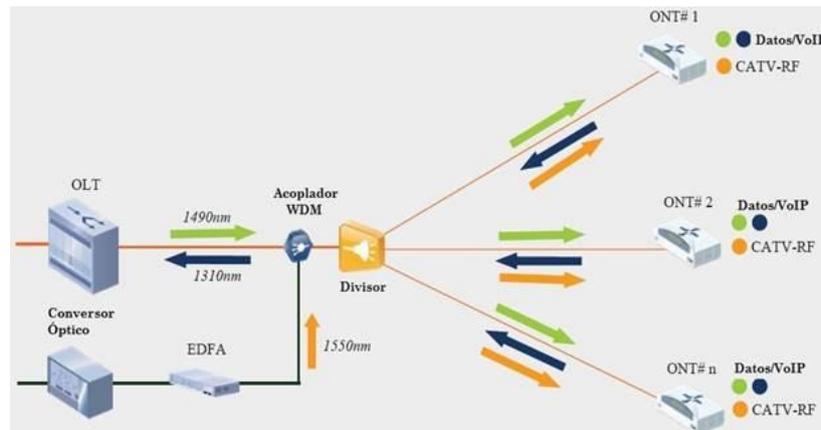


Figura 1.9, Esquema de red FTTH-GPON empleando un Amplificador de Fibra Dopado con Erblio (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier). [16]

1.8. FUNCIONAMIENTO GENÉRICO DE UNA RED PON

La red óptica pasiva (PON, *Passive Optical Network*) es una red de fibra óptica en la que los elementos de la red de distribución son completamente pasivos. La característica principal de esta red es que existen muchos servicios como tráfico de video, voz y datos a través de acceso por fibra; Con este tipo de sistema es posible eliminar todos los componentes activos que existen entre el servidor y el cliente, reemplazándolos con elementos ópticos pasivos para guiar el tráfico a través de la red, en la cual el componente principal es el divisor óptico del dispositivo o *splitter*. [18]

La transmisión dentro de una red PON se realiza entre la Terminal de Línea Óptica (OLT, *Optical Line Termination*) y una Unidad de Red Óptica (ONU, *Optical Networ Unit*) comunicados a través del divisor en donde su función estará dada de acuerdo a si el canal es ascendente o descendente, la ONU recibe la señal óptica y realiza la conversión de la señal de óptica a eléctrica. [15]

1.8.1 Terminal de línea óptica – OLT.

La terminal de línea óptica es un dispositivo que permite conectar la troncal de fibra óptica, se ubica en las instalaciones del proveedor de servicios de internet (ISP, *Internet Service Provider*) en donde convierte, enmarca y transmite las señales para la red PON, también se encarga de coordinar la multiplexación de las ONT para la transmisión en el enlace ascendente.



La OLT permite controlar en ambos sentidos la transmisión de la información por medio de la red de distribución óptica, la cual puede llegar hasta los 20 km para el enlace ascendente manejando el diferente tráfico de datos y voz de múltiples usuarios, y para el enlace descendente tomando el tráfico de voz, datos y video de una red metro o una red de larga distancia [20].

1.8.2 Terminal de red óptica – ONT

La ONT también llamada ONU de acuerdo con el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), se refiere al equipo que está ubicado de cara al usuario, teniendo como tarea principal la conversión de las señales ópticas transmitidas a través de la fibra óptica. Estos dispositivos están en capacidad de preparar, agregar y enviar varios tipos de datos provenientes de los usuarios finales y enviarlos a través del canal ascendente. [20]

1.8.3 Splitter - Divisor Óptico.

Este es un elemento pasivo colocado a lo largo de la sección entre el OLT y el respectivo ONT al que está conectado. Se encargan de dividir la potencia óptica de la señal de manera balanceada por lo cual cada hilo de fibra que entra en el *splitter* puede dividirse en un número determinado de fibras a la salida. Además, hay dispositivos de distribución óptica bidireccionales, lo que significa que también son capaces de combinar potencias. [10] Existen algunos tipos de divisores ópticos desbalanceados que se encargan de realizar la división de potencia óptica de la señal ya que tiene una fibra de entrada y dos de salida, pero dividen la potencia de la señal de forma asimétrica. [10]

Dentro de las redes FTTH se pueden tener diferentes niveles de *splitting*, figura 1.10, usualmente los operadores optan por utilizar 2 niveles de *splitting*: se denomina *splitter* de primer nivel a aquel que permite 4 divisiones de la señal y un *splitter* de segundo nivel permitiendo generalmente 16 divisiones de la señal.

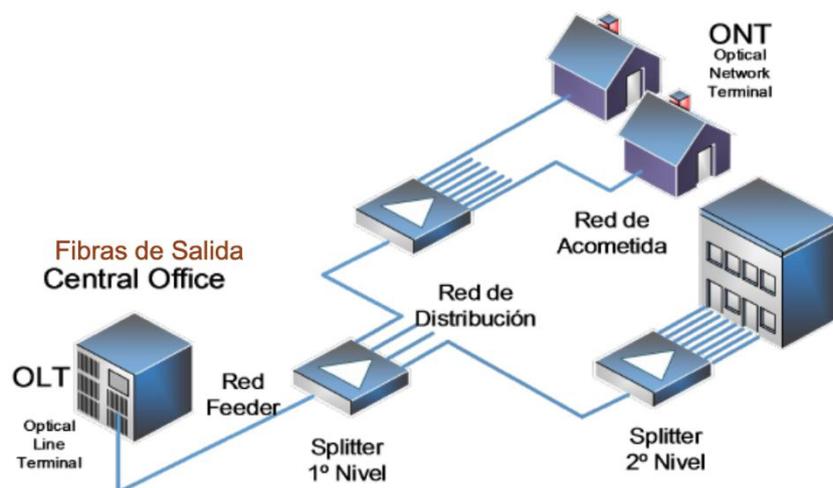


Figura 1.10, Modelo de despliegue de red más usado por operadores [10]

Un *splitter* posee distintas configuraciones de división: 1x2, 1x4, 1x8, 1x16, 1x32, 1x64, 1x28. Por lo cual se puede decir que por ejemplo para para un primer nivel de 1:4 y un segundo nivel de 1:8 existirá servicio para $2 \times 8 = 32$ usuarios finales. Igualmente para el caso de una configuración para el primer nivel de 1:4 y un segundo nivel de 1:16 existirá servicios hasta para $4 \times 16 = 64$ usuarios finales, la cual es la configuración más empelada en la actualidad por los operadores[10].

Existen dos tipos principales de *splitter* los cuales son el simétrico y desbalanceado. El *splitter* simétrico implica dividir el tráfico de manera equitativa entre varios enlaces de red. Esto significa que el tráfico se divide en partes iguales y se envía a través de cada enlace de manera equitativa. El *splitter* simétrico es adecuado para entornos de red en los que el tráfico de red es uniforme y predecible. También es útil cuando se requiere redundancia en la red. Por otro lado, el *splitter* desbalanceado implica dividir el tráfico de manera desigual entre varios enlaces de red. En este caso, el tráfico se divide en partes desiguales y se envía a través de cada enlace en proporciones diferentes. El *splitter* desbalanceado se utiliza comúnmente en entornos de red donde el tráfico de red es impredecible y variable. Este tipo de *splitter* permite un mejor uso de los enlaces de red y puede mejorar significativamente el rendimiento de la red[58].

De acuerdo con las técnicas de fabricación, los *splitters* utilizados en redes FTTH se pueden clasificar en dos tipos:

- **FTB (*Focused Biconical Taper*)**

Debido a que su fabricación y materiales empleados son de fácil acceso tienen un precio relativamente bajo, es adecuado en casos donde la configuración de división es asimétrica, admiten con relativa eficiencia tres longitudes de onda: 850nm, 1310nm y 1550nm, por lo cual limita los campos de aplicación en donde se requieren manejar diferentes longitudes de onda. La figura 1.11, muestra de mejor manera este tipo de Splitter.

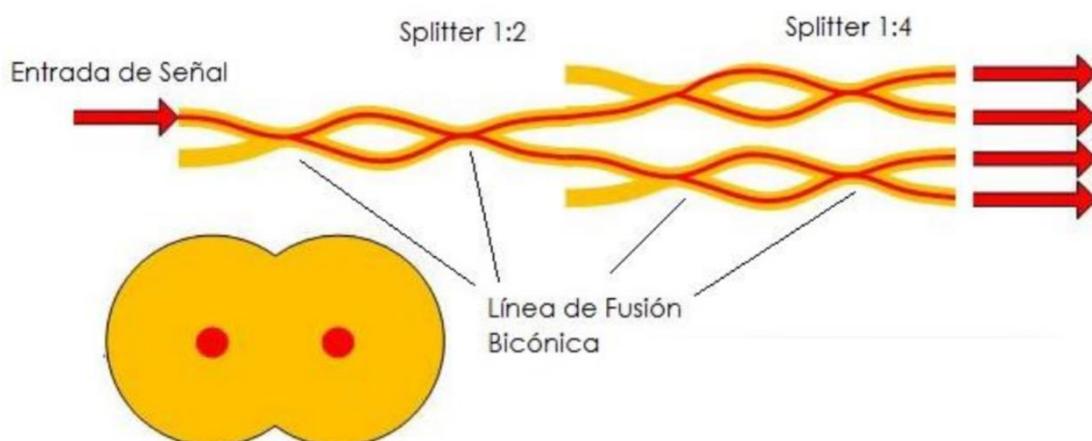


Figura 1.11, Esquema interno de un splitter tipo FBT (splitter 1:4) [11]



- **PLC (Planar Lightwave Circuit).**

La tecnología que emplea el *splitter* tipo PLC es más compleja, debido a que es un dispositivo de guía de ondas que utiliza las técnicas de producción de semiconductores (litografía), basado en sustratos de cuarzo, silicona y otros materiales que se utilizan para el acoplamiento de la señal y la división y conducción hacia las diferentes salidas. Cuenta con una baja sensibilidad a las longitudes de onda por lo que permite trabajar en un rango de frecuencias mayor a comparación de un *splitter* tipo FBT, y despliegan una mayor relación de división (1:64 o 1:128), como se presenta en la figura 1.12.

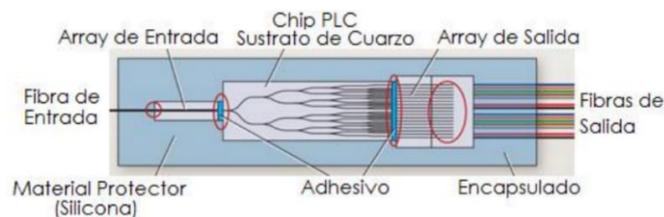


Figura 1.12, Esquema interna de un Splitter tipo PLC [11].

1.9 MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA (WDM).

La Multiplexación por División de Longitud de Onda, (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) es una técnica la cual consiste en multiplexar dos o más longitudes de onda por medio de un multiplexor el cual se encarga de combinar las señales y un demultiplexor el cual separa las señales a su respectiva longitud de onda original. WDM hace uso de portadoras en las distintas ventanas dentro del ancho de banda óptico disponible (1280 – 1620 (nm)), por medio de esta técnica se puede tener un mayor aprovechamiento de los anchos de bandas que ofrecidos por la fibra óptica[21].

A su vez WDM permite manejar para cada canal o portadora óptica diferentes protocolos, es decir que una portadora puede transportar Modo de Transferencia Asíncrono (ATM, *Asynchronous Transfer Mode*), Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH, *Plesiochronous Digital Hierarchy*), IP, SDH, entre otros.[21] A continuación, la figura 1.13 muestra el funcionamiento de WDM.

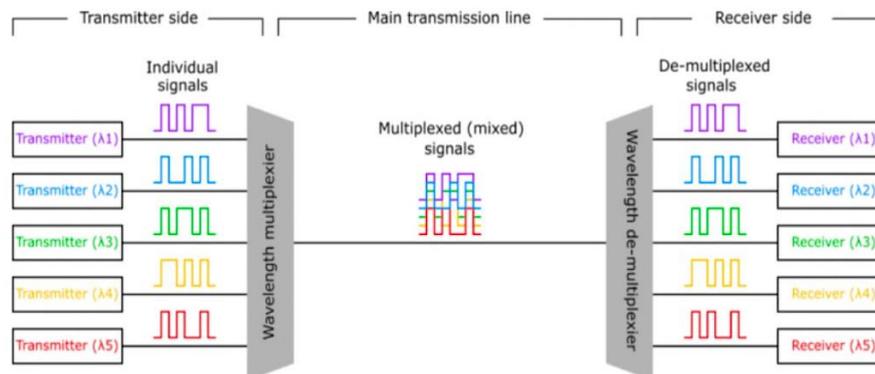


Figura 1.13, Ilustración funcionamiento de la técnica WDM[50]



CWDM permite alcanzar un máximo de 18 longitudes de ondas definida dentro del intervalo de 1270 nm a 1610 nm teniendo un espaciamento en frecuencia de 2.5THz (20nm), por lo que CWDM es capaz de usar filtros y transmisores de menor precio que DWDM, esta tecnología se puede encontrar ampliamente utilizada en el sector de algunas redes empresariales y redes metropolitanas de corta distancia (distancias menores a 80Km) y que no requieren de una alta tasa de transmisión de datos[21].

1.9.1 Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM)

La Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM, *Dense Wavelength División Multiplexing*), cuenta con capacidades y anchos de banda mayores a los de CWDM ya que esta tecnología permite transmitir información en diferentes longitudes de ondas a diferentes velocidades de datos a distancias mayores, dichas redes trabajan asignando lambdas en la ventana C y L de transmisión del espectro óptico, pueden tener 4 posibles espaciamentos, de 100GHz, 50GHz, 15GHz y 12.5GHz que se ajustan de acuerdo con los requerimientos de la red, pueden tener 40, 80 o 160 canales ópticos y pueden transmitir altas velocidades a largas distancias sin tener que disminuir el número de usuarios[21]. Una de las ventajas principales de las redes tipo DWDM es su fácil escalabilidad para soportar mayores anchos de banda al reemplazar solamente componentes terminales, de igual manera permite crear topologías virtuales de red en el dominio óptico sobre una topología que siempre es dependiente de la instalación de la fibra óptica.

1.10 DEGRADACIONES ÓPTICAS

Dentro de los sistemas de comunicaciones ópticas se encuentran presentes diferentes fenómenos que afectan el desempeño de la red viéndose afectada la velocidad de transmisión de los datos y las distancias a alcanzar, estos fenómenos causan degradación y modificaciones no deseadas en la señal original y se encuentran clasificados como efectos lineales y efectos no lineales, los efectos lineales o fenómenos que no tienen capacidad de crear nuevas componentes en frecuencias y a su vez se dividen en dos grupos los cuales son los efectos de pérdidas y dispersión, y por el otro lado los fenómenos no lineales que agregan nuevas componentes de frecuencia a la señal de entrada y ocurren debido a los efectos Scattering¹ y Kerr² [41].

1.10.1 Fenómenos Lineales.

Son afectaciones ópticas que están dadas en función de la potencia de transmisión y reducen el desempeño de las redes. La figura 1.14 representa la

¹ Efecto Scattering o también llamado efecto de reflexión difusa, es un proceso físico en donde algunas formas de radiación, como el sonido, luz o partículas en movimiento, son obligadas a desviarse desde una trayectoria recta por una o mas no uniformidades en el medio.

² Efecto Kerr, también llamado efecto electro-óptico cuadrático, es un cambio en el índice de refracción de un material en respuesta a un campo eléctrico aplicado.



clasificación de los efectos lineales presentes en los sistemas basados en fibras ópticas.

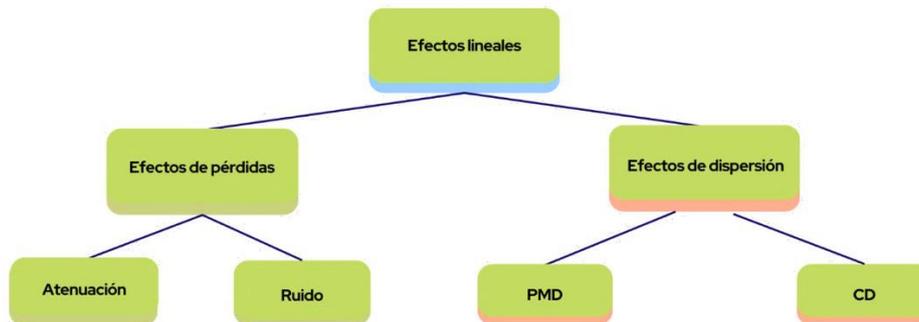


Figura 1.14, Clasificación de los efectos lineales, Adaptado de[41]

• **Efectos de pérdidas**

Al transmitir una señal a través de un hilo de fibra óptica la potencia de transmisión se ve disminuida debido a fenómenos como la dispersión Rayleigh³ y a las propiedades físicas innatas de la fibra óptica, la ecuación 1.1 representa la perdidas en función de la distancia:

$$(P_T = P_0 e^{(-\alpha L)}) , \text{ Ecuación 1.1}$$

Dónde:

- P_T : Potencia transmitida [w].
- P_0 : Potencia de la señal óptica en la entrada de la fibra [w].
- L : Longitud de la fibra [km].
- α : Constante de atenuación [np/km].

En la figura 1.15, se observa que las pérdidas dependen directamente de las longitudes de onda que son clasificadas en bandas de operación; O, E, S, C, L, U; que las mínimas pérdidas ocurren entre los rangos de 1530nm y 1565nm correspondiente a la banda C[42].

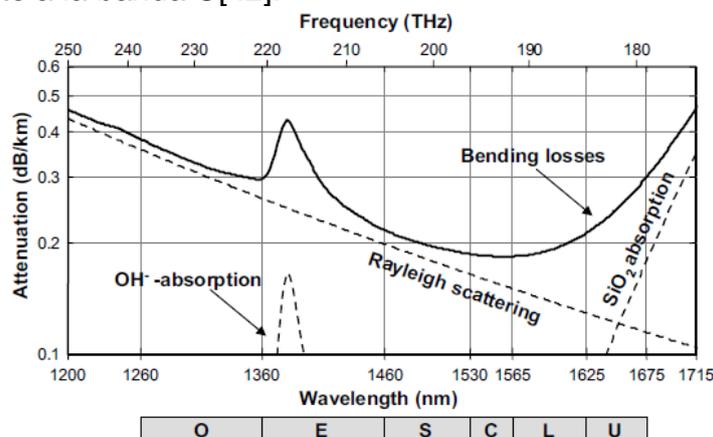


Figura 1.15, Atenuación de la fibra óptica en función de la frecuencia y longitud de onda [45].

³ Es un fenómeno que afecta en general a las ondas electromagnéticas, se refiere a la dispersión de la luz causada por las moléculas del aire.



La atenuación es definida como la pérdida de la potencia en la señal al pasar por un hilo de fibra óptica y define la distancia máxima que se puede alcanzar sin el uso de amplificadores o regeneradores ópticos para que el receptor óptico sea capaz de reconocer y procesar la señal transmitida, la atenuación se debe a fenómenos como la absorción, dispersión y los defectos en la fibra productos de su fabricación, la ecuación 1.2 define la atenuación en función de las potencias[43].

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}} \right), \text{ Ecuación (1.2)}$$

Dónde:

- A : Atenuación [dB].
- P_{sal} : Potencia de salida del cable [w].
- P_{ent} : Potencia de entrada del cable [w].

Con relación al ruido, la fibra óptica no es afectada por fuentes de ruido externo, puesto que la luz del entorno no puede adherirse a la fibra, pero se debe tener precaución con la luz externa que ingresa a través de los extremos en transmisión. Y recepción de la fibra óptica, por lo que se debe proveer de un revestimiento robusto en estos extremos para que la información que viaja a través de la fibra no se vea comprometida. [44]

• Efectos de dispersión

La dispersión está dada en unidades de $ps/(nm * Km)$ y se asocia directamente al ensanchamiento del pulso de información al propagarse por la fibra óptica, existen dos tipos de dispersión, por un la dispersión por modo de polarización PDM que implica un ensanchamiento en los pulsos de acuerdo a la longitud de onda[44].



Figura 1.16, Representación gráfica de la Polarización por modo de dispersión. [45]

A través de la figura 1.16 se puede observar que si dos modos de polarización viajan con diferentes velocidades y con distintos tiempos de llegada se producen ensanchamientos y distorsión de los pulsos ópticos que se transmiten por la fibra, lo cual genera un retardo de grupo diferencial, ocasionando que haya diferencias entre las señales y que al ser recombinadas existe un



ensanchamiento de la señal provocando interferencia intersimbólica ISI, haciendo que la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) sea mayor[44].

- **La dispersión cromática (CD)**

Hace referencia a la máxima dispersión que se puede tolerar en una distancia límite, es un fenómeno lineal que produce ensanchamiento de los pulsos transmitidos causando inconveniente en la calidad de los sistemas ópticos[41]. Es debido a que los pulsos de luz se componen de diferentes longitudes de onda que transitan por el medio de transmisión a distintas velocidades dando como resultado que lleguen con retardos al receptor haciendo que los pulsos se deformen y se ensanchen, cuando el retardo en los tiempo son demasiados altos se generará superposición entre símbolos generando errores de decodificación[41].

1.10.2 Efectos no lineales

Los fenómenos ópticos no lineales son aquellos que sus parámetros no dependen de la intensidad de la señal y aparecen cuando la velocidad de transmisión es mayor o igual a los 10 Gbps, se producen debido a los cambios en el índice de refracción del medio con referencia a la intensidad óptica de la señal (Efecto *Kerr*) y al efecto en la dispersión inelástica (*Scattering*) [46].

En la figura 1.17, se define la clasificación de los efectos no lineales en los sistemas de comunicaciones ópticos.

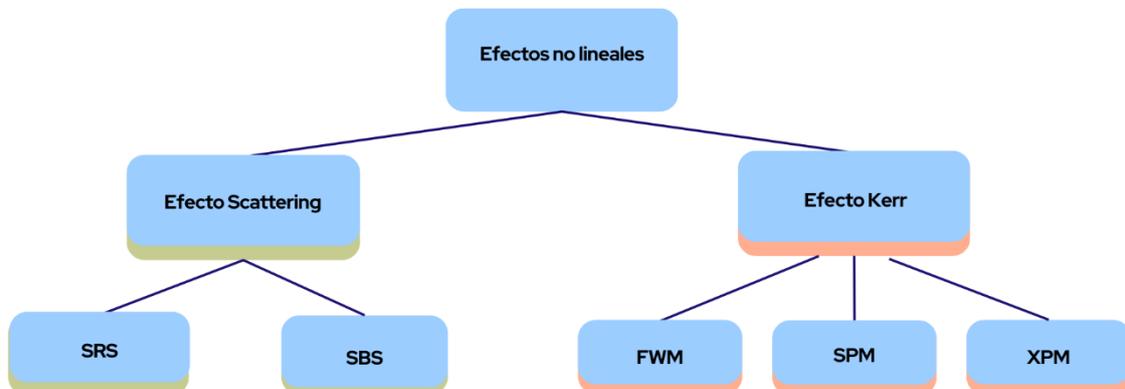


Figura 1.17, Clasificación de los efectos lineales, Adaptado de[41]

a) Efecto Scattering

Los efectos de dispersión inelástica, como la Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) y la Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*), pueden manifestarse dentro de la fibra óptica cuando la potencia de la señal es alta. En estas situaciones, se produce un crecimiento exponencial de la dispersión en la intensidad de la luz, lo que puede causar problemas en la transmisión de datos. El fenómeno de dispersión



RAMAN, en particular, provoca un traspaso de energía de canales con menor longitud de onda a canales con mayor longitud de onda.

Por otro lado el fenómeno SBS se manifiesta a niveles de potencia de entrada menores a los necesarios para que haya dispersión RAMAN, la SBS se presenta en la generación de onda cuya frecuencia es menor que la onda incidente.

b) Efecto Kerr

Este fenómeno se presenta por la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo aplicado, se manifiesta por medio de otros efectos como lo son; Mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four-Wave Mixing*), Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*) y Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*)[41].

b.1) Mezcla de Cuatro Ondas

Se da cuando dos o más señales ópticas de diferentes frecuencias centrales, se propagan al mismo tiempo sobre una fibra en un sistema basado en DWDM, provocando que las señales se mezclen y creando nuevos componentes en frecuencia.

b.2) Auto Modulación de Fase (SPM)

Es producida debido a que el índice de refracción de la fibra posee componentes que dependen de la intensidad de la señal, causando que dicho índice realice un desplazamiento de fase que cambia debido a que distintas partes del pulso tienen una intensidad distinta produciendo un Chirp⁴ ©, lo cual genera un ensanchamiento del pulso como se observa en la figura 1.19, la ventaja de este fenómeno es que puede ayudar a compensar la dispersión cromática ya que posee signo contrario al que se genera a raíz de la dispersión cromática [41].

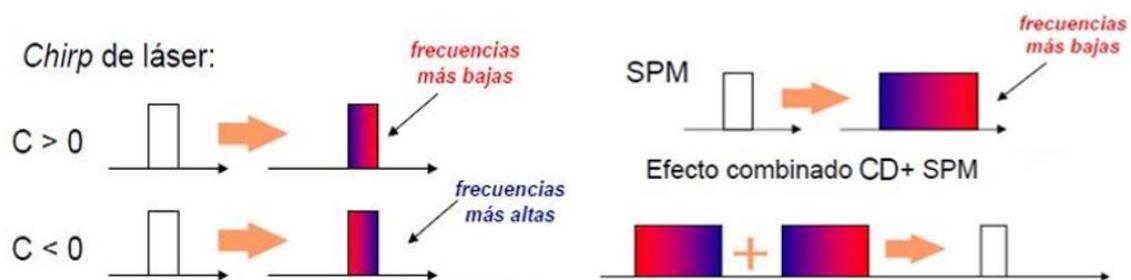


Figura 1.19, Efecto de la SPM sobre un pulso que se propaga[45].

b.3) Modulación de fase cruzada (XPM)

De igual manera como la SPM depende directamente del índice de refracción con la intensidad de la señal que atraviesa la fibra, la modulación de fase cruzada ocurre cuando los canales ópticos son transmitidos de manera simultánea a

⁴Chirp, hace referencia a una variación de la amplitud de la señal emitida por el laser.



través del canal de fibra, donde la potencia de una canal puede afectar la fase del otro canal generando un ensanchamiento de pulsos cruzados.

La modulación de fase cruzada es más desfavorable que SPM cuando existen dos pulsos de distinta longitud solapados en el tiempo. En XPM no hay traspaso de energía y siempre va acompañada de SPM. [41]

1.11 ASPECTOS GENERALES DE LAS REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Las redes ópticas elásticas denominada también (EON, *Elastic Optical Network*) o Redes Flexgrid, se definen en la literatura como una red de transporte óptico con la capacidad de adaptar los recursos de su espectro disponible a los requerimientos de ancho de banda que requiere un usuario. [22] Estas redes tienen como objetivo principal optimizar el uso de los recursos de la red adaptándose dinámicamente a los requerimientos de los usuarios según su demanda de ancho de banda. Por ejemplo, si un servicio requiere recursos para ser transmitido en un momento dado, se le asignará una cantidad de ancho de banda basada en su demanda, en lugar de asignarle todo el espectro óptico disponible en el canal, lo que resulta en un ahorro real de espectro óptico.

1.12 REDES DE GRILLA FLEXIBLE Ó *ELASTIC OPTICAL NETWORKS*.

Aunque las redes tradicionales más empleadas hoy en día y que se basan en WDM han permitido aprovechar de manera significativa el espectro óptico para las conexiones de gran capacidad, no se garantiza que existe un uso más eficiente de éste debido a que la naturaleza propia de las redes WDM introduce cierto tipo de limitaciones en cuanto a la capacidad que tiene la red para ajustarse de manera dinámica a las demandas de recursos [23].

En la actualidad se han estudiado algunas técnicas que proponer solucionar este inconveniente de las redes ópticas tal es el caso de las redes ópticas elásticas o flexibles (Redes *Flexgrid*) las cuales destacan como una solución prometedera que permite hacer frente al uso más eficiente de los recursos espectrales para los que dispone la red.

Las redes EON ofrecen una mayor flexibilidad y permiten adaptarse a los parámetros de la red, como la distribución de longitudes de onda, anchos de banda, formatos de modulación, tasas de bits, entre otros. Esto permite una gestión más eficiente de los recursos y una mejor utilización de la capacidad de la red, lo que se traduce en una mejora en la calidad del servicio y en la reducción de los costos operativos de la red.

En resumen, las redes EON son una solución innovadora para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda y la necesidad de optimizar el uso de los recursos de la red. [23].

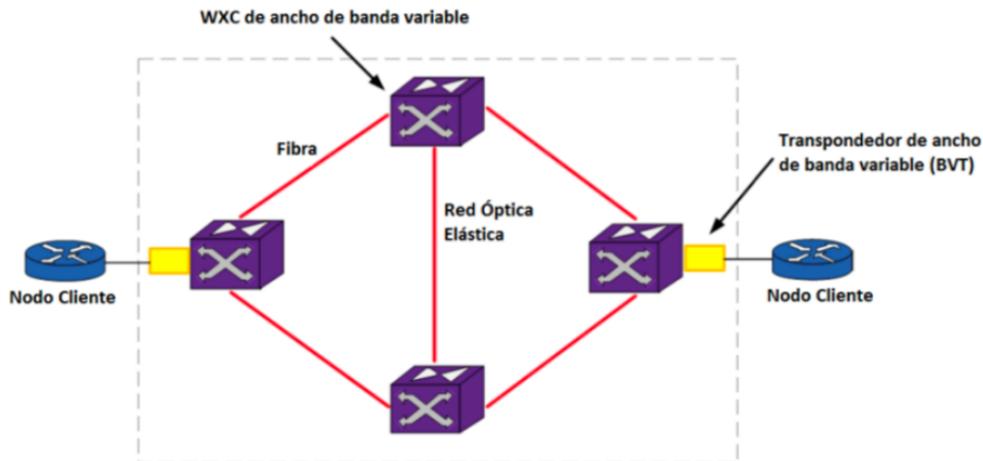


Figura 1.20, Modelo de arquitectura para una red óptica de rejilla flexible[21].

La figura 1.20 ilustra la arquitectura de una red óptica elástica está compuesta de conmutadores ópticos denominados (WXC, *Wavelength Crossconnect*) para la red central y transpondedores de ancho de banda variable (BVT, *Bandwidth Variable Transceivers*) en el borde de la red basados en multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [24][25]

1.12.1 Características de la rejilla de espectro flexible (*Flexgrid*)

Para las redes tipo EON se hace importante la sustitución de la rejilla de espectro fijo por una rejilla flexible, aunque las redes WDM convencionales utilizan una rejilla que ha sido especificada por la ITU-T en su recomendación G.694.1 de 2002 la cual especifica una rejilla de canales fijos con una separación de 100GHz, 50GHz y 25GHz, es por ello que la ITU-T ha trabajado en la revisión de una norma que permita una división flexible del espectro denominada (*Flexgrid*), de acuerdo con la figura 1.21 se puede observar el espectro óptico de la banda C (1530 – 1565 nanómetros) está dividido en pequeñas ranuras de 6,25GHz denominadas también (*Slices*), de tal forma que dos *slices* componen un slot de 12,5GHz al cual se le asigna una frecuencia central (CF, *Central Frequency*).

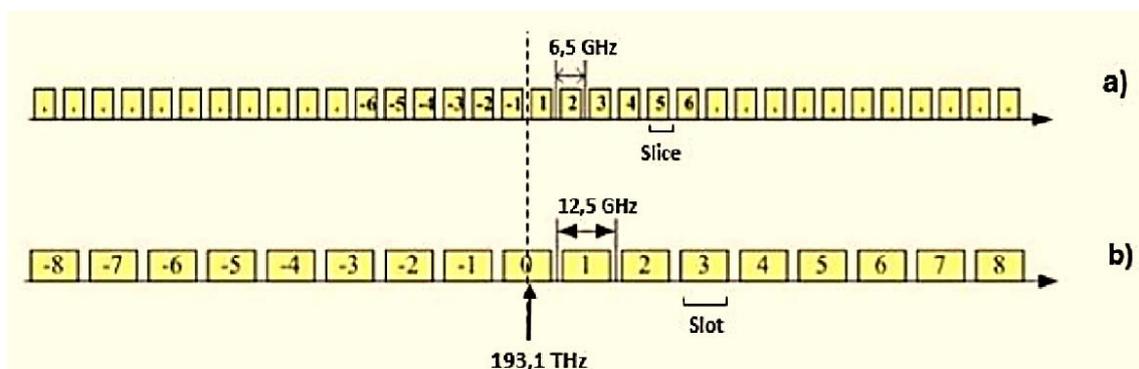


Figura 1.21, Ilustración rejilla flexible (a) conformación de slices (b) composición de slots [19].



1.13 CANAL DESCENDENTE O *DOWNSTREAM*

El canal descendente es la dirección de la información del operador OLT al ONT ubicado en el usuario final. En esta red, la PON actúa como una red punto a multipunto. La OLT consta de una serie de tramas compuestas de voz y datos transmitidas a la PON, a través de P-OLT (voz y datos) y V-OLT (video). Las tramas recopiladas por estos dispositivos se convierten en señales que se transmiten a diferentes ramas de usuarios. [19]

1.14 CANAL ASCENDENTE O *UPSTREAM*

El canal ascendente es la dirección de la información del ONT del usuario final al operador OLT. La red PON actúa como una transmisión de punto a punto, donde cada ONT consta de tramas de voz y datos adicionales de cada usuario que se redirigen a la OLT. En este punto, el ONT realiza la misma operación que el OLT en el canal descendente, es decir, convierte las tramas en una señal inyectada a través de las fibras ópticas específicas del usuario.[19]

1.15 SERVICIOS *QUAD PLAY*

Los servicios *Quad Play* son una oferta de telecomunicaciones que combina cuatro servicios en un paquete: telefonía fija, telefonía móvil, televisión y conexión a internet. Esto significa que un solo proveedor de servicios puede ofrecer todos estos servicios a un precio reducido en comparación con contratar cada servicio por separado.

El término "*Quad Play*" se originó a fines de la década de 2000 y se popularizó en los años 2010. En un principio, los servicios *Quad Play* se ofrecían solo en algunos países, pero hoy en día son comunes en muchos lugares del mundo.

El principal beneficio de los servicios *Quad Play* es que los clientes pueden disfrutar de una mayor conveniencia al tener todos sus servicios de telecomunicaciones en un solo paquete. Además, también pueden ahorrar dinero al combinar los servicios. Otra ventaja es la posible mejora en la calidad del servicio, ya que el proveedor de servicios tiene control sobre todos los componentes del paquete, lo que significa que puede optimizar la red para ofrecer una mejor experiencia al usuario. *Quadrupleplay* o "*Quad Play*" es el concepto de unir servicios de línea fija, móvil, entretenimiento e Internet de alta velocidad en una sola factura del mismo proveedor. [20]

- Telefonía fija: Voz y varios servicios adicionales, que incluyen identificación de llamada, conferencias, buzón de voz, entre muchos otros.
- Servicios móviles: teléfonos móviles, SMS, Internet, contenido móvil (juegos, *streaming* de música, videos, descargas de música, cuestionarios, etc).
- Internet de banda ancha: además del acceso a Internet, a menudo se incluyen correo electrónico y servicios de seguridad como antivirus.



- Televisión: lineal (tradicional), a demanda (OTT, *On The Top*) alquiler de vídeos, películas, etc[20].

En este capítulo se han presentado diferentes conceptos y consideraciones que son fundamentales para el trabajo de investigación desarrollado. Estos conceptos sirven de base para la construcción de los modelos de simulación que se emplearon en las herramientas para el modelado de escenarios que se describen en los capítulos posteriores del trabajo. Y que permitieron estudiar los efectos de los cambios en las variables del modelo, lo que puede ser muy útil para la toma de decisiones en situaciones reales.

En resumen, el conocimiento y la comprensión de los conceptos y consideraciones presentados en este capítulo son fundamentales para el desarrollo del trabajo de investigación. La posibilidad de modelar estos conceptos en entornos de simulación, permite un análisis detallado de los mismos y puede ser de gran ayuda en la toma de decisiones en situaciones reales.



CAPÍTULO II. METODOLOGÍA, ENTORNOS DE CO-SIMULACIÓN Y ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO

Este capítulo describe la metodología de trabajo que se siguió en la investigación y se detalla la metodología de simulación a implementar en el sistema de telecomunicaciones a estudiar. Para ello, se realizó el análisis de las herramientas software disponibles para el proceso y se seleccionará el entorno de simulación más adecuado en redes ópticas para llevar a cabo la investigación.

Además, se logra profundiza en algunos de los algoritmos empleados en la asignación de recursos en las redes ópticas elásticas, seleccionando aquel que podría ser más útil para el proceso de investigación en cuestión. Se busca caracterizar los algoritmos actuales para entender mejor su funcionamiento y su aplicabilidad en la investigación.

Una vez seleccionado el entorno de simulación y el algoritmo a utilizar, se establecerán los diferentes escenarios de red dentro del entorno de simulación. Estos escenarios se utilizarán para evaluar a nivel físico los parámetros de desempeño de *NG-HFC* en comparación con una red *FTTH* para la prestación de servicios *Quad Play*, tanto con asignación dinámica de espectro como sin ella.

La evaluación de estos parámetros permitirá determinar el desempeño y la eficiencia de *NG-HFC* en la prestación de servicios *Quad Play*, en comparación con una red *FTTH*. De esta manera, se podrán obtener resultados que permitan tomar decisiones acertadas sobre la implementación de *NG-HFC* en sistemas de telecomunicaciones.

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 Metodología de Desarrollo

Los sistemas de simulación son de gran importancia dentro del área de la investigación debido a que un previo estudio permite medir la eficacia de los sistemas de telecomunicaciones antes de su implementación en la vida real.

Como metodología para el desarrollo de este trabajo de grado se decidió implementar el modelo de cascada clásico, la cual es ampliamente usada en el sector del desarrollo de software y una de las metodologías más intuitivas y eficaces [13]. Gracias a este modelo se podrá trabajar en una serie de fases consecutivas tal como se ilustra en la figura 2.1.

Este modelo en cascada o modelo lineal comprende etapas claves como: Análisis de las especificaciones y requerimientos, Diseño del software, Codificación y pruebas, Entrega y mantenimiento, lo cual permite avanzar de



manera progresiva y organizada con el objetivo de garantizar el éxito del proyecto.

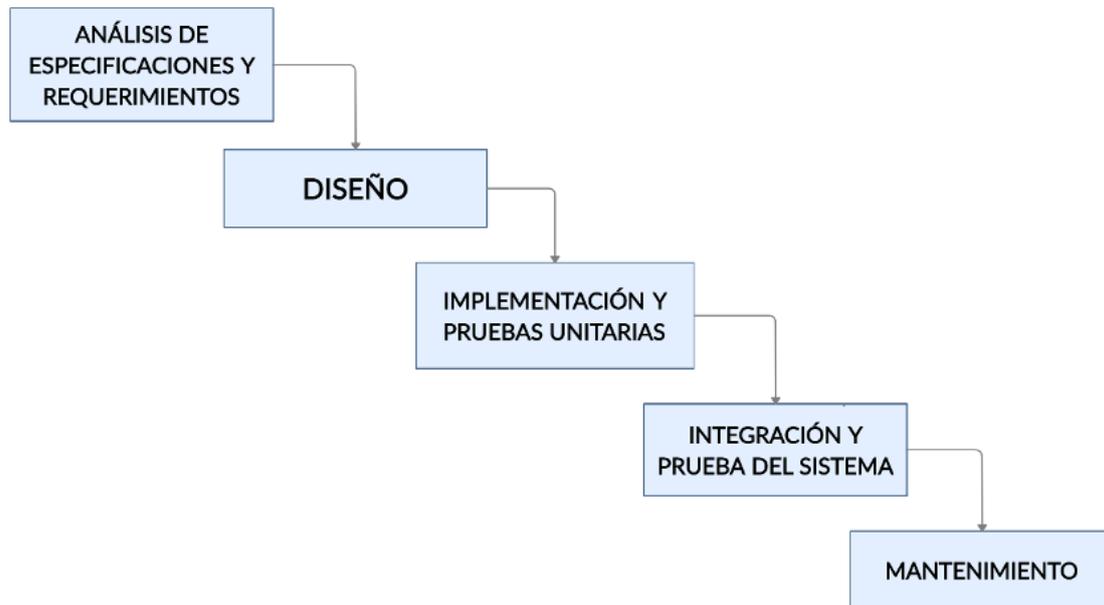


Figura 2.1, Modelo lineal o cascada clásico

1. Fase de análisis de especificaciones y requerimientos:
 - 1.1 A través de esta fase se busca realizar la identificación de toda la información disponible del problema, es decir, “¿el qué?”.
2. Fase de diseño:
 - 2.1 En esta fase se realiza la identificación sobre cómo dar solución al problema por medio de diferentes técnicas o herramientas software.
3. Fase de implementación y pruebas unitarias:
 - 3.1 En esta fase se hace todo el desarrollo del código sobre el requerimiento específico.
4. Fase de Integración y pruebas del sistema.
 - 4.1 Esta fase tiene como objetivo ejecutar las respectivas pruebas y tener una buena interpretación sobre el análisis del desarrollo ejecutado.
5. Fase de mantenimiento:
 - 5.1 Finalmente, en esta fase se hace la determinada corrección de errores o bugs que el sistema pueda llegar a tener durante su tiempo de uso.



2.1.2 Metodología de simulación

Para desarrollar el proceso de simulación de los sistemas previamente descritos a un entorno virtual se hará uso de la metodología de simulación con enfoque práctico [14] el cual permite el desarrollo del modelo simplificado de los escenarios de red en cuestión, a un entorno de simulación donde se hace posible el análisis de los parámetros ópticos permitiendo alcanzar el desarrollo de los objetivos propuestos para este trabajo de investigación.

La metodología involucra la propuesta de dos modelos diferentes durante el proceso de simulación. El primer modelo propuesto es un modelo de comportamiento que describe la red o sistema que se está analizando de forma independiente a la herramienta de simulación que se utilice, por lo que se diseñan los modelos lógicos tanto para el sistema FTTH como para el sistema NG-HFC. El segundo modelo es un modelo de simulación que se construye utilizando la herramienta de simulación seleccionada en la sección 2.2 y está diseñado para simular el comportamiento de la red o sistema descritos anteriormente.

Es relevante destacar que, para llevar a cabo la metodología de simulación en este trabajo de grado, se han identificado diversas etapas que se han adaptado y aplicado al contexto del proyecto. A continuación, se mencionan las diferentes etapas que se han seguido:

- Formulación del problema y revisión de los fundamentos teóricos.
- Recolección y procesamiento de datos relevantes para el estudio.
- Formulación de un modelo lógico de simulación que incluye la definición de escenarios de simulación y de una red de prueba.
- Diseño de pruebas que permiten validar el modelo.
- Implementación del modelo lógico de simulación adaptado al entorno de simulación de la herramienta seleccionada
- Evaluación del modelo y de los parámetros estimados a través de simulaciones.
- Validación del programa mediante la simulación de diferentes escenarios.
- Análisis de los datos obtenidos a partir de las simulaciones.
- Obtención de resultados que permiten evaluar el desempeño a nivel físico de los escenarios NG-HFC y FTTH
- Documentación de los resultados obtenidos a través de informes y presentaciones.

La figura 2.2 se presenta el diagrama de flujo que describe la metodología de simulación utilizada en este trabajo de grado.

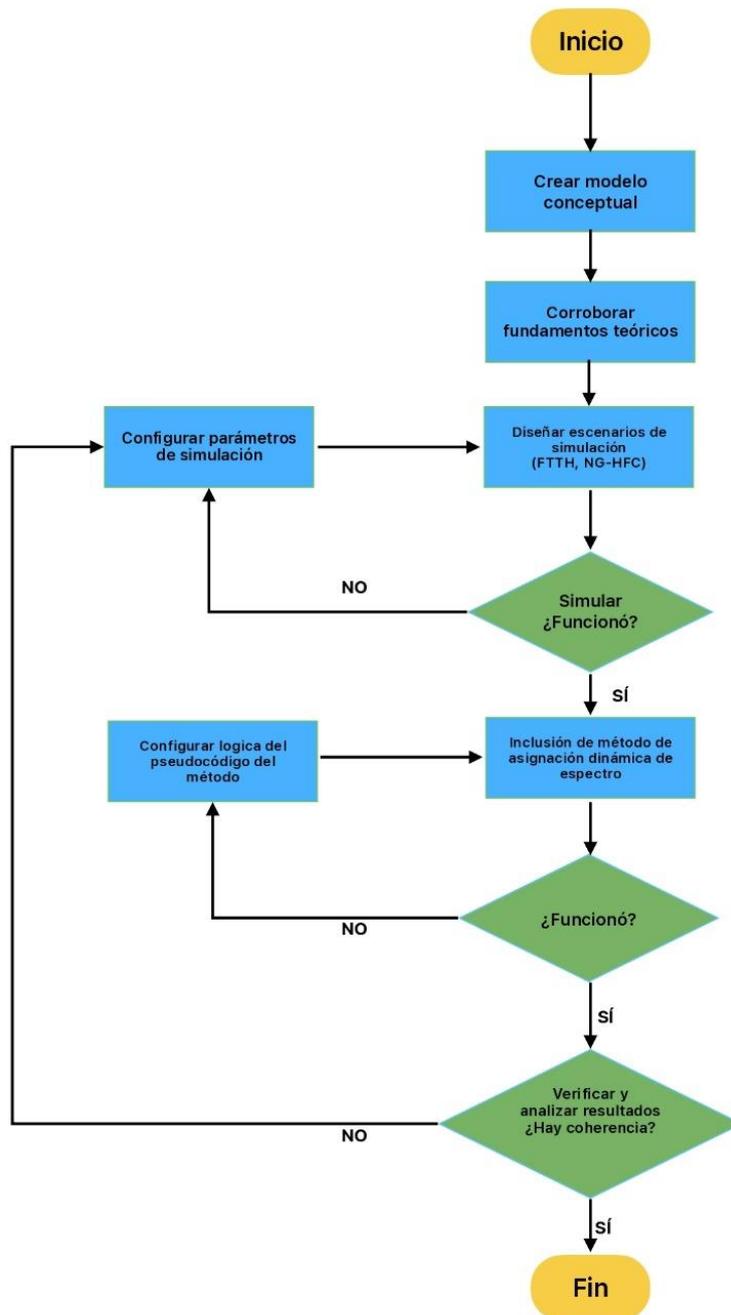


Figura 2.2, Esquema modelo de metodología de simulación adaptado de [21].

2.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Por medio de las simulaciones se pueden sustituir situaciones reales por otras creadas artificialmente como abstracciones del sistema real, con la finalidad de alcanzar una mejor comprensión de los conceptos.

En la actualidad existen distintas herramientas de simulación que permiten realizar estudios del desempeño a nivel físico de las diferentes arquitecturas en redes de datos, es muy importante para el buen desarrollo de este trabajo escoger la herramienta más adecuada.

A continuación, se detallan las herramientas disponibles al interior de la Universidad del Cauca, se hará recuento de ella y se expondrá las principales características, para finalmente elegir la que se considere más apta para el desarrollo del trabajo. [21]

2.2.1 MATLAB™

Esta herramienta software matemática de alto nivel que ofrece entornos de desarrollo integrado con lenguaje de programación propio y que está disponible para Plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Dentro de las características principales de esta herramienta sobresale la manipulación de matrices, representación de datos y funciones matemáticas, implementación de algoritmos, la posibilidad de creación de interfaces gráficas de usuarios y la comunicación con programas de otros lenguajes y también dispositivos hardware. MATLAB™ posee dos herramientas que permiten expandir las prestaciones de está: Simulink (Plataforma de simulación multidominio) y GUI (editor de interfaces de usuarios) [26]

Aunque MATLAB™ es una herramienta muy versátil en distintos campos de la ingeniería y telecomunicaciones, la simulación de redes fuera de un nivel físico resulta muy engorrosa ya que no permite la simulación de escenarios que ocurren sobre el nivel dos del modelo OSI, razón por cual se emplea generalmente para analizar esquemas de modulación y desempeños de enlaces que pertenezcan a la capa física de las redes. La figura 2.3 muestra el logotipo que representa a la herramienta de simulación MATLAB™.



Figura 2.3, Logotipo de Matlab™ tomado de [26].

2.2.2 OptSim™

OptSim™ es una herramienta desarrollada por RSoft que permite a los usuarios diseñar y simular sistemas de comunicación óptica actuales y de próxima generación en el nivel de propagación de la señal. Los algoritmos propietarios en el dominio del tiempo y de la frecuencia de OptSim®, permiten la simulación de sistemas complejos de con un alto grado de eficacia y precisión. Dentro de



las aplicaciones de OptSim™ se incluye: DWDM/CWDM, FSO, Redes totalmente Ópticas (*All-Optical Networks*), Redes de Área Local (*LAN, Local Area Networks*) ópticas, interconexiones ópticas, simulación de sistemas multimodo, entre otras.

OptSim™ añade un paquete de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas como WDM, TDM, CATV, PON y algunos otros sistemas de redes ópticas para otras aplicaciones permitiendo evaluar el desempeño de acuerdo con varios parámetros determinados [27].

Gracias a la extensa librería que añade OptSim™ con los componentes más utilizados en los sistemas de telecomunicaciones ópticas organizados de acuerdo con categorías como: Generadores de señal, transmisores, fibras ópticas, filtros (ópticos y eléctricos), multiplexores, demultiplexores, amplificadores (ópticos y eléctricos), receptores, entre otros. También incluye la capacidad de analizar el desempeño con base a parámetros como BER, Factor Q, Espectro de potencia, analizador de señal, diagrama de ojo brindando la oportunidad de medir características como jitter, abertura del ojo, espectro óptico y eléctrico, fase y frecuencia óptica instantánea, potencia y otras. Gracias a que esta herramienta proporciona una interfaz gráfica de usuario GUI hace que la interacción de esta sea más amigable con los usuarios posibilitando un análisis más amigable sobre los datos obtenidos a partir de la simulación [27].

Es importante recalcar el hecho que OptSim® puede ser integrado con otras herramientas como lo es MATLAB™, lo cual permite expandir los alcances de estas herramientas.

OptSim ofrece dos técnicas de simulación que se utilizan de acuerdo al tipo de resultado que se desea obtener, por un lado, se tiene la simulación en modo bloque que se refiere a la técnica tradicional, y por el otro el modo muestra, el cual es totalmente temporal, en el modo bloque se evalúa la secuencia de entrada hasta el punto de salida, este modo resulta útil a la hora de escoger entre los diferentes tipos de variaciones en el diseño de un enlace de fibra óptica.

a) Método de Propagación Espectral (STP, *Spectral Propagation Technique*)

En esta simulación se da en el dominio del espectro óptico, donde las señales son propagadas en manera de espectro de potencia, los componentes de SPT tienen en cuenta las pérdidas o ganancia y la generación de ruido; cada componente posee una función de transferencia que no tiene en cuenta las no linealidades de la fibra[49].

b) Método de Ancho de Banda Variable (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*)

Se trata de una simulación en el dominio del tiempo que se hace respecto a un ancho de banda variable que es proporcionado por el usuario, las señales se

propagan a través de la red como muestras en el dominio del tiempo, y permite simular los efectos lineales y no lineales para los componentes ópticos como eléctricos.[49]

Las características mencionadas previamente son idóneas para el desarrollo de este trabajo investigativo, y teniendo en cuenta que la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca cuenta con esta herramienta debidamente licenciada se opta por escoger OptSim® como herramienta principal de desarrollo. La figura 2.4 muestra el logo que figura a la herramienta de simulación OptSim®



Figura 2.4, Logo de OptSim tomado de [27].

2.2.3 OptiSystem

Es un paquete completo de diseño de software, perteneciente a Optiware Systems Inc, y que tiene funcionalidades como diseñar, ejecutar y simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de redes ópticas actuales.

OptiSystem ofrece al usuario la capacidad de diseñar, modelar y ejecutar redes ópticas jerárquicas que utilizan técnicas de transmisión de tipo monomodo y multimodo, en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Cuenta con la capacidad de proporcionar información detallada sobre el desempeño del sistema así mismo ofrece la posibilidad de trabajar con sistemas tipo LAN y MAN, su ambiente de trabajo es amplio y versátil, además de poseer un tipo de definición jerárquica en los componentes y sistemas [29].

Para un ambiente de diseño profesional esta herramienta es capaz de trabajar con redes basadas en tecnología PON tales como redes que utilizan Acceso Múltiple por División de Código Óptico (OCDMA, *Optical Code-division Multiple Access*). [29]

Dentro de las características principales de OptiSystem destacan:

- Modelado de redes tipo WDM/TDM o CATV.
- Modelado de redes en arquitectura de red tipo anillo SONET/SDH.
- Modelado de redes ópticas que incluyen OTDM, anillos SONET/SDH, CWDM, DWDM, PON, OCDMA.

- Capacidad de manejar redes ópticas de espacio libre (FSO), Radio sobre fibra (RoF), OFDM.
- Maneja distintos tipos de formatos de modulación (RZ, NRZ, CSRZ, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, 16-QAM, 64-QAM).
- Permite analizar el desempeño de las redes por medio de parámetros como diagrama de ojo, factor Q, potencia de señal, diagramas de constelación, entre otros[29]

2.2.4 OMNet++™

OMNet++™ es un entorno de simulación de red de eventos discretos orientado a objetos, posee una arquitectura genérica por lo que puede usarse en varios ámbitos como:

- Modelado de redes de comunicación alámbricas e inalámbricas
- Modelado de protocolo
- Modelado de redes de colar
- Modelado de multiprocesadores y otros sistemas de hardware distribuido
- Validación de arquitecturas de hardware
- Evaluación de aspectos de rendimiento de sistemas de software complejos.

Esta herramienta no es un simulador concreto, pero proporciona infraestructura y herramientas para escribir simulaciones. uno de los ingredientes fundamentales de esta infraestructura es una arquitectura de componentes reutilizables denominados módulos, los cuales son realmente reutilizables y se pueden combinar de distintas maneras [28]. La figura 2.5 muestra el logotipo que representa a la herramienta de simulación OMNet++™.



Figura 2.5, Logo OMNet++™ tomado de [28]

2.2.5 Optilux™

Optilux™ es una colección de algoritmos de código abierto que permite diseñar y simular sistemas de comunicaciones ópticas en la capa física, su lenguaje de programación está soportado sobre lenguaje Octave/Matlab™ lo cual permite el desarrollo del análisis en sistemas ópticos que incluyen:

- Fuentes generadoras de patrones de bits.
- Formatos de modulación multinivel.



- Transmisión WDM.
- Fibras ópticas en régimen no lineal.
- Estimaciones de tipo Monte Carlo.
- Es capaz de operar en campos eléctricos de polarización simple o dual.

La figura 2.6 muestra el logo de la herramienta de simulación Optilux™.



Figura 2.6, Logo de Optilux™ tomado de [31]

Al ser una herramienta de código abierto permite acceder de manera gratuita la herramienta, al igual que toda la documentación aportada por los desarrolladores [31].

En la tabla 2.1, se presenta una comparación de las características más destacadas de cada una de las herramientas analizadas.

| Características | OptSim™ | OptiSystem™ | Optilux™ | OMNeT ++™ | Matlab™ |
|------------------------------------|-----------------|-------------|----------|----------------|-------------------------------|
| Licenciado | Comercial | Comercial | gratuita | gratuita | Comercial |
| Interfaz gráfica | Alta | Alta | Baja | Baja | Alta |
| Requerimientos Hardware | Bajo | Medio | Bajo | Medio | Bajo |
| Requisitos del Sistema | Windows y Linux | Windows | Windows | Windows y Unix | Windows, Unix, Linux y MAC OS |
| Integración con otras herramientas | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |
| Lenguajes de Programación | Bajo | Bajo | Bajo | Bajo | Alto |
| Complejidad de manejo | Media | Media | Baja | Medio | Alto |

Tabla 2.1, Cuadro comparativo de las herramientas de simulación



2.3 MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EN REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Debido a la creciente demanda en la asignación de recursos en las redes de tipo elásticas se ha hecho necesario el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías que permitan lograr una mejor gestión de dichos elementos, destacándose dentro de ellos los algoritmos de asignación de recursos, los cuales de acuerdo a su tipo son aptos para controlar parámetros tales como: el enrutamiento al interior de la red, manejo en anchos de banda, aplicación de políticas de uso, calidad en el servicio prestado, etc.

Dentro de los algoritmos para asignación de recursos de espectro en las redes ópticas destacan dos grupos los cuales son los algoritmos de enrutamiento y asignación de espectro RSA estáticos y algoritmos de tipo dinámicos [30].

2.3.1 Algoritmos estáticos

Los algoritmos de tipo RSA estático se encargan de manejar el enrutamiento y la asignación de espectro durante la planificación de la red, donde la topología y las demandas de tráfico son conocidos con anterioridad y se mantienen fijas todo el tiempo [32][33]. El objetivo de dichos algoritmos es brindar una solución eficiente al momento de realizar enrutamiento y asignar espectro para dar solución al problema de RSA estático.

Para el caso de redes ópticas de grilla flexible (*Flexgrid*), las funciones pueden ser de la siguiente manera: maximizar el número de slots de frecuencia consecutivos que se dejan libres después de una petición. Minimizando los saltos en la ruta o reduciendo la posición en el espectro del último slot de frecuencia asignado a una petición, Es por esto que el mayor desafío se presenta en el momento que el número de condiciones se incrementa. Con el objetivo de reducir la dificultad se plantea descomponer el problema RSA en dos: por un lado, el enrutamiento y por el otro la asignación de espectro (R+SA), afrontados de manera separa y en forma secuencial; no obstante, al abordarlos de manera secuencial no se garantiza una solución eficiente [34].

2.3.2 Algoritmos Dinámicos

En los algoritmos de tipo RSA dinámico, el enrutamiento y la asignación de espectro se hacen directamente durante la operación de la red, y donde el principal objetivo es tratar de que la red acepte la mayor cantidad de peticiones, la topología de red es conocida previamente, pero las peticiones de tráfico son desconocidas, haciendo más difícil de resolver el problema de RSA a causa de la aleatoriedad del tráfico en la red [33].

RSA dinámico debe resolver los casos de restauración en las conexiones, reasignación de los recursos espectrales y gestionar las nuevas solicitudes de conexión cuando la red está en funcionamiento [34], por lo cual el problema de RSA puede abordarse de acuerdo con el funcionamiento del algoritmo, por



ejemplo, algoritmos de una etapa (*one step*) que buscan resolver los problemas de enrutamiento y asignación del espectro de forma simultánea, o también los algoritmos de dos etapas (*two-steps*), los cuales buscan enrutar y asignar el espectro de manera secuencial[35][18].

2.3.4 Algoritmos RSA

A continuación, se presentan a nivel investigativo algunos de los algoritmos que existen actualmente para lograr dar solución al problema de asignación de espectro y seleccionar alguno de ellos para ser implementados en el proceso de simulación para el presente trabajo de grado.

➤ Algoritmo First Fit (FF)

Los esquemas de tipo *First Fit* trabajan mediante la enumeración de los *slots* de espectro disponibles en orden ascendente (índice del *slot*), como se muestra en la figura 2.7, y de esta manera cuando existe una solicitud de conexión que requiera de dos *slots* el algoritmo trata de seleccionar de entre los disponibles aquellos *slots* consecutivos identificados desde el *slot* de índice más bajo hasta el del mayor los cuales permanecen disponibles para conexiones futuras [22][36][37]. Estos algoritmos rechazan las solicitudes de conexión si no se dispone del número de *slots* sucesivos requeridos para cumplir con la solicitud.

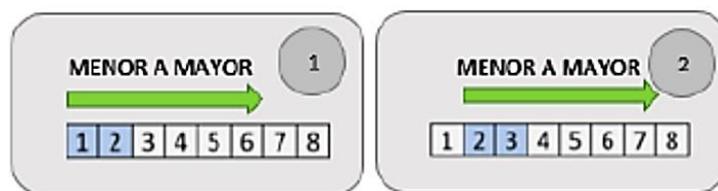


Figura 2.7, Representación funcionamiento algoritmo First Fit tomado de [37]

➤ Algoritmo Random Fit (RF)

En este algoritmo la asignación de recursos espectrales para una nueva solicitud de conexión se da de manera aleatoria cumpliendo con el número de *slots* requeridos para establecer la comunicación.

En la figura 2.8 se puede observar como el algoritmo realiza un barrido de manera aleatoria buscando encontrar un espacio dentro de la grilla.

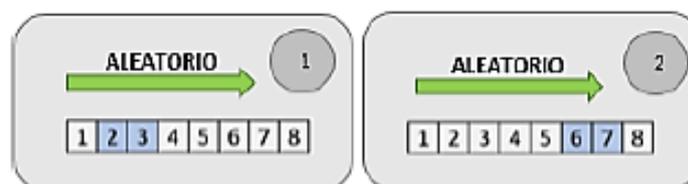


Figura 2.8, Representación funcionamiento algoritmo Random Fit tomado de [37].



➤ Algoritmo Last Fit (LF)

Este algoritmo trabaja de manera contraria a los algoritmos de tipo First Fit debido a que siempre busca asignar los slots de manera descendente, es decir, cuando se presenta una solicitud de conexión que requiere de dos slots el algoritmo erigirá los slots desde el índice más alto al más bajo y dicha conexión se pondrá en la banda espectral más pequeña disponible desde la primera ruta a encontrar, como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9, Representación funcionamiento algoritmo Last Fit tomado de [37]

➤ Algoritmo Exact Fit

En este esquema de asignación de espectro se busca seleccionar desde los slots disponibles, el bloque exacto de los slots solicitados por la conexión, de esta manera si hay un bloqueo espectral que coincide con el tamaño exacto de los recursos solicitados se asigna ese espectro, de lo contrario se emplea la técnica First Fit para asignar los recursos necesarios.

➤ Algoritmo tipo Péndulo

Este algoritmo fue desarrollado dentro de las instalaciones de la Universidad del Cauca y cuyo funcionamiento de este algoritmo se basa en un movimiento pendular que recorre la rejilla desde los extremos alternados hacia el centro, buscando los slots necesarios para atender una solicitud, en la figura 2.10, se puede ver el funcionamiento de este algoritmo más a detalle. [18]

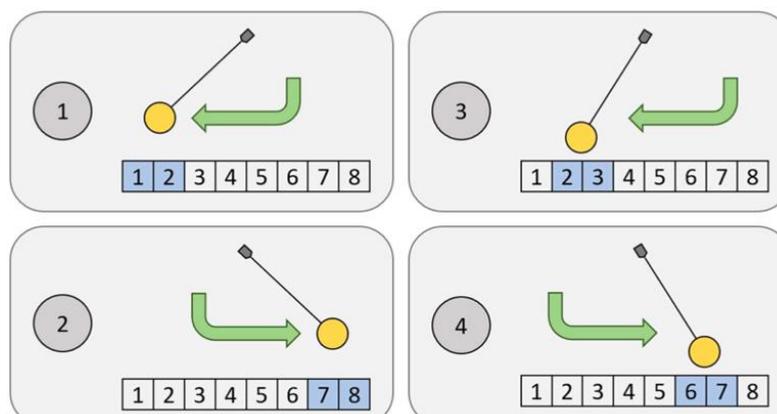


Figura 2.10, Representación funcionamiento algoritmo tipo péndulo tomado de [18].



Al comienzo el algoritmo inicia buscando si en los *slots* de índice más bajo hay recursos disponibles (paso1), en caso que no hay comprueba en los últimos slots de la rejilla (paso2), si no encuentra los slots necesarios iniciará un nuevo ciclo de revisión a partir del segundo slot con índice más bajo (paso 3), y si tampoco están disponibles los slots necesarios, comprueba los últimos a partir del penúltimo slot (paso 4), de esta manera el algoritmo continua funcionando hasta llegar al centro de la rejilla o encontrar los recursos requeridos para atender la solicitud. En caso que no se encuentren los recursos requeridos la solicitud es rechazada [18].

2.4 BASES TEÓRICAS PARA LA COMPRESIÓN DEL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO DE ACUERDO CON OPM (*OPTICAL PERFORMANCE MONITORING*).

Puesto que las redes de datos están sometidas a un gran estrés a causa del tráfico que cursan por ellas diariamente y la gran demanda por parte de usuarios en los diferentes servicios se requiere de un constante monitoreo en la red con la finalidad de gestionar los recursos, corregir y prevenir fallas al interior de las redes ópticas, la cual debe estar en plena capacidad de realizar los ajustes necesarios en tiempo real del estado y calidad de las señales en cada servicio [33].

Para lograr una adecuada gestión y monitoreo en el estado y recursos con los que cuenta la red se hace uso de un grupo de parámetros que son conocidos como parámetros de monitoreo óptico (OPM, *Optical Performance Monitoring*). Aunque existen diversos parámetros que describen el proceso de transmisión para un canal de fibra óptica se tomará como referencia los parámetros que sugiera la recomendación IT-T G.697 [38], dichas variables permitirán medir el desempeño de la red FTTH y NG-HFC por medio de parámetros como: Diagrama de ojo, Relación señal a ruido óptica,(OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*), Tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), Factor Q, *Jitter*, entre otros.

El uso de OPM es fundamental para el desarrollo de este trabajo de investigación puesto que permite conocer el desempeño de la red.

Como se ha expresado anteriormente, algunos de los fenómenos que afectan las señales en el medio de transmisión óptico y el cual degradan la calidad de la señal reduciendo el desempeño de esta son:

- Atenuación: es la degradación que sufre la potencia de la señal óptica al avanzar por el medio de transmisión a medida que aumenta la distancia.
- Dispersión: Se refiere al ensanchamiento que sufren los pulsos de luz a medida que atraviesa la fibra óptica.
- Efectos no lineales: Son los efectos acumulativos que se produce por la interacción de la luz con el material en el cual las ondas de luz viajan.



los parámetros ópticos de monitoreo más importante son descritos a continuación:

2.4.1 Factor Q

El factor Q se refiere al factor de calidad que mide el desempeño de una red de comunicaciones ópticas, y se expresa como la relación señal a ruido que es medida a la entrada de un circuito de decisión en un receptor digital. Su medida está en función de las medias y varianzas de las intensidades de corriente en el decisor del receptor que representan los niveles de los diferentes símbolos recibidos, en los sistemas de modulación binaria el factor Q es expresado por medio de la ecuación 2.1[21]:

$$Q[dB] = 20 \log \left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \right) \text{ Ecuación 2.1 Expresión matemática para el factor Q.}$$

En donde I y σ son la media y la varianza, de un uno o cero lógico transmitido

I_0 = Nivel medio de tensión de nivel cero.

I_1 = Nivel medio de tensión de nivel uno.

σ_0 = Desviación típica de la distribución de ruido en nivel cero.

σ_1 = Desviación típica de la distribución de ruido en el nivel uno.

2.4.2 Tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*)

La tasa de error de bit permite medir la calidad de la información que es recibida en el sistema y es representada como la relación entre el número de bits que han sido transmitidos erróneamente respecto al número total de bits transmitidos en un periodo de tiempo determinado.

Como se ha mencionado anteriormente las señales son afectadas por fenómenos como la dispersión, incremento de ruido o efectos no lineales, por lo cual para contrarrestar dichos fenómenos y lograr una buena calidad en los servicios se pueden usar distintas técnicas y métodos como lo es el aumento de la potencia en la señal, al implementar el uso de amplificadores de señal[21].

El factor Q y la tasa de error de bit se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \text{ Ecuación 2.2, Expresión matemática para la BER}$$

$\operatorname{erfc}(x)$ hace referencia a la función complementaria de error para distribuciones gaussianas.



2.4.3 Relación señal a ruido óptica (OSNR)

Se define como OSNR (OSNR, *Optical Signal Noise Ratio*) a la medida de la relación en la potencia de la señal respecto a la potencia de ruido presente en el canal óptico, como se muestra en la ecuación 2.3. Este parámetro es importante en el estudio de redes ópticas puesto que permite conocer cuánto se degrada una señal que es transmitida en el sistema a causa de las múltiples atenuaciones. [21]

Matemáticamente puede definirse como:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_i}{N_i} \right) + 10 \log \left(\frac{B_n}{B_r} \right) \text{ ecuación 2.3,}$$

Y donde:

P_i = Potencia óptica de la señal

N_i = Valor promedio de la potencia de ruido

B_n = Ancho de banda equivalente de ruido

B_r = Ancho de banda óptico de referencia, con un valor típico de 0,1nm

La OSNR depende de factores como la sensibilidad del receptor, por lo que si se desconoce el valor de este parámetro la medida puede ser inexacta [43], los valores que afectan también a la OSNR son:

- Formato de modulación
- Velocidad de transmisión
- Potencia a la salida de los amplificadores
- Dispersión en la fibra óptica
- Ancho de banda
- Espacio entre canales

2.4.4 Diagrama de ojo

Es la representación gráfica que ilustra la superposición de diferentes combinaciones de unos y ceros sobre el canal que son transmitidos en lapso de tiempo específico, como se muestra en la figura 2.11.

Al momento de analizar un diagrama de ojo se pueden identificar dos elementos principales: por un lado el cruce de tiempo que es el instante en donde se produce el cierre o la apertura del ojo, y el cruce de la amplitud que es el nivel de tensión que se produce en la apertura o cierre del ojo definido en el periodo de bit. [21]

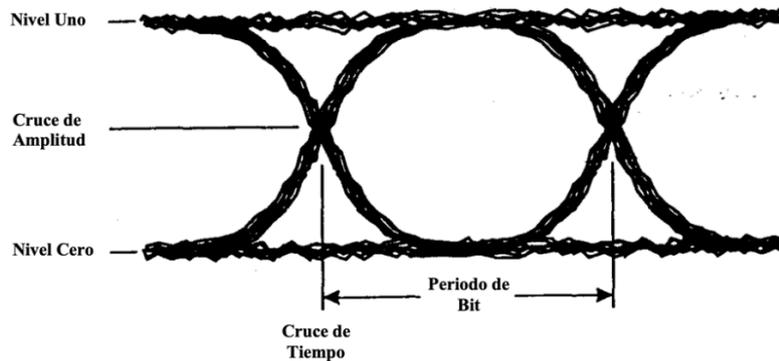


Figura 2.11, Parámetros diagrama de ojo, Adaptado de [40].

Cuando se observa un diagrama de ojo se puede conocer cuáles son los fenómenos que están afectando la señal, si la apertura vertical es pequeña significa que la calidad del sistema está siendo comprometida por fenómenos como la atenuación y la interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*) y el margen de ruido que incide sobre la amplitud de la señal. Por otro lado si la apertura horizontal es pequeña significa que la calidad en el sistema se ve comprometida directamente por el jitter y el sincronismo sobre la señal. [21].

2.4.5 Jitter.

Éste fenómeno puede considerarse como una degradación óptica o daño en la transmisión la señal, el fenómeno Jitter se refiere a la desviación en la fase de la señal óptica que se propaga sobre un canal con respecto a la posición ideal en el dominio del tiempo y es calculado en función de la desviación estándar del histograma que contiene las formas del pulso transmitido.

Jitter es un efecto que no se desea en un sistema de telecomunicaciones debido a que pueden generar efectos de interferencia intersimbólica a causa del desplazamiento de fase generado, haciendo que los pulsos se traslapen entre sí, imposibilitando el reconocimiento de los datos en el receptor, razón por la cual, los sistemas de telecomunicaciones deben manejar niveles de tolerancia de Jitter con el objetivo de que la información pueda ser recuperada de manera acertada y los transmisores puedan trabajar de manera correcta[21]. En la figura 2.12, se puede observar un Jitter que cuenta con un desfase de 0,5 veces el periodo de bit.

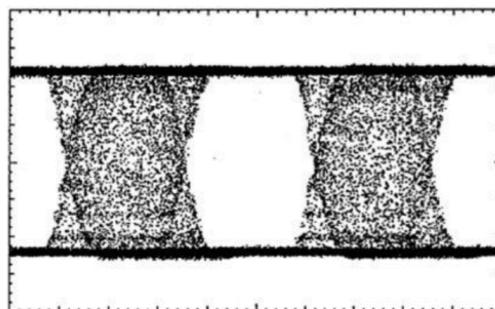


Figura 2.12, Diagrama de ojo con 0.5 UI (UI, Units Interval) de Jitter agregado intencionalmente a los datos. Tomado de (Hewlett-Packard Journal, 1995)



PASOS PARA EL DESARROLLO DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

2.5 DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos para este trabajo de investigación se describe en este capítulo el modelado en la herramienta OptSim, la cual debido a las características descritas en 2.2.3 es el entorno seleccionado con el cual se simulan los escenarios propuestos; OptSim es un entorno adecuado debido a su buena interfaz, agilidad en procesamiento, así mismo, permite el desarrollo de co-simulaciones con la finalidad de medir el desempeño a nivel físico de un sistema *FTTH-GPON* y *NG-HFC*, que soportan servicios *Quad Play*, y la inclusión de un método de asignación dinámica de espectro. Tomando como fundamentos teóricos lo planteado en [21], donde se realiza el estudio a una red *FTTH-GPON Triple Play*, figura 2.13, posteriormente se le ha integrado un módulo RoF, transformando así su arquitectura de red a una *Quad Play*, figura 2.14.

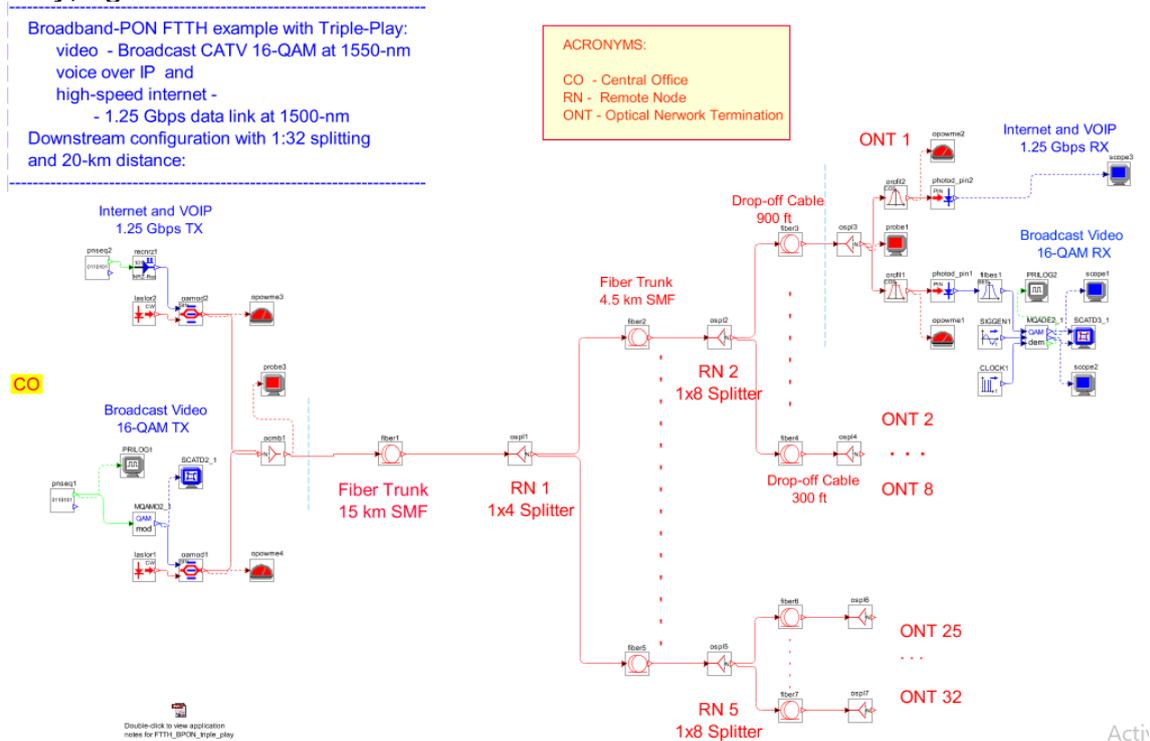


Figura 2.13, Modelo General de la Red *FTTH-GPON Triple Play*, Tomado de [21].

Este escenario es común en redes *FTTH-GPON*, donde la velocidad de transmisión es limitada por la capacidad de la tecnología *GPON*, que es de 2.5 Gbps de bajada y 1.25 Gbps de subida, Es importante destacar que la elección de los valores de las longitudes de onda de los servicios *triple play* se realiza conforme a las recomendaciones ITU-T G.984.1 y ITU-T G.984.5. La combinación de los servicios de Internet y VoIP en una sola longitud de onda de 1490 nm permite una mejor gestión del ancho de banda y una mayor eficiencia en la transmisión de datos.



El componente de video se transmite en una longitud de onda diferente, 1550 nm, utilizando una modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados (16 QAM). Esta técnica permite la transmisión de señales de video de alta calidad y resolución a través de la red FTTH-GPON.

Es importante mencionar que en el escenario que muestra la figura 2.13, solo se ofrece el servicio *Triple Play*, por lo que no se considera la transmisión de datos de telefonía móvil ni la posibilidad de agregar servicios adicionales como IoT o realidad virtual, por lo que se debió implementar un módulo RoF que permitiera entregar el servicio de datos de telefonía móvil.

2.6 SISTEMA QUAD PLAY

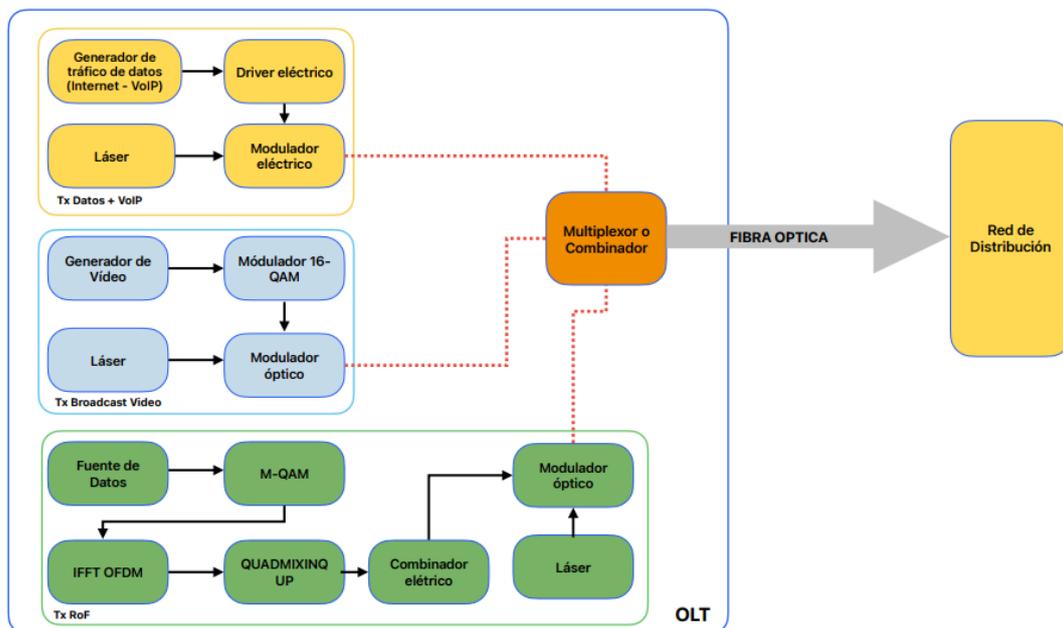


Figura 2.14, Modelo lógico de la transmisión QuadPlay, Adaptado de [21].

Las figuras 2.15 y 2.16, muestran el modelo lógico para las redes de acceso FTTH y NG-HFC, siguiendo la metodología de simulación.

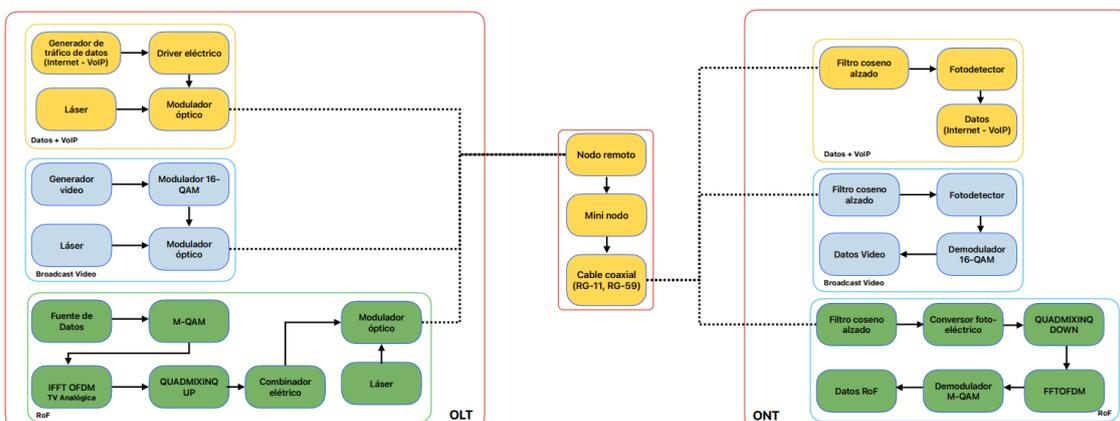


Figura 2.15, Modelo lógico NG-HFC

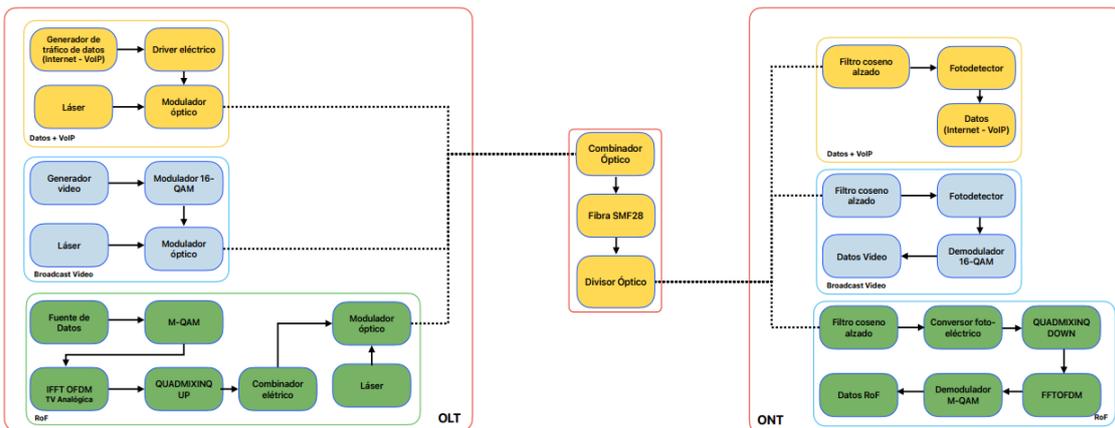


Figura 2.16, Modelo Lógico FTTH

A continuación, se describen las características y los valores de los parámetros propuestos en las figuras anteriores después de un proceso de configuración general. Sin embargo, más adelante se proporcionarán detalles sobre los parámetros de configuración que se utiliza en la simulación.

2.6.1 Topología de red

La topología de árbol, también conocida como topología jerárquica, es la opción más comúnmente utilizada en la construcción de redes GPON. En esta topología, las conexiones de fibra óptica se organizan en un patrón de árbol, donde el punto central de la red se conecta a varios distribuidores, y cada distribuidor se conecta a varios hogares. De esta manera, se crea una estructura jerárquica en la que las conexiones de fibra óptica de cada hogar están conectadas directamente al distribuidor más cercano.

Esta topología es especialmente útil para la gestión de grandes redes FTTH, ya que permite una fácil escalabilidad y gestión de la red. Además, si un distribuidor falla, sólo los hogares que están conectados a ese distribuidor se verán afectados, mientras que los demás hogares seguirán recibiendo servicio.

2.6.2 Subsistema de Transmisión:

A. Servicio Internet/VoIP.

- Generador de Tráfico:
 - Velocidad de Transmisión de Datos: 2.5 Gbps y 10 Gbps
- Codificación Línea:
 - Formato: No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*).
- Láser:
 - Tipo: Láser de Onda Continua.
 - Longitud de Onda: desde 1498 nm hasta 1591 nm.



- Potencia: 10 dBm Datos, 8dBm para video.
- Modulador:
 - Tipo: externo (Mach- Zehnder).

B. Servicio de video broadcast:

- Generador de tráfico:
 - Velocidad de transmisión de datos: 0.8 Gbps
- Modulador Banda Base:
 - Tipo: QAM. 16 símbolos
- Láser:
 - Tipo: Láser de Onda Continua
 - Longitud de onda: 1498 nm hasta 1591 nm
 - Potencia: 8 dBm

C. Servicio RoF:

- Generador de tráfico:
 - Velocidad de transmisión de datos: 10 Gbps
- Láser:
 - Tipo: Láser de Onda Continua
 - Longitud de onda: 1498 nm hasta 1591 nm
 - Potencia: 10 dBm
- Modulador:
 - Tipo: externo (Mach- Zehnder).

El modulador Mach-Zehnder se compone de dos brazos o ramas de guía de onda paralelos que forman un interferómetro. La señal óptica se divide en dos partes iguales y se envía por cada brazo del interferómetro. Al aplicar una señal eléctrica a uno de los brazos, se produce un cambio en la fase de la luz que recorre ese brazo, lo que causa una interferencia entre las dos señales ópticas que vuelven a combinarse al final del interferómetro. La señal resultante tiene una amplitud que varía en función de la señal eléctrica aplicada al brazo del interferómetro. En general, la modulación externa ofrece ventajas sobre la modulación directa en términos de mayor ancho de banda, menor distorsión y mayor estabilidad de la frecuencia

- Modulador Banda Base:
 - Tipo: QAM. 16 símbolos



2.6.3 Subsistema Multiplexor/Demultiplexor WDM:

El subsistema multiplexor/demultiplexor WDM se emplea en los escenarios de comunicaciones ópticas descritos en este trabajo de grado, su objetivo es aumentar la capacidad de transmisión de datos por medio de fibras ópticas.

Este subsistema multiplexor WDM se utiliza para combinar múltiples señales de diferentes longitudes de onda en una sola fibra óptica, permitiendo así transmitir grandes volúmenes de información a través de un solo cable. Por ejemplo, en este caso, se utiliza para combinar señales de voz, video y datos de diferentes clientes en una sola fibra óptica.

Por otro lado, en la demultiplexación, el subsistema WDM se encarga de separar las diferentes señales de diferentes longitudes de onda en la fibra óptica para su posterior procesamiento y distribución.

- Filtro Óptico: es un dispositivo utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas para controlar el espectro de la señal óptica. Permite que las longitudes de onda específicas de la señal pasen mientras que las demás son atenuadas o eliminadas. El rizado es una medida de la variación de las pérdidas de transmisión en diferentes longitudes de onda a través del filtro. En otras palabras, el rizado es una medida de la no uniformidad de las pérdidas en el filtro. El rizado se expresa como la diferencia entre el valor máximo y mínimo de las pérdidas en el filtro.
 - Tipo: Bessel
 - Orden: 2
- BW: equivalente a cuatro veces la velocidad de transmisión de datos. (Valor= 3.2 GHz, para 0.8 Gbps, Valor= 10 GHz, para 2.5 Gbps, Valor = 40GHz, para 10 Gbps).
- Profundidad: atenuación que presenta el filtro para todos los canales, excepto para el que le corresponde. (Valor = 100).

2.6.4 Subsistema de Canal de Acceso:

Fibra Óptica:

- Tipo: SMF-28 (ITU-T G.652)

SMF-28 (ITU-T G.652) es un tipo de fibra óptica de modo único que se utiliza ampliamente en redes de telecomunicaciones. Tiene un coeficiente de atenuación bajo, lo que significa que puede transmitir señales a largas distancias sin pérdida significativa de la intensidad de la señal. También es altamente resistente al estrés físico y tiene un diámetro de núcleo pequeño, lo que lo hace adecuado para la transmisión de datos de alta velocidad.



SMF-28 tiene un diámetro de campo de modo estándar de 9 micrones y un diámetro de revestimiento de 125 micrones. Tiene una atenuación de longitud de onda de menos de 0,4 dB/km a una longitud de onda de 1550 nm. También tiene un coeficiente de dispersión bajo, lo que significa que puede transmitir señales sobre un amplio rango de longitudes de onda sin una distorsión significativa de la señal.

- Constante de Atenuación: es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.
- Constante de Dispersión: es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.

Cable coaxial:

- Tipo: RG-11 y RG-59

Para el desarrollo de este trabajo se tuvieron a consideración dos categorías de cable coaxial, los cuales son los que los operadores en Colombia hacen mayor uso cable coaxial tipo RG-11 y RG-59, a continuación se describen las principales características eléctricas de cada uno de ellos, como se muestra en la tabla 2.2.

| Características Eléctricas | RG-11 | RG-59 |
|--|-----------|-----------|
| Impedancia Característica (Ω) | 75 | 75 |
| Capacitancia Media (pF/m) | 67 | 67 |
| Velocidad de Propagación | 66,6 | 66,6 |
| Atenuación (dB/100m) | | |
| 1 MHz | 0,6 | 0,9 |
| 5 MHz | 1,4 | 2,6 |
| 10MHz | 2,2 | 3,3 |
| Perdidas de Reflexión(dB) | | |
| 1-10MHz | ≥ 29 | ≥ 29 |
| Eficacia de Apantallante (dB) | ≥ 80 | ≥ 80 |
| Compatibilidad Electromagnética | Sí | Sí |

Tabla 2.2, Características eléctricas cable RG-11 y RG-59

2.6.5 Subsistema de Recepción:

➤ Fotodetector:

- Tipo: PIN.
- Longitud de Onda: desde 1291 nm hasta 1591 nm, correspondiendo con la utilizada por el láser.

➤ Filtro Eléctrico:

- Tipo: Buterworth.
- Orden: 16.



2.7 MODELO FÍSICO DE LA RED QUAD PLAY.

Para el escenario de prueba desarrollado en este trabajo investigativo, el servicio *Quad play* se ofrece como la transmisión de señales que incluyen Internet, VoIP y CATV Digital y una transmisión RoF, que permite entregar el servicio de datos de telefonía móvil. La velocidad de transmisión para el servicio de internet y VoIP es de 2.5 Gbps y 10 Gbps, La señal eléctrica del codificador de línea se modula externamente en banda base y se transmite en la ventana con longitud de onda de 1490 nm. Por otro lado, la señal de vídeo CATV se transmite a través de un módulo que retarda la señal para lograr una mayor sincronización en los pulsos enviados. Esta señal se recibe en el componente de Modulación de Amplitud en Cuadratura, basado en 16-QAM, y se transmite en la ventana con longitud de onda de 1550 nm. Finalmente, en lo que respecta a la señal de RoF se utilizó longitud de onda de 1520 nm y una velocidad de transmisión de 10 Gbps.

La selección de los valores de longitud de onda, plan de frecuencias según recomendación ITU-T 694.1 para frecuencias centrales nominales del plan con DWDM y capacidad de transmisión para los servicios de *Quad Play* se basa en las recomendaciones de la ITU-T G.984.1, ITU-T G.984.5, y ITU-T para redes PON (redes ópticas pasivas) a 10 Gbps es G.987.2, también conocido como XG-PON2 (10 Gigabit-capable Passive Optical Networks 2. Una vez combinadas las señales de vídeo, voz y datos, se transmite una señal resultante a través de una Fibra Óptica Monomodo Estándar SMF-28 hacia un divisor óptico y por medio de un entramado de cable coaxial tipo RG-11 y RG-54 de acuerdo a cual sea su caso. La señal llega al módulo receptor (ONT, *Coaxgateway*) donde un filtro coseno alzado interno elimina las interferencias ópticas alrededor de la longitud de onda que contiene la información. Luego, el fotodetector de la ONT recibe y transforma la señal óptica eléctrica, adquiriendo así el servicio de voz y datos. La señal de información de video se procesa con un filtro Bessel que elimina las frecuencias no deseadas, como se muestra en la figura 2.17 y figura 2.18.

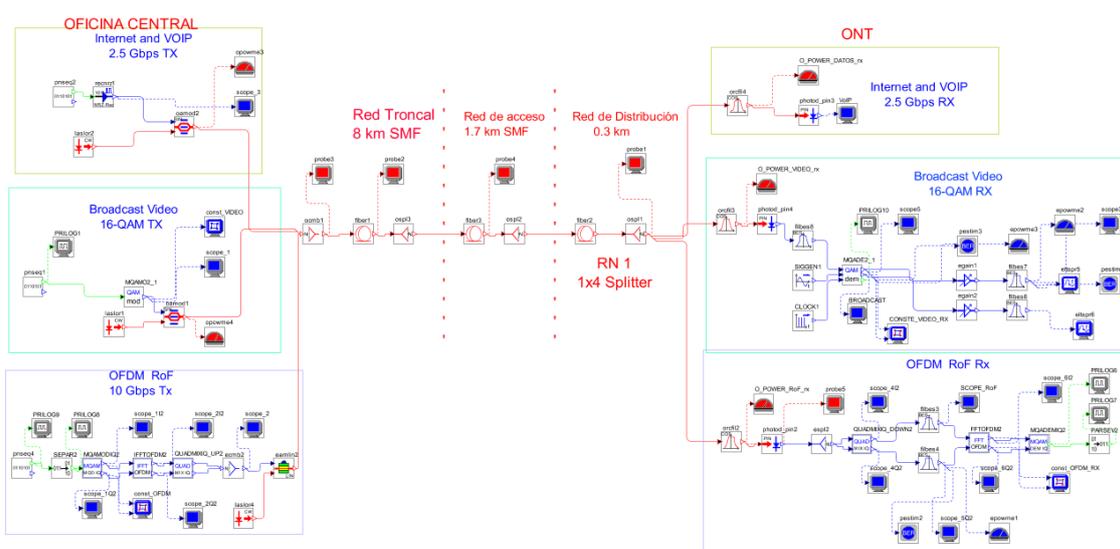


Figura 2.17, Esquema general en OptSim de la red FTTH para servicios Quad Play.

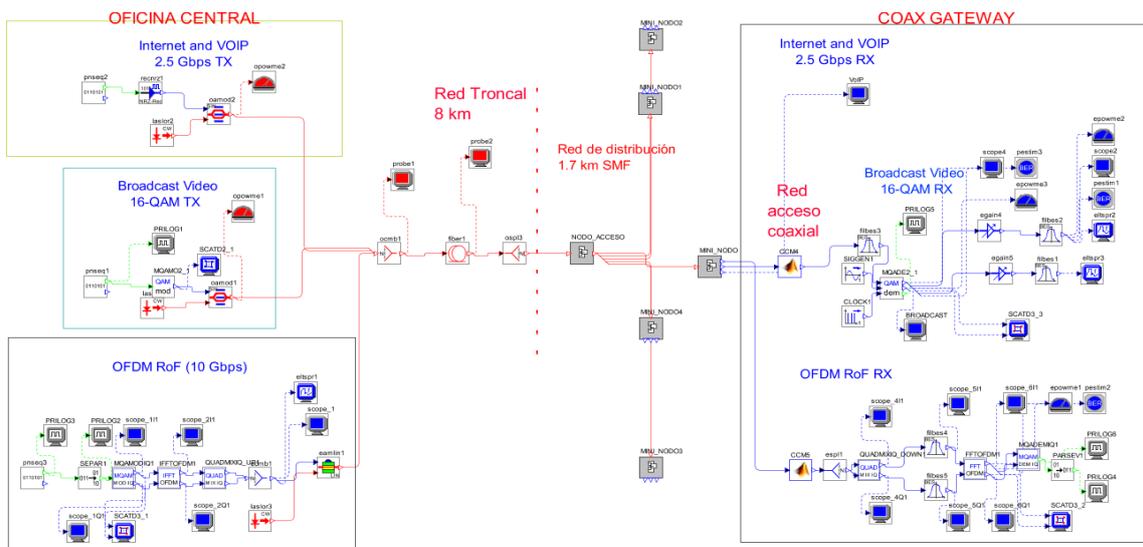


Figura 2.18, Esquema general en OptSim de la red NG-HFC para servicios Quad Play.

2.7.1 DEFINICIÓN DE PÁMETROS DE LA OFICINA CENTRAL QUADPLAY

La Oficina Central es una instalación física, como se muestra en la figura 2.19, que proporciona conectividad de red a través de una infraestructura de comunicaciones y es la fuente de los servicios para los usuarios finales. A continuación, se mencionan varios aspectos técnicos de las tecnologías que son utilizadas en la oficina Central.

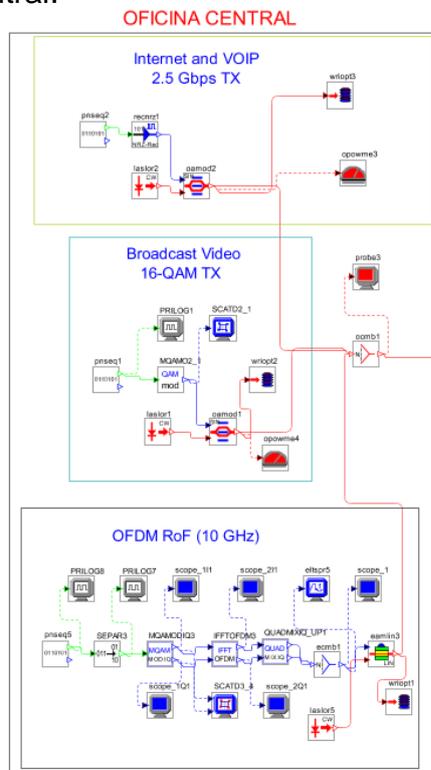


Figura 2.19, Esquema de los Componentes de la Red de Servicios de Voz, Datos, Vídeo y Módulo RoF al Interior de la Oficina Central.



a) Subsistema servicio Internet/VoIP.

La figura 2.20, muestra el subsistema empleado para la transmisión del servicio Internet/VoIP, para la simulación se emplean diferentes tipos de módulos, como la fuente de datos, laser, cuyas características se describen en la tabla 2.3; módulo de codificación de línea y modulación, cuyos parámetros son definidos por defecto por la herramienta.

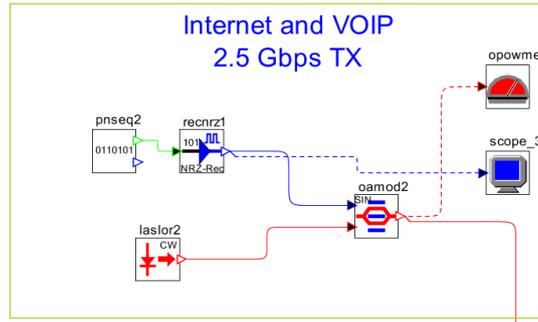


Figura 2.20, Elementos que Componen el Servicio de Internet/VoIP

| Parámetro | Valor |
|---|-------------------|
| SERVICIO DE INTERNET -VoIP | |
| Velocidad de transmisión | 2.5 Gbps, 10 Gbps |
| Frecuencia de emisión central del láser | 200 THz |
| Longitud de Onda | 1490nm (Banda S) |
| Potencia de Transmisión | 10dBm |
| Tipo de modulación óptica | Externa |
| Sensibilidad de recepción | -25,144 dBm |

Tabla 2.3, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación servicio de Internet-VoIP.

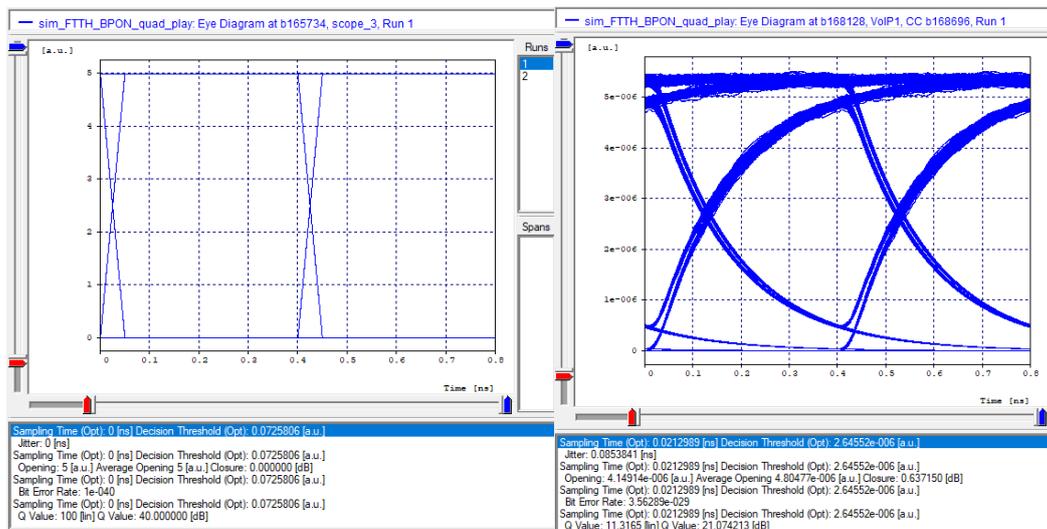


Figura 2.21, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play – Diagrama del Ojo de Señal de Datos VoIP Tx y Rx de señal.



La figura 2.21 muestra los parámetros OPM, Jitter, Factor Q y BER, del subsistema servicio Internet/VoIP, tomado en transmisión y recepción, para el escenario FTTH a una tasa de datos de 2.5 Gbps y una distancia de 20 KM.

b) Subsistema Broadcast Video.

La figura 2.23, muestra el subsistema empleado para la transmisión del servicio de vídeo, para la simulación se emplean diferentes tipos de módulos, como la fuente de datos, laser, y modulación m-aria QAM, cuyas características se describen en la tabla 2.4, y el módulo de la modulación por amplitud, cuyos parámetros son definidos por defecto por la herramienta.

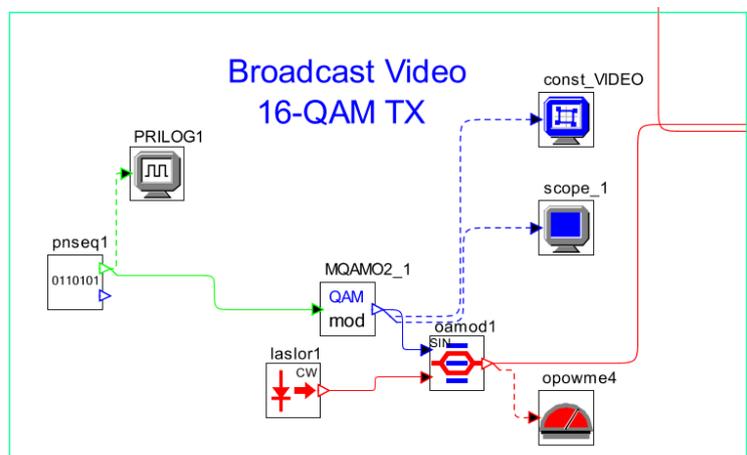


Figura 2.23, Elementos que conforman el servicio de vídeo.

| Parámetro | Valor |
|--|--------------------------|
| SERVICIO DE BROADCAST VIDEO | |
| Formato de modulación multinivel | 16-QAM |
| Velocidad de transmisión | 0.8Gbps* |
| Frecuencia de emisión central de láser | 193.1THz |
| Portadora | 1 x 10 ⁻³ THz |
| Tipo de modulación óptica | Externa |
| Potencia de transmisión | 8 dBm |
| Longitud de onda | 1550 nm (Banda C) |
| Sensibilidad de Recepción | -27.023dBm |
| Velocidad de transmisión de 0,8 Gbps, definida por defecto en el archivo FTTH BPON triplay en la herramienta de simulación | |

Tabla 2.4, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación del servicio de vídeo.



La figura 2.24 muestra los parámetros OPM, Jitter, Factor Q y BER, del subsistema servicio broadcast, tomado en transmisión y recepción, para el escenario FTTH a una tasa de datos de 2.5 Gbps y una distancia de 20 KM.

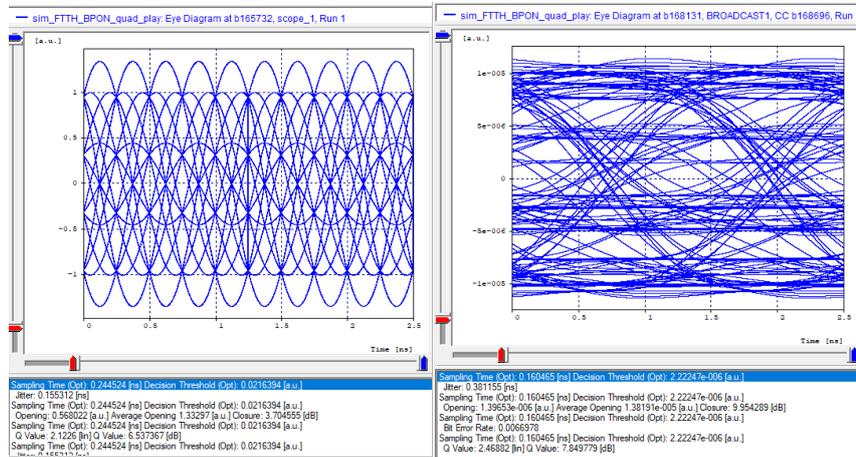


Figura 2.24, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play - Diagrama de ojo señal de vídeo, Tx y Rx de señal

En la figura 2.25, se muestra el diagrama de constelación de la señal modulada, este diagrama muestra que está correctamente distribuida la constelación 16QAM antes de entrar al medio de transmisión, y a su vez la constelación en fase y cuadratura es aceptable en recepción, lo que indica que los datos se pueden recuperar, sin embargo, los símbolos no son tan notorios como en transmisión, lo que puede revelar un comportamiento de BER alto

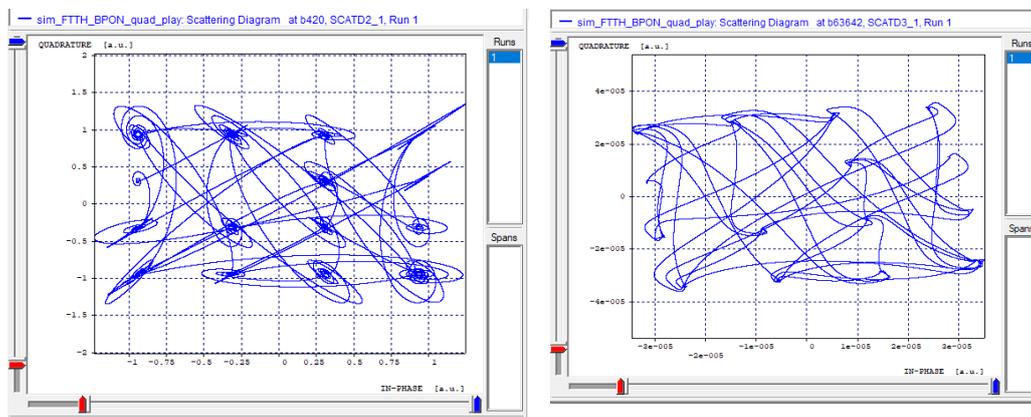


Figura 2.25, Diagrama de Constelación simulado 16-QAM Servicio de Vídeo a la entrada y salida del sistema

c) Subsistema Módulo RoF

La figura 2.26, muestra el escenario de un sistema OFDM *back to back*, el cual será adaptado para la red, El módulo de RF utilizado como referencia es un sistema OFDM radio sobre fibra que utiliza la modulación en fase y la modulación 16QAM sobre portadoras OFDM. Este tipo de sistema es elegido por su capacidad para proporcionar una mayor distancia en un enlace punto a punto y un mejor desempeño en términos de los parámetros físicos de la red. Para



integrar este módulo a los escenarios, se realizaron algunos cambios en su diseño. En primer lugar, se adaptó la longitud de onda de transmisión para que fuera compatible con la longitud de onda utilizada en la red FTTH y NG-HFC. Además, se ajustaron los parámetros de transmisión para cumplir con los estándares de la red FTTH-GPON, incluyendo la potencia de transmisión y la tasa de modulación.

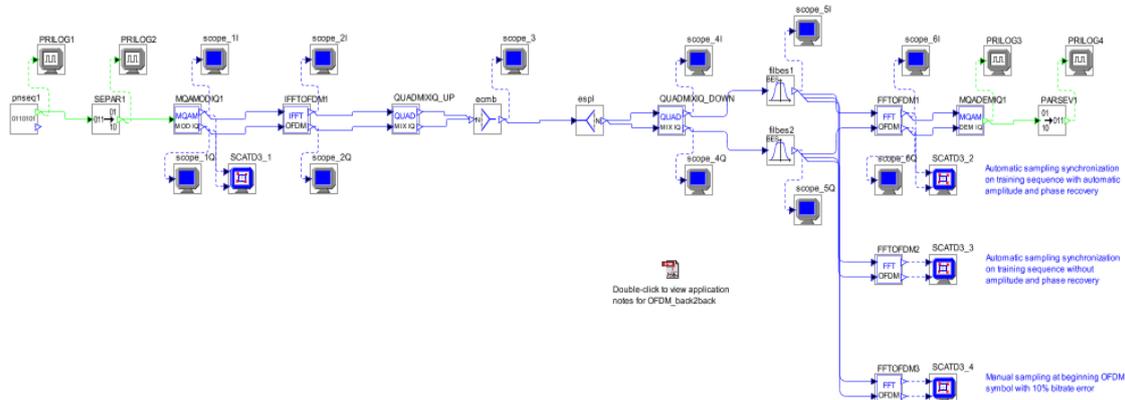


Figura 2.26, Módulo OFDM Back-to-Back.

Finalmente, El modelo representado en la figura 2.26 se tomó del ejemplo predeterminado incluido en la herramienta de simulación OptSim y los recursos en línea. Además del análisis previo de la bibliografía, se ajustaron los parámetros propuestos en [21] para obtener los escenarios con la inclusión del cuarto servicio, y así obtener los resultados correspondientes a este trabajo. El subsistema RoF logra la transmisión de la señal de radiofrecuencia a través de la red de fibra óptica el cual está compuesto por un transmisor OFDM, que genera una señal de salida en radiofrecuencia. La modulación OFDM es una técnica utilizada en comunicaciones inalámbricas que se basa en la división de la señal en múltiples subportadoras ortogonales. Cada subportadora transporta una porción de la señal y es modulada con información de baja velocidad usando técnicas de modulación como BPSK, QPSK o QAM. Luego, las señales moduladas de baja velocidad se combinan y se transmiten en paralelo como una única señal de alta velocidad. En el caso específico del proyecto mencionado, se utiliza la modulación 16QAM para la transmisión de datos. Esta técnica de modulación permite la transmisión de cuatro bits de información en cada símbolo, lo que mejora la eficiencia espectral de la señal. Posteriormente, esta señal es modulada en fase por medio de un modulador óptico en fase y un láser, produciendo una señal de salida completamente en el dominio óptico.

La señal óptica resultante se transmite a través de un enlace de fibra óptica hasta el receptor RoF, como se muestra en la figura 2.27.

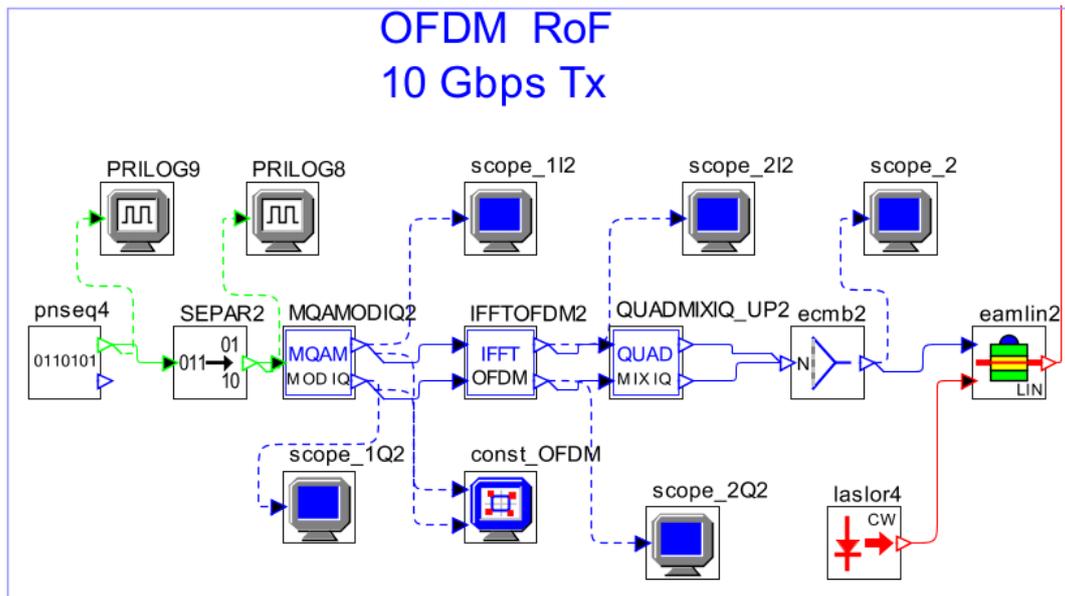


Figura 2.27, Elementos que conforman el servicio de RoF, módulo RoF.

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Velocidad de transmisión | 10 Gbps |
| Modulación 16 QAM1 | 2.5 Gbauds/s amplitud 1AU |
| Tasa de baudios módulo IFFT-OFDM | 2.5 Gbauds/s |
| Subportadoras módulo IFFT-OFDM | 8 |
| Prefijo cíclico módulo IFFT-OFDM | 0,25 |
| Delay módulo IFFT- OFDM | 0 |
| Frecuencia RF | 10 GHz |
| Frecuencia láser | 195.7 THz |
| Longitud de onda | 1530 nm (Banda C) |
| Potencia láser | 10 dBm |
| Sensibilidad de Recepción | -27.77 dBm |
| Modulador electro absorción | Por defecto de la herramienta |

Tabla 2.5, Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación del servicio RoF, módulo RoF.



A continuación, figura 2.28 y 2.29 se observa el comportamiento del sistema respecto al diagrama de ojo y de constelación respectivamente.

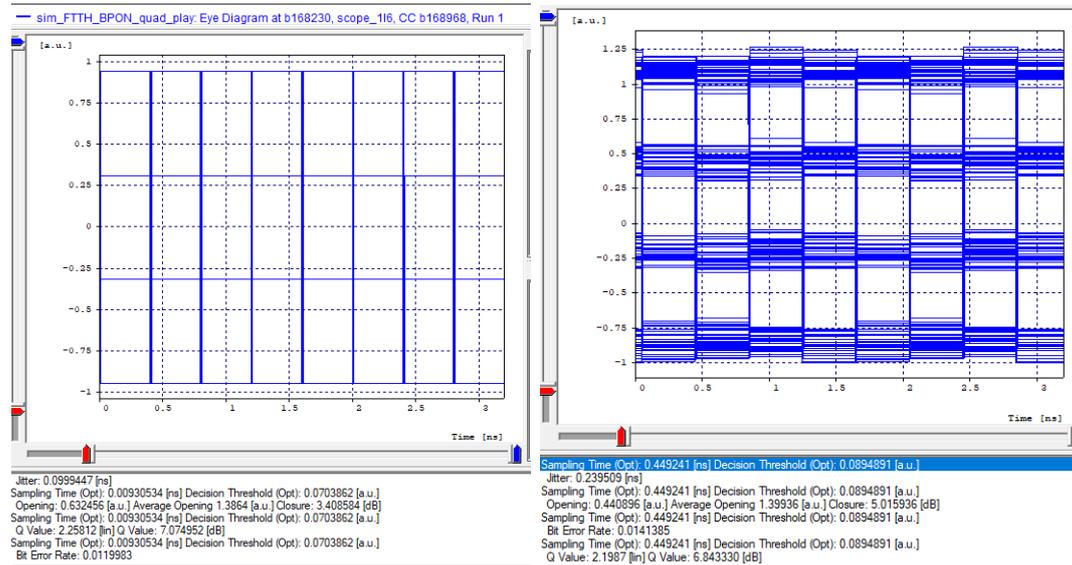


Figura 2.28, Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Quad Play Diagrama de ojo señal RoF.

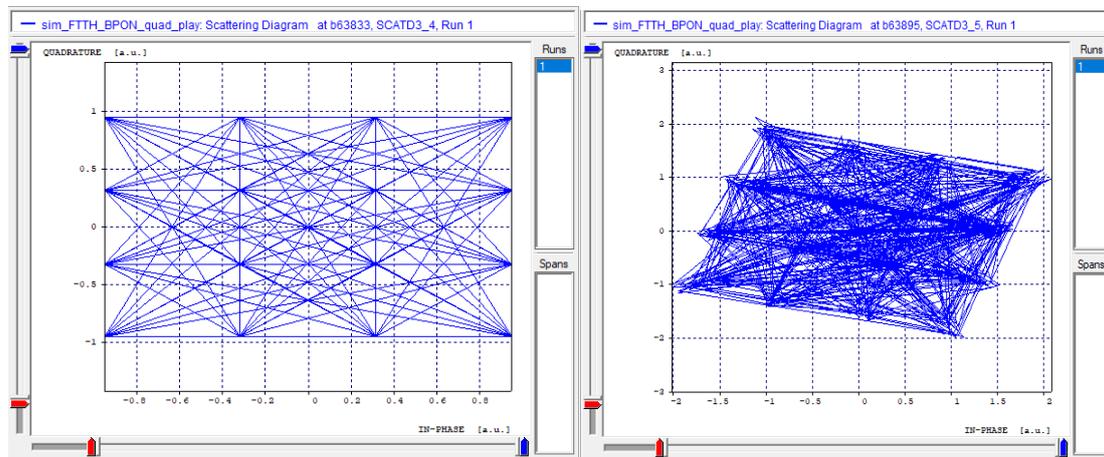


Figura 2.29, Diagrama de Constelación simulado 16-QAM Servicio RoF a la entrada y salida del sistema.

En la figura 2.29 se observa el diagrama de constelación en fase y cuadratura de la señal modulada, dicho diagrama muestra que realmente el modulador está funcionando correctamente ya que concuerda con una constelación de 16QAM antes de entrar al medio de transmisión, así mismo en la parte derecha se encuentra el diagrama de constelación a la salida, la constelación en fase y cuadratura es aceptable, lo que indica que los datos se pueden recuperar correctamente en el receptor. También se puede observar que el diagrama de constelación ha rotado un ángulo de 40° con respecto al diagrama inicial.

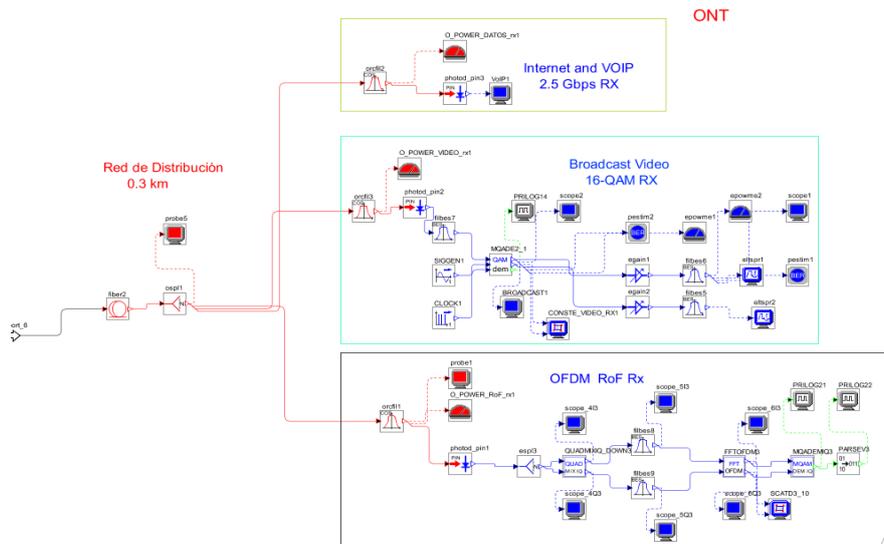


Figura 2.30, Elementos que componen la ONT en la red de acceso FTTH.

En la figura 2.30 se observa los componentes que conforman sólo el módulo de la ONT, la cual es utilizada en la red de acceso FTTH. El primer componente del módulo receptor, es el encargado de recibir la señal óptica y filtrar las interferencias ópticas en la longitud de onda que contiene la información mediante un filtro coseno alzado interno. Posteriormente, la señal óptica se transforma en señal eléctrica a través del fotodetector de la ONT, lo que permite adquirir los servicios *Quadplay*. Este modelo físico de ONT se obtuvo partiendo del modelo *Tripleplay* en sinergia con el modelo OFDM *back to back*, ofrecidos en la librería de ejemplos de la herramienta, como se describió anteriormente en la sección 2.7.

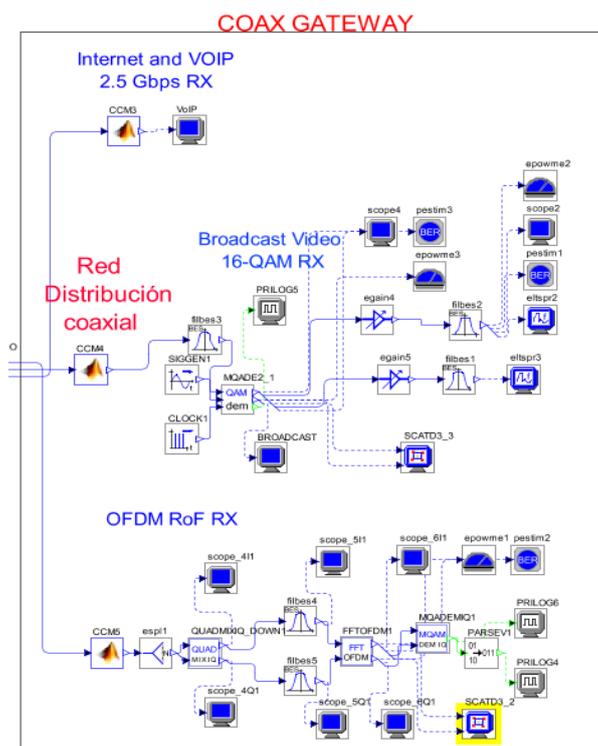


Figura 2.31, Elementos que componen la COAX GATEWAY en la red de acceso NG-HFC.



La figura 2.31 muestra los elementos que componen la *Coaxgateway* para la red de acceso NG-HFC en donde la señal pasa a través del módulo CCM que describe el comportamiento del cable coaxial; Después, a través del filtro coseno alzado interno elimina las interferencias ópticas alrededor de la longitud de onda que contiene la información. Luego, el fotodetector recibe y transforma la señal óptica a una señal eléctrica.

2.8 ENTORNO DE CO-SIMULACIÓN (MÓDULO MATLAB™)

Uno de los objetivos específicos de este proyecto es proponer un módulo que permita la asignación dinámica del espectro óptico en una red de acceso para ofrecer servicios *Quad Play*. El código se generará en la herramienta Matlab™ y se integrará en OptSim para realizar el análisis de la simulación del enlace completo. Para lograr esta integración, se usa la configuración *Custom Components* que ofrece OptSim.

Esta configuración permite ampliar la biblioteca de componentes personalizados de OptSim mediante un programa ejecutable externo que se convierte en un componente OptSim administrado de manera transparente para todas las capacidades del editor y del simulador.

Los componentes personalizados se dividen en dos categorías: *Custom Component* para usar con MATLAB™ (CCM), donde el programa externo es una rutina de Matlab™, y *Custom Component Executable* (CCE), donde el programa externo es un programa ejecutable genérico. Este trabajo de grado, se centra en el diseño adaptado del componente CCM para crear un módulo de asignación dinámica de espectro en la herramienta de simulación Matlab™, además de simular las propiedades de una línea de transmisión coaxial.

2.8.1 ENTORNO DE CO-SIMULACIÓN CABLE COAXIAL

- **Definición de los parámetros del cable coaxial a emplear**

La elección del mejor cable coaxial depende del uso específico y las características requeridas para la aplicación. Ambos cables, RG11 y RG59, son tipos de cables coaxiales que se utilizan comúnmente en aplicaciones de RF y video. Sin embargo, el RG11 tiene una menor atenuación de señal y puede transmitir señales de mayor frecuencia que el RG59. El RG11 se utiliza a menudo en aplicaciones de distribución de señales de video de larga distancia, como en sistemas de televisión por cable. [55]

Por otro lado, el RG59 es un cable coaxial más delgado y flexible que el RG11. Tiene una impedancia característica de 75 ohmios y se utiliza comúnmente en aplicaciones de video de corta distancia, como la conexión de cámaras de seguridad a un grabador de video o a un monitor. [55]



Por lo tanto, si se necesita transmitir señales de alta frecuencia a larga distancia, el RG11 podría ser la mejor opción. Por otro lado, si se trata de una aplicación de video de corta distancia, como la conexión de cámaras de seguridad, el RG59 podría ser más adecuado debido a su flexibilidad y tamaño. En última instancia, la elección del mejor cable coaxial dependerá de las necesidades específicas de la aplicación y de las especificaciones técnicas del cable. [55]

1. Definir los valores de las variables que describen el cable coaxial:
 - 1.1. Radio exterior del cable (*OuterRadius*) en metros.
 - 1.2. Radio interior del cable (*InnerRadius*) en metros.
 - 1.3. Permeabilidad magnética relativa del material conductor (μ_R).
 - 1.4. Constante dieléctrica relativa del material aislante (*EpsilonR*).
 - 1.5. Conductividad eléctrica del material conductor (*SigmaCond*) en Siemens/metro.
 - 1.6. Impedancia característica del cable (Z_0) en ohmios.
2. Definir los valores de las variables que describen la línea de transmisión:
 - 2.1. Frecuencia de operación (*freq*) en Hz.
 - 2.2. Longitud de la línea de transmisión (*linelength*) en metros.
 - 2.3. Potencia de entrada (P_{in}) en vatios.

3. Calcular la impedancia de carga (Z_c) del cable coaxial utilizando la ecuación 2.4:

$$Z_c = \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_R}} \right) * \log \left(\frac{OuterRadius}{InnerRadius} \right) \text{ Ecuación 2.4}$$

4. Calcular la potencia de salida (P_{out}) del cable coaxial utilizando la siguiente fórmula

$$P_{out} = P_{in} * e^{(-Atenuación * Longlinea)} * \left(1 - \frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} \right)^2 \text{ Ecuación 2.5.}$$

5. Calcular la potencia de salida en dB: $P_{out}(dB) = 10 \log(P_{out})$ Ecuación 2.6.

6. Imprimir el resultado en la consola:

- 6.1 La potencia de salida en nano vatios (*nW*)
- 6.2. La impedancia característica del cable coaxial en ohmios(Ω).

La ecuación 2.4 que se menciona para el cálculo de la impedancia característica del cable coaxial se conoce como la fórmula de Wheeler.

Los parámetros físicos de los cables coaxiales RG 11 y RG 59 fueron analizados a través de un código en Matlab™ que simulaban el comportamiento respecto a la atenuación y la potencia entregada en recepción siguiendo los pasos de la definición del cable coaxial. Ver anexo A, B



2.8.2 MÓDULO DE CO-SIMULACIÓN DEL ALGORITMO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA EN LOS ESCENARIOS *FTTH* Y *NG-HFC*

A los modelos de redes de acceso propuestos se les integra un método de asignación dinámica de espectro con la finalidad de determinar el impacto que tiene la inclusión de este recurso sobre las redes, y por medio del escenario de simulación se hace la evaluación de desempeño de acuerdo con los parámetros OPM en el nivel físico, con el fin de cumplir los objetivos planteados. Teniendo en cuenta el análisis de los algoritmos que se presentaron al inicio de este capítulo, se propone el método de Asignación dinámica **Exact-Fit**. El algoritmo seleccionado se encarga de asignar los recursos de ancho de banda, buscando seleccionar el bloque exacto de los slots solicitados por la conexión a partir de los slots disponibles. Si existe un bloque de espectro que coincide con el tamaño exacto de los recursos solicitados, ese espectro es asignado y el proceso se repite. [49]

El algoritmo de asignación dinámica Exact - fit es un método utilizado en telecomunicaciones para asignar recursos de ancho de banda en tiempo real a diferentes servicios que comparten un mismo enlace de comunicación. El objetivo principal del algoritmo es garantizar que todos los servicios tengan la cantidad necesaria de ancho de banda para funcionar correctamente y que no se produzcan congestiones o retrasos en la transmisión de datos. [57]

El algoritmo de asignación dinámica Exact - fit utiliza una técnica conocida como "agrupamiento de usuarios" para asignar los recursos de ancho de banda disponibles. Esto implica agrupar a los usuarios en diferentes clases de servicio, según sus necesidades de ancho de banda. Cada clase de servicio tiene un conjunto de reglas de asignación de recursos que se utilizan para determinar cuánto ancho de banda se asigna a cada usuario. [57]

Una vez que se han agrupado los usuarios en clases de servicio, el algoritmo de asignación dinámica Exact - fit realiza un seguimiento del tráfico de datos en tiempo real y ajusta la asignación de ancho de banda en consecuencia. Si un servicio está utilizando más ancho de banda del asignado, el algoritmo puede reducir la asignación de ancho de banda a otros servicios menos críticos para asegurarse de que todos los servicios tengan acceso a los recursos necesarios. [57]

El funcionamiento del algoritmo de asignación dinámica Exact - fit se puede describir en los siguientes pasos:

- Agrupación de usuarios: El primer paso del algoritmo es agrupar a los usuarios en diferentes clases de servicio según sus necesidades de ancho de banda. Cada clase de servicio tiene un conjunto de reglas de asignación de recursos que se utilizan para determinar cuánto ancho de banda se asigna a cada usuario.



- Asignación inicial de ancho de banda: Después de la agrupación, se realiza una asignación inicial de ancho de banda a cada usuario en función de la clase de servicio a la que pertenece. Esta asignación se basa en las necesidades de ancho de banda previstas para cada clase de servicio.
- Actualización de la asignación de ancho de banda: Finalmente, la asignación de ancho de banda se actualiza en tiempo real según los ajustes realizados en el paso anterior. Esto asegura que la asignación de recursos sea siempre óptima y adaptada a las necesidades cambiantes de los usuarios en el enlace de comunicación. [57]

El nuevo diseño de la red permite adaptarse a las necesidades de los usuarios, considerando el agrupamiento y la asignación de ancho de banda que cada uno de ellos requiere. Por ejemplo, si una ONT solicita el servicio de video, el algoritmo es capaz de asignar los slots necesarios para transmitir solo ese servicio de manera eficiente, lo que se traduce en un uso más efectivo del espectro óptico. De esta forma, el algoritmo explora todas las posibles posiciones en la rejilla espectral para garantizar la transmisión de servicios específicos solicitados por cada ONT. En consecuencia, se mejora la calidad del servicio proporcionado a los usuarios y se utiliza de manera más efectiva el espectro óptico disponible en la red.

A continuación, se describe el proceso para crear el algoritmo en una rutina de Matlab™ a través de los archivos de co-simulación que se muestran en la figura 2.32.

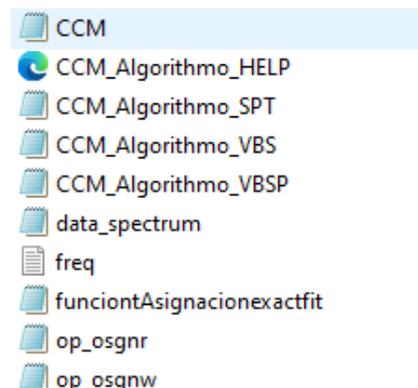


Figura 2.32, Archivos co-simulación Matlab™ Optsim

En la figura 2.32 se muestra la función de los archivos generados por OptSim al crear el componente de Co-simulación. Uno de ellos es el archivo CCM, que es un script de código en Matlab™ que contiene la rutina principal del algoritmo diseñado para la asignación dinámica del espectro óptico. Los archivos DAT, por su parte, contienen el *optical playback* de las señales de los servicios QUADPLAY de la oficina central y son necesarios para el correcto funcionamiento del algoritmo.



Además, se encuentra el archivo CCM_Algoritmo_VBSP, el cual se utiliza para la pre-simulación y se encarga de preparar todos los parámetros, entradas y salidas ópticas del componente. También define el tipo de datos de la señal óptica que puede leer OptSim y la potencia pico promedio de la señal. Este archivo es importante para garantizar una integración adecuada entre las herramientas Matlab™ y OptSim, y prepara el archivo necesario para el componente de Co-simulación. La figura 2.33, denota el proceso a través del Pseudocódigo que presenta la lógica del método de asignación dinámica adaptado para sistemas *Quadplay*; comienza definiendo los parámetros necesarios para la ejecución de los servicios *Quad Play* de video y Datos – VoIP y el servicio de RoF. El parámetro "reset" se utiliza para reiniciar el espectro y los estados de simulación almacenados en archivos con formato .txt. Cada simulación guarda el estado de ocupación del espectro en tres archivos distintos: "status.txt", "statusUsuarios.txt" y "dataspectrum.txt", que contienen información sobre el estado de los índices de los slots ocupados, las frecuencias ocupadas y las frecuencias asignadas respectivamente. El siguiente archivo importante es op_osgnr, el cual permite leer un archivo de datos OptSim obtenido de la simulación de un componente óptico. De esta manera, es posible obtener información relevante de la señal óptica para su procesamiento y análisis en Matlab™. Finalmente, se encuentra el archivo op_osgnw, el cual escribe un archivo de datos de señal a partir de variables Matlab™ que contienen la información de la señal. Este archivo es crucial para la retroalimentación de la información procesada en Matlab™ hacia OptSim y su posterior utilización en la simulación de los componentes ópticos.

```
1 BEGIN COSIMULACION
2   LOAD Señales
3   SET variables de entorno
4     ancho_slot;
5     tamaño_rejilla;
6     frecuencia_referencia;
7     indice_ont;
8   if Reset == 1
9     PROCESS reset sistema
10      Eliminar archivos de estados de índices de los slots ocupados;
11      Eliminar archivos de frecuencias ocupadas y asignadas;
12      Eliminar variables de entorno;
13    END
14  END
15
16  if servicio == quad_play
17    for ancho_slot = [12.5 25 100];
18      FUNTION asignacion de frecuencias;
19    END
20  else servicio = video
21    ancho_slot = 25;
22    FUNTION asignacion de frecuencias;
23  else servicio = voip_internet
24    ancho_slot = 12.5;
25    FUNTION asignacion de frecuencias;
26  else servicio = rof
27    ancho_slot = 100;
28    FUNTION asignacion de frecuencias;
29  END
30
31  PROCESS sobre escribir el espectro optico
32    FUNTION op_osgnr(señal_asignada) de optsim para cargar el estado del espectro;
33    FUNTION op_osgnw(nueva señal) de optsim para sobrescribir el espectro;
34  END
35 END
```

Figura 2.33. Pseudocódigo lógica método de asignación.



A continuación, la acción que se ejecuta depende de los parámetros. Si el usuario solicita tanto VoIP como vídeo, el algoritmo asignará primero VoIP y luego vídeo.

Con esto, se completa el ciclo del código tanto para Datos - VoIP, vídeo y RoF. Durante este proceso, se ejecuta el archivo CCM, que es un archivo Matlab™ que contiene la lógica para la asignación de frecuencias, tal como se muestra en la Figura 2.34. Este archivo asigna la señal correspondiente para el envío del servicio solicitado por el usuario, según un índice de frecuencias.

```
84  FUNTION EXACTFIT
85  LOAD archivos de estados de indices de slots ocupados
86  DEFINITION vectores de indices disponibles;
87  if tamaño_rejilla == 16
88  |   respuesta_slots_disponible = [-1 -1 -1 -1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -1 -1 -1];
89  |   else
90  |   respuesta_slots_disponible = zeros(división de la grilla);
91  |   END
92
93
94  if cantidad de slots_requerido es = 1
95  |   for cada indice verificar la respuesta_slots_disponible
96  |   |   verificar si el primero del lado izquierdo esta disponible
97  |   |   RETURN al primer slot que cumpla disponibilidad
98  |   else if cantidad de slots_requerido es = 2
99  |   |   for cada par consecutivo de indices verificar la respuesta_slots_disponible
100  |   |   |   verificar si los dos slot del lado izquierdo estan disponible
101  |   |   |   RETURN al primer par de slot que cumpla disponibilidad
102  |   |   else if cantidad de slots_requerido es = 3
103  |   |   |   for cada terna consecutivo de indices verificar la respuesta_slots_disponible
104  |   |   |   |   verificar si los tres slot del lado izquierdo estan disponible
105  |   |   |   |   RETURN a la primera terna de slot que cumpla disponibilidad
106  |   |   END
107  |   RECORD archivos de estado de indices de slots_ocupados
108  |   RETURN respuesta_slots_disponible
109  END
```

Figura 2.34, Pseudocódigo función Exact-Fit

La figura 2.35 muestra la integración del bloque CCM, el cual contiene la co-simulación que modela el método de asignación dinámica de espectro. Esta lógica está escrita en lenguaje Matlab™ y se integra con el entorno OptSim a través del *tool* CCM *designer*. En este *tool* se configuran los parámetros de entrada y salida, así como las variables y archivos necesarios para la co-simulación que comprenden la lógica del algoritmo diseñado. De esta forma, se logra una correcta integración entre Matlab™ y OptSim para llevar a cabo la simulación del sistema de asignación dinámica de espectro.

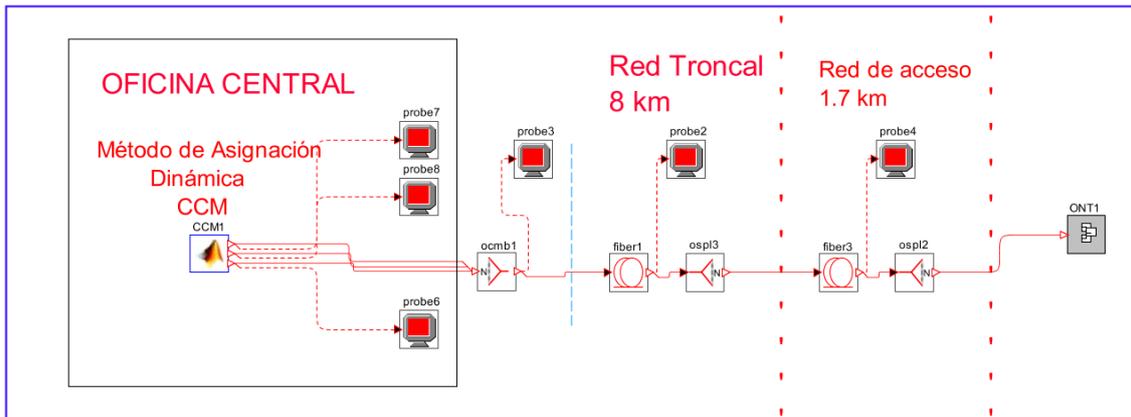


Figura 2.35, Esquema de la inclusión del algoritmo en la red por medio de CCM en la red FTTH.

Este capítulo permitió profundizar en diferentes temas relevantes para la evaluación del desempeño de las redes FTTH y NG-HFC en sistemas *Quadplay* que emplean un método de asignación dinámica de espectro. En primer lugar, se abordó la metodología de desarrollo que bajo el que se rige el trabajo de investigación, se describió la metodología de simulación empelada, así como las herramientas utilizadas para llevar a cabo las simulaciones a nivel físico de las redes en materia.

Posteriormente, se analizaron en detalle las distintas técnicas de asignación dinámica de espectro para redes elásticas en sistemas FTTH y NG-HFC que ofrecen servicios *QuadPlay* a sus usuarios; A su vez se alcanzó profundizar en temas relacionados a la comprensión del desempeño del canal óptico de acuerdo con OPM.

Finalmente, se planteó un modelo lógico y físico de las redes FTTH y NG-HFC para sistemas *Quadplay*, lo que permitió tener una visión completa de las características y elementos que conforman estas redes y su interacción con los diferentes servicios que se ofrecen.

Todo lo anterior sentó las bases para el desarrollo del capítulo tres, en el cual se llevó a cabo la evaluación del desempeño de las redes FTTH y NG-HFC en sistemas *Quadplay* que emplean un método de asignación dinámica de espectro para la prestación de servicios.



CAPÍTULO III Evaluación de los parámetros *OPM* en la red *NG-HFC* y *FTTH* sobre el servicio de *Quad Play* haciendo uso del método de asignación dinámica del espectro.

Una vez detallado los componentes del marco teórico y la definición de los escenarios de simulación, se han clasificado los parámetros que influyen en la calidad de la señal óptica en dos categorías: parámetros de monitoreo (BER, Jitter, Factor Q, Potencia Óptica en Recepción) y degradaciones ópticas (atenuación, dispersión cromática, diafonía). En este trabajo de grado, se han seleccionado estos parámetros generales para su análisis: la BER y el Factor Q, que son dos de los parámetros de monitoreo más relevantes para medir la influencia de la dispersión cromática, Jitter y potencia óptica para evaluar la atenuación en la fibra óptica,

Estos parámetros son cruciales para entender dos de las principales degradaciones ópticas, que varían según algunos parámetros de la red *FTTH* y *NG-HFC*, tales como la velocidad de transmisión, la potencia de los transmisores, el tipo de fibra y el número de ONT (1, 2, 4, 8, 16), los cuales se han incluido en los diferentes escenarios de simulación.

El objetivo del trabajo es determinar el comportamiento de la red *FTTH* y *NG-HFC*, para lo cual se han implementado los diferentes escenarios de simulación y se han analizado los resultados obtenidos, a fin de llegar a las correspondientes conclusiones.

3.1 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En el trabajo de investigación, se buscó cumplir con los objetivos planteados mediante la creación de diferentes escenarios de redes *FTTH* y *NG-HFC*. En estas redes se varió la distancia del enlace, la velocidad de transmisión y la cantidad de usuarios finales, con el objetivo de evaluar el desempeño de las redes bajo diferentes condiciones. Para lograr esto, se diseñaron varios escenarios de redes *FTTH* con diferentes tasas de transmisión y distancias de enlace, que iban desde 2.5Gbps y 10Gbps hasta distancias de 10Km y 20Km. Además, se consideró la cantidad de usuarios finales, representados por valores de 1,2,4,8 y 16 ONTs. Por otro lado, se creó una topología de red *NG-HFC* con características similares a las redes *FTTH*, incluyendo tasas de transmisión de 2.5Gbps y 10Gbps y distancias de 10Km y 20Km. Además, se evaluó la cantidad de usuarios finales que podrían ser configurados en esta red, con valores de 1,2,4,8 y 16.

Es importante mencionar que para las distancias dentro del desarrollo de este trabajo se configuraron los escenarios de simulación respetando las métricas que establece la ITU-T G.984 donde determina los límites de distancia para las



redes PON basadas en GPON. Estos límites de distancia se refieren a la longitud máxima de la fibra óptica permitida entre el OLT y la ONU, y dependen de la velocidad de transmisión de datos y del tipo de fibra óptica utilizada.

Para una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps, el límite de distancia para una red GPON es de 20 kilómetros, dependiendo del tipo de fibra óptica utilizada. Estos límites de distancia se aplican tanto para la transmisión de datos descendente, como para la transmisión ascendente. Es importante tener en cuenta que estos límites de distancia son solo una guía general y pueden variar dependiendo de las condiciones específicas de la red, como la calidad de la fibra óptica, la cantidad de divisores ópticos pasivos utilizados y la topología de la red.

Finalmente, a las topologías de redes descritas anteriormente se les añadió un módulo de asignación dinámica de espectro para verificar su desempeño por medio de los parámetros ópticos OPM.

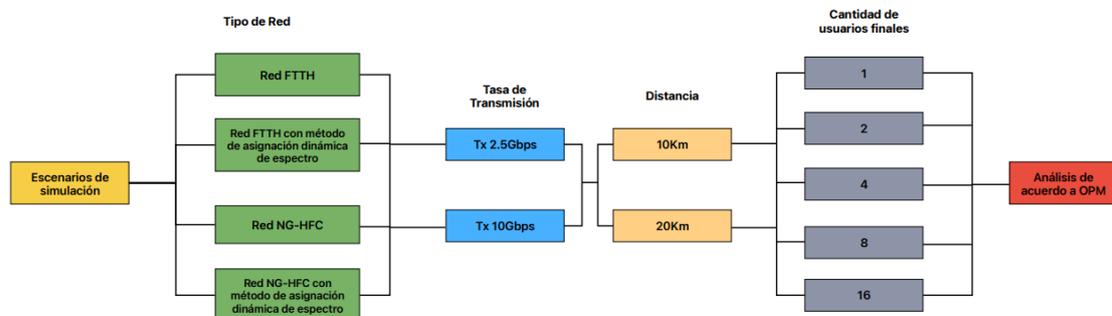


Figura 3.1, Definición de los escenarios a simular

ANÁLISIS DE RESULTADOS, TABLAS Y GRÁFICAS DE LA INCIDENCIA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA, ATENUACIÓN Y PARÁMETROS OPM.

Cuando se trabaja con velocidades de transmisión de datos de 10 Gbps o superiores, se observa una penalidad en la máxima distancia alcanzada, independientemente del tipo de fibra utilizado. Esto se debe a que, a estas velocidades, los efectos de la dispersión cromática se vuelven más significativos y degradan el desempeño del sistema de manera importante.

La penalidad es la reducción en la distancia máxima que se puede transmitir una señal óptica a través de una fibra óptica debido a la degradación de la señal causada por la dispersión cromática. Esta degradación reduce la calidad de la señal y hace que sea más difícil recuperar la información original. La penalidad puede ser reducida utilizando técnicas de compensación de dispersión cromática, como la dispersión compensada en fibra (DCF), la dispersión compensada electrónicamente (EDC). Sin embargo, incluso con estas técnicas, existe una penalidad residual debido a la degradación de la señal causada por la dispersión cromática. La dispersión cromática es causada por la variación de la velocidad de propagación de diferentes longitudes de onda de la señal óptica. Esto puede llevar a una distorsión de la señal en la recepción, lo que afecta la calidad de la señal. La dispersión cromática puede ser especialmente



problemática en redes de larga distancia, como las que desarrollaron en los escenarios de simulación a 10 km y 20 km, y puede limitar la tasa de transmisión de datos que se puede lograr a través de la fibra. En un enlace de fibra óptica con una distancia de 10 km o menos, es posible que la dispersión cromática no tenga un impacto significativo en la calidad de la señal. Sin embargo, en enlaces más largos de 20 km o más, la dispersión cromática puede provocar una atenuación significativa de la señal y distorsionar la forma de la señal, lo que puede afectar la transmisión de datos y la calidad de la misma. Por lo tanto, es necesario compensar la dispersión cromática en enlaces de fibra óptica de mayor longitud, como los de 20 km, mediante técnicas como la dispersión cromática compensada por fibra (DCF) o la dispersión cromática compensada electrónicamente (EDC). Como se definió anteriormente estas técnicas se utilizan para minimizar la penalidad, la dispersión cromática y asegurar que la calidad de la señal no se vea afectada, permitiendo así una transmisión de datos confiable y de alta velocidad a través de la red de fibra óptica, no obstante, en este trabajo de investigación no se centrará en desarrollar sistemas de compensación.

Por otro lado, la atenuación es una disminución en la potencia de la señal óptica a medida que viaja a través de la fibra. La atenuación es causada por varias fuentes, como la absorción y la dispersión de la señal óptica. La atenuación también puede ser más pronunciada en redes de larga distancia, y puede limitar la distancia a la que se pueden transmitir señales ópticas sin necesidad de regeneración de la señal.

En la siguiente sección se recopilarán los datos para cada uno de los escenarios de simulación para los servicios de Internet, Datos/VoIP, Broadcast Video y Radio sobre frecuencia, para posteriormente hacer su respectivo análisis; se recopilaron 4256 datos producto de las correspondientes simulaciones de las configuraciones planteadas en la figura 3.1.

3.1.1 Escenario red FTTH a 10Km

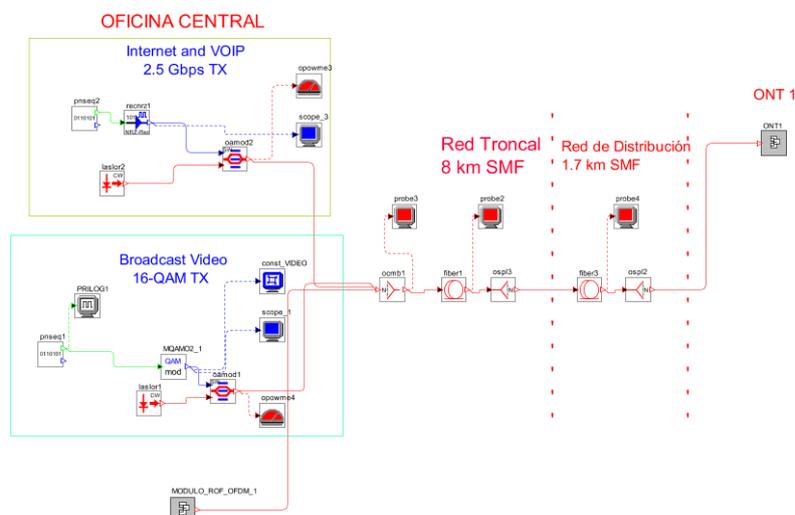


Figura 3.2 Escenario red FTTH con 1 ONT a una distancia de 10 Km.



En la figura 3.2 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 1 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

Las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red FTTH a una distancia de 10Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 ONT respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|---------------------------|--------|------------|--|--------|
| Red FTTH | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | |
| 1 | 21.2312 | 3.7858E-30 | 0.08026 | -15.144 | 6.0206 | 2.275E-02 | 0.0802 | -15.166 | 7.8497 | 0.006697 | 1.09 | -17.023 | 6.8843 | 1.38E-02 | 0.003995 | -12.77 |

Tabla 3.1 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 1 ONT.

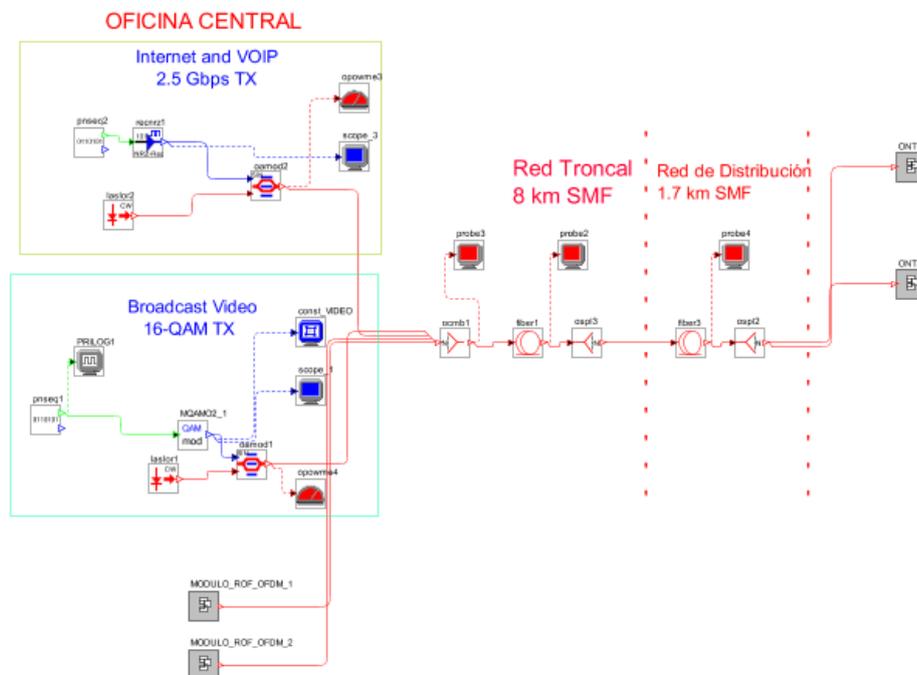


Figura 3.3 Escenario red FTTH 2 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.3 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 2 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 21.2074 | 7.10E-30 | 0.0818 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023666 | -15.166 | 7.8338 | 0.006882 | 1.1428 | -17.023 | 6.4418 | 1.79E-02 | 0.003797 | -12.77 |
| 2 | 21.2761 | 1.18E-30 | 0.0826 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023246 | -15.166 | 7.8317 | 0.006885 | 1.0856 | -17.023 | 6.8796 | 1.38E-02 | 0.003848 | -12.77 |

Tabla 3.2 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 2 ONT.

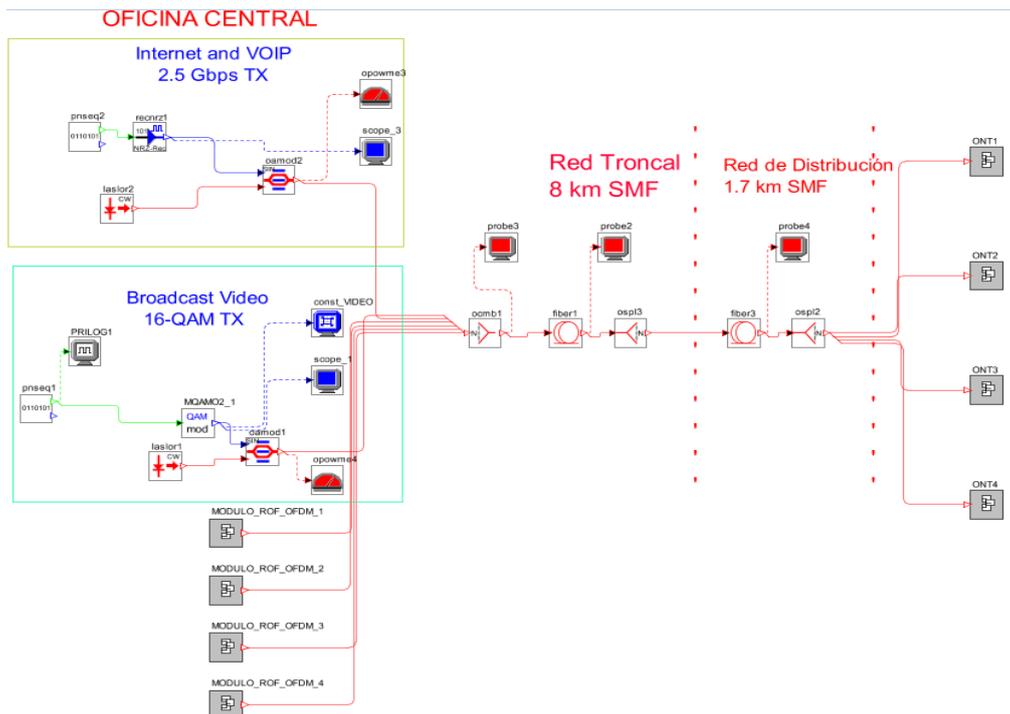


Figura 3.4 Escenario red FTTH 4 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.4 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 4 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|---------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | VÍdeo transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 21.2219 | 6.22E-30 | 0.0802 | -15,161 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023235 | -15,161 | 7.8102 | 0.006933 | 1.08006 | -17.023 | 6.7912 | 0.01438 | 0.00378 | -12.77 |
| 2 | 21.2362 | 2.84E-30 | 0.0814 | -15,161 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02355 | -15,161 | 7.8251 | 0.06956 | 1.0177 | -17.023 | 6.5566 | 0.01704 | 0.03912 | -12.77 |
| 3 | 21.1935 | 1.14E-29 | 0.08699 | -15,161 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023551 | -15,161 | 7.8702 | 0.006724 | 1.265 | -17.023 | 6.9717 | 0.01311 | 0.004014 | -12.77 |
| 4 | 21.2396 | 2.91E-30 | 0.08463 | -15,161 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02362 | -15,161 | 7.8086 | 0.00706 | 1.2044 | -17.023 | 6.7922 | 0.01476 | 0.00372 | -12.77 |

Tabla 3.3 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 4 ONT.

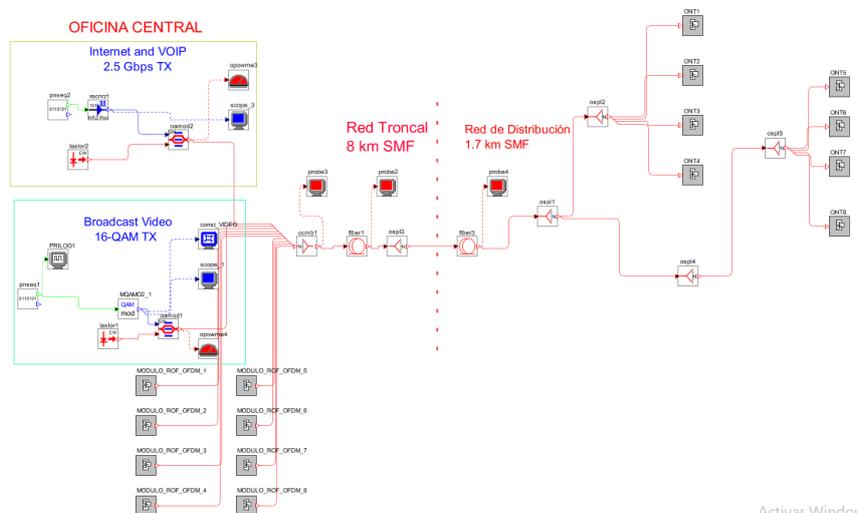


Figura 3.5 Escenario red FTTH 8 ONT a una distancia de 10 Km.



En la figura 3.5 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 8 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|-----------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Vídeo transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) |
| 1 | 21.2128 | 1.45E-29 | 0.08422 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02336 | -18.179 | 7.8221 | 0.07035 | 1.2858 | -17.023 | 6.6579 | 0.01568 | 0.0038 | -15.765 |
| 2 | 21.1969 | 2.54E-29 | 0.08434 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023657 | -18.179 | 7.7992 | 0.0723 | 1.2346 | -17.023 | 6.3051 | 0.01964 | 0.003943 | -15.764 |
| 3 | 21.2307 | 1.61E-29 | 0.08603 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023653 | -18.179 | 7.8329 | 0.06813 | 1.1173 | -17.023 | 6.7995 | 0.0145658 | 0.004216 | -15.764 |
| 4 | 21.1634 | 3.85E-29 | 0.0826 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023561 | -18.179 | 7.8768 | 0.006695 | 1.0975 | -17.023 | 6.6913 | 0.01541 | 0.0039 | -15.764 |
| 5 | 21.1722 | 3.56E-29 | 0.0851 | -18.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023557 | -21.179 | 7.8084 | 0.005827 | 1.2962 | -17.023 | 6.4265 | 0.0180637 | 0.0038 | -18.785 |
| 6 | 21.2941 | 1.15E-30 | 0.0828 | -18.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023502 | -21.179 | 7.8279 | 0.006871 | 1.0694 | -17.023 | 6.9157 | 0.01339 | 0.003976 | -18.773 |
| 7 | 21.1811 | 2.13E-29 | 0.08219 | -18.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02367 | -21.179 | 7.8113 | 0.006973 | 1.1752 | -17.023 | 6.9264 | 0.01351 | 0.003818 | -18.766 |
| 8 | 21.0862 | 2.28E-29 | 0.0836 | -18.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02344 | -21.179 | 7.8945 | 0.006548 | 1.2372 | -17.023 | 6.9439 | 0.01307 | 0.004073 | -18.774 |

Tabla 3.4 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 8 ONT.

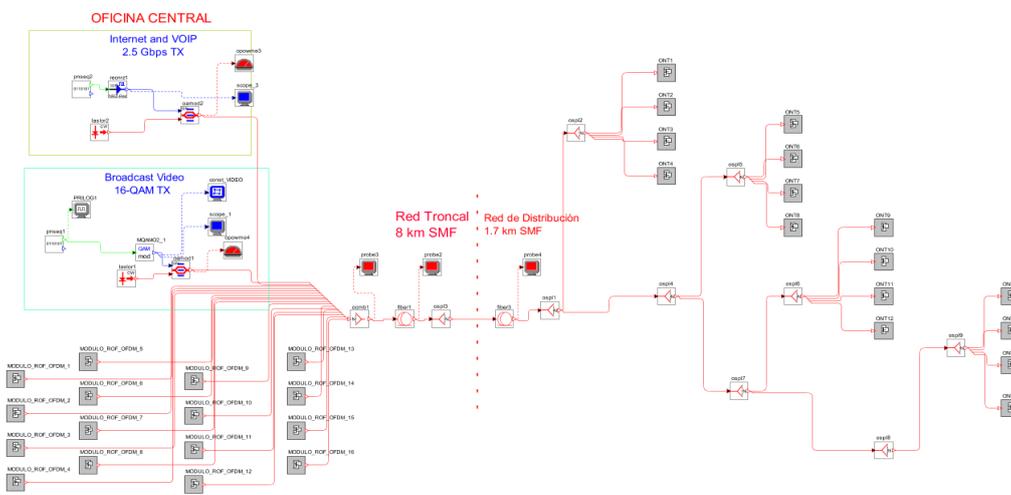


Figura 3.6 Escenario red FTTH 16 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.6 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 16 ONT a una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|---------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Vídeo transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en Rx(dBm) |
| 1 | 21.2365 | 5.07E-30 | 0.07906 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02362 | -18.179 | 7.8659 | 6.60E-03 | 1.03907 | -17.023 | 6.7749 | 0.015 | 0.004066 | -15.766 |
| 2 | 21.2922 | 1.58E-30 | 0.08208 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02371 | -18.179 | 7.8463 | 6.84E-03 | 1.04033 | -17.023 | 7.2047 | 0.011 | 0.00374 | -15.766 |
| 3 | 21.2604 | 2.75E-30 | 0.08558 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02355 | -18.179 | 7.8792 | 0.006613 | 1.2675 | -17.023 | 6.8772 | 0.01551 | 0.003672 | -15.766 |
| 4 | 21.1891 | 1.99E-29 | 0.08229 | -15.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02358 | -18.179 | 7.8211 | 0.006934 | 1.1311 | -17.023 | 6.8092 | 0.01452 | 0.003876 | -15.766 |
| 5 | 21.8231 | 8.00E-30 | 0.07996 | -18.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02347 | -21.179 | 7.86 | 0.006713 | 1.0383 | -20.023 | 6.4764 | 0.01769 | 0.003845 | -18.766 |
| 6 | 21.1906 | 9.35E-30 | 0.08216 | -18.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02359 | -21.179 | 7.8186 | 0.006657 | 1.2137 | -20.023 | 7.32 | 0.01042 | 0.003504 | -18.766 |
| 7 | 21.1417 | 2.81E-29 | 0.0825 | -18.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02361 | -21.179 | 7.8424 | 0.006911 | 1.2434 | -20.023 | 6.2075 | 0.0206 | 0.003734 | -18.774 |
| 8 | 21.1431 | 3.25E-29 | 0.08313 | -18.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02345 | -21.179 | 7.8145 | 0.007069 | 1.08053 | -20.023 | 6.6485 | 0.01577 | 0.003755 | -18.767 |
| 9 | 21.2023 | 1.89E-29 | 0.07908 | -21.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02337 | -24.179 | 7.8485 | 0.006731 | 1.1257 | -23.023 | 6.5769 | 0.01657 | 0.003877 | -21.764 |
| 10 | 21.0818 | 3.40E-29 | 0.08608 | -21.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02314 | -24.179 | 7.8522 | 0.006766 | 1.3441 | -23.023 | 6.8798 | 0.01365 | 0.003639 | -21.767 |
| 11 | 21.0636 | 1.24E-29 | 0.081164 | -21.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02319 | -24.179 | 7.7713 | 0.007305 | 1.3205 | -23.023 | 6.8237 | 0.01412 | 0.003779 | -21.768 |
| 12 | 21.1979 | 1.68E-29 | 0.08173 | -21.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02346 | -24.179 | 7.818 | 0.006881 | 1.1639 | -23.023 | 6.9531 | 0.01303 | 0.003996 | -21.771 |
| 13 | 20.9155 | 9.74E-29 | 0.08154 | -24.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.0235 | -27.179 | 7.7382 | 0.007114 | 1.1719 | -26.023 | 6.5869 | 0.01651 | 0.00463 | -24.779 |
| 14 | 20.8097 | 3.21E-28 | 0.07928 | -24.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02307 | -27.179 | 7.8902 | 0.006623 | 1.3187 | -26.023 | 7.1196 | 0.0188 | 0.004722 | -24.769 |
| 15 | 21.1658 | 1.72E-29 | 0.08408 | -24.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02343 | -27.179 | 7.752 | 0.007112 | 1.0993 | -26.023 | 6.7937 | 0.01464 | 0.004172 | -24.764 |
| 16 | 20.9303 | 4.48E-29 | 0.0822 | -24.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02317 | -27.179 | 7.7272 | 0.007276 | 1.3492 | -26.023 | 7.1673 | 0.01146 | 0.004391 | -24.774 |

Tabla 3.5 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 16 ONT. FTTH 10Km.

Las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, para los usuarios finales, hacen parte del análisis de comportamiento de los sistemas, debido a que fue indispensable la búsqueda de un escenario el cual permitiera un amplio estudio, con respecto a los parámetros OPM, y configuración de su arquitectura.



Para los datos de la BER del escenario con una sola ONT con valor $3,7858E-30$, con respecto a los escenarios con 2,4,8 y 18 ONT.

Para 2 ONT: $4,14E-30$:

$$\text{incremento porcentual} = \left(\left(\frac{4,14E-30 - 3,7858E-30}{3,7858E-30} \right) * 100\% \right) = 9,6\% \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Para 4 ONT: $3,73E-30$:

incremento porcentual = $-1,5\%$

Para 8 ONT: $2,30E-29$:

incremento porcentual = $506,1\%$

Para 16 ONT: $1,89E-29$:

incremento porcentual = $399,6\%$

Para los anteriores datos se establece que para el subsistema Internet/VoIP en promedio la mejor BER es cuando el sistema tiene 4 ONT, sin embargo, el análisis posterior entre escenarios FTTH frente NG-HFC con y sin asignación dinámica de espectro, se va a desarrollar para los sistemas que presenten arquitecturas que contengan configuraciones simuladas semejantes a las ofrecidas por los proveedores de servicios de telecomunicaciones, por lo que se selecciona para el análisis el escenario de 16 ONT, el cual presenta niveles de *splitter* y mejor promedio de desempeño que el escenario de 8 ONT, que también presenta niveles de *Splitter*.

3.1.2 Escenario red FTTH a 20Km

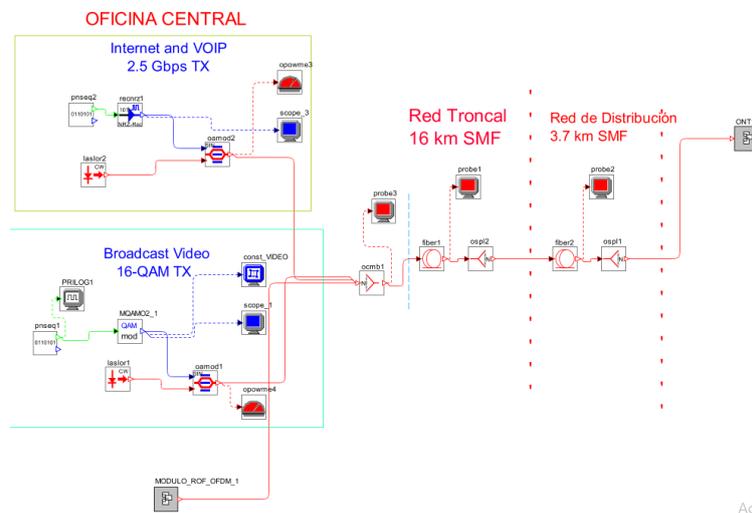


Figura 3.7 Escenario red FTTH con 1 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.7 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 1 ONT a una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

Las tablas 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno



de los servicios en los escenarios de una red FTTH a una distancia de 20Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 ONT respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2,5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 21.0742 | 3.5628E-29 | 0.085384 | -25.144 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02352 | -25.166 | 7.8256 | 0.006763 | 0.3845 | -27.023 | 6.7729 | 1.49E-02 | 0.246 | -22.77 |

Tabla 3.6 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 1 ONT.

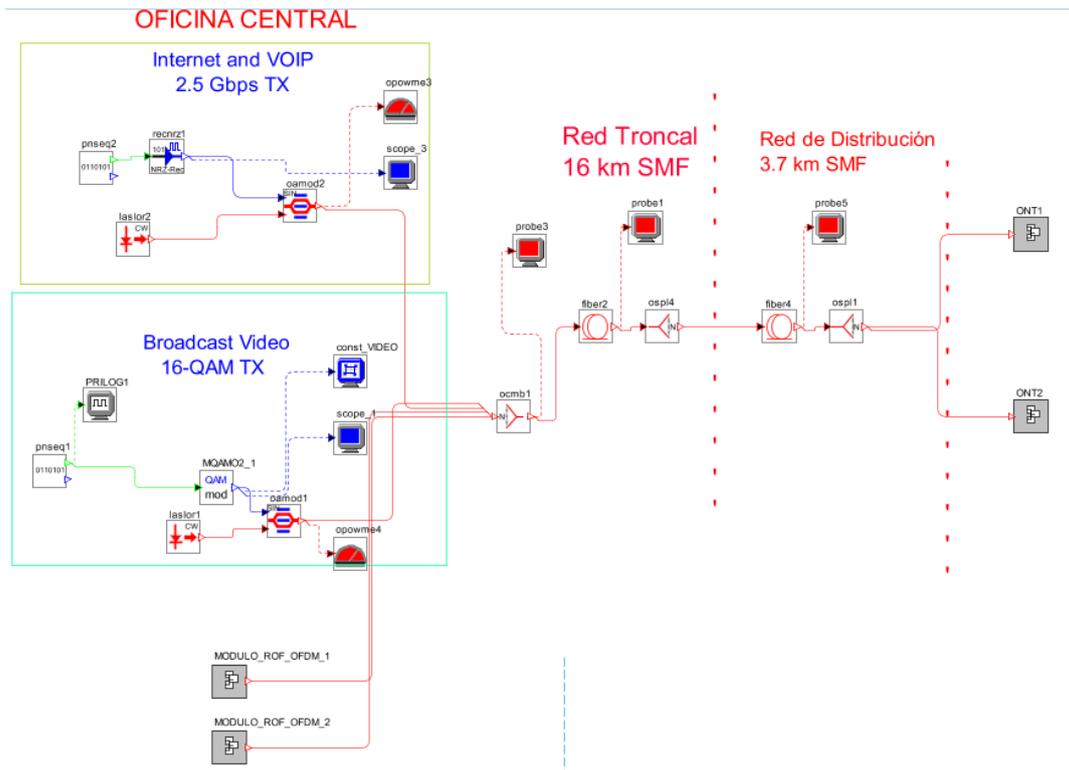


Figura 3.8 Escenario red FTTH con 2 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.8 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 2 ONT a una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2,5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 21.1216 | 4.38E-29 | 0.083129 | -25.144 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235051 | -25.166 | 7.7971 | 0.006934 | 1.1838 | -27.023 | 6.8863 | 1.39E-02 | 0.2432 | -22.77 |
| 2 | 21.0725 | 4.26E-29 | 0.083 | -25.144 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235698 | -25.166 | 7.7846 | 0.007073 | 1.1134 | -27.023 | 7.2152 | 0.0109 | 0.231334 | -22.77 |

Tabla 3.7 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 2 ONT.

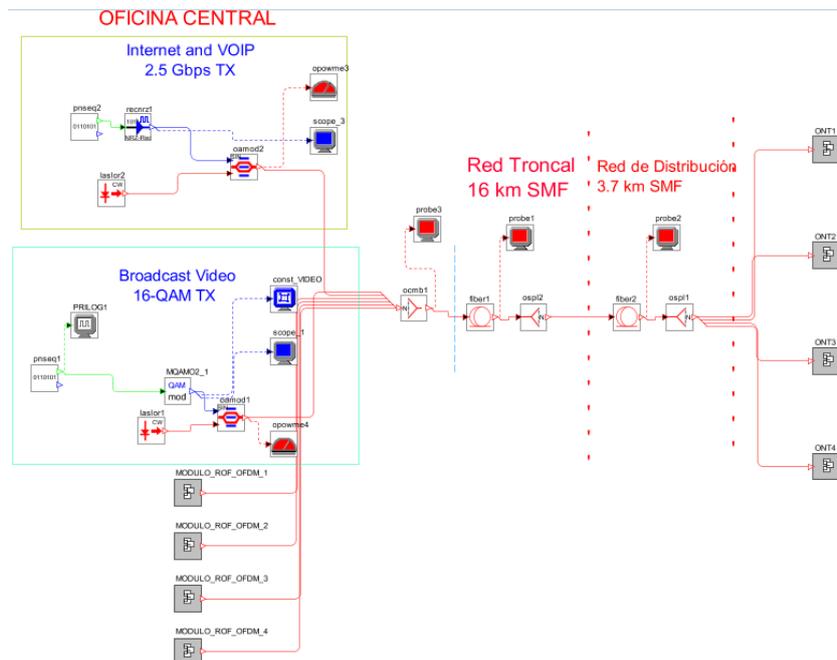


Figura 3.9 Escenario red FTTH con 4 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.9 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 4 ONT a una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 21.0421 | 2.63E-29 | 0.0801 | -25.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.2366227 | -25.179 | 7.732 | 0.007284 | 1.0044 | -27.023 | 6.672 | 1.56E-02 | 0.1871 | -22.772 |
| 2 | 21.064 | 4.07E-29 | 0.08017 | -25.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.235558 | -25.179 | 7.7822 | 0.007221 | 1.3 | -27.023 | 6.6426 | 0.01584 | 0.2023 | -22.759 |
| 3 | 20.9615 | 4.75E-29 | 0.08842 | -25.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.235379 | -25.179 | 7.9024 | 0.006574 | 1.235 | -27.023 | 6.9658 | 0.013 | 0.2206 | -22.766 |
| 4 | 21.092 | 3.99E-29 | 0.08119 | -25.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235964 | -25.179 | 7.7215 | 0.007525 | 1.2407 | -27.023 | 6.7 | 0.01541 | 0.1736 | -22.772 |

Tabla 3.8 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 4 ONT.

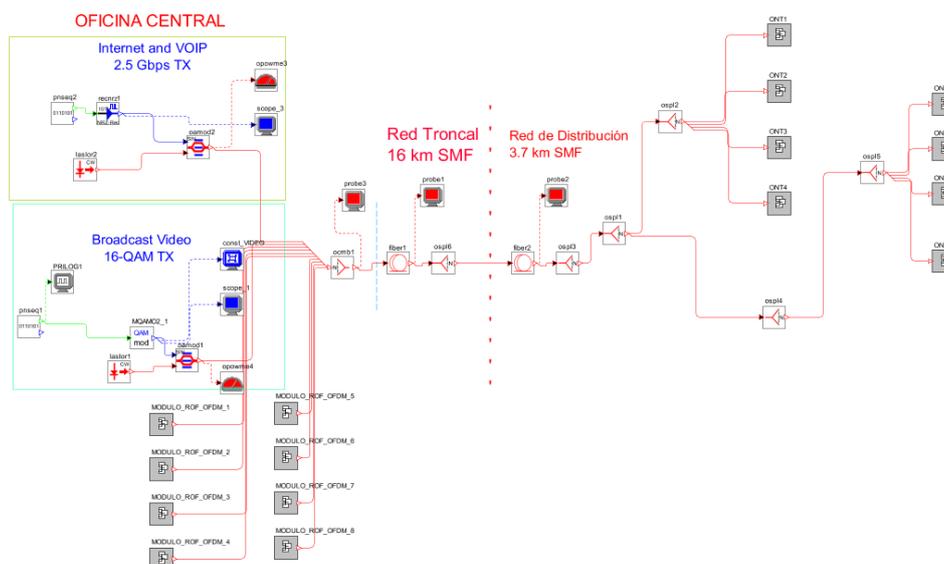


Figura 3.10, Escenario red FTTH con 8 ONT a una distancia de 20 Km.



En la figura 3.10 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 8 ONT a una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.8 | 4.14E-28 | 0.082296 | -31.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0236317 | -31.176 | 7.7625 | 7.29E-02 | 0.3904 | -33.023 | 6.7615 | 1.51E-02 | 0.2294 | -28.767 |
| 2 | 20.7384 | 2.358E-27 | 0.0799 | -31.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0236558 | -31.176 | 7.8066 | 0.008135 | 0.3888 | -33.023 | 6.02 | 0.02275 | 0.2488 | -28.764 |
| 3 | 20.9859 | 3.310E-29 | 0.08 | -31.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235979 | -31.176 | 7.7761 | 0.07064 | 0.3808 | -33.023 | 6.9163 | 0.01348 | 0.2431 | -28.767 |
| 4 | 20.6678 | 6.983E-26 | 0.08066 | -31.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0237439 | -31.176 | 7.8505 | 0.06544 | 0.3872 | -33.023 | 6.6087 | 0.01607 | 0.2782 | -28.767 |
| 5 | 20.64 | 2.823E-26 | 0.08388 | -34.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02350 | -34.176 | 7.7021 | 0.00738 | 0.3751 | -36.023 | 6.02 | 0.02275 | 0.234 | -31.758 |
| 6 | 20.8646 | 3.088E-28 | 0.081098 | -34.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02275 | -34.176 | 7.7147 | 0.007383 | 0.3834 | -36.023 | 6.4067 | 0.01848 | 0.2325 | -31.769 |
| 7 | 20.7542 | 2.980E-27 | 0.082405 | -34.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235574 | -34.176 | 7.6231 | 0.0085 | 0.3676 | -36.023 | 6.4735 | 0.0176 | 0.2248 | -31.766 |
| 8 | 20.3804 | 6.287E-25 | 0.8164 | -34.163 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0235867 | -34.176 | 7.8999 | 0.06345 | 0.3863 | -36.023 | 6.4345 | 0.01795 | 0.2358 | -31.73 |

Tabla 3.9, Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 8 ONT.

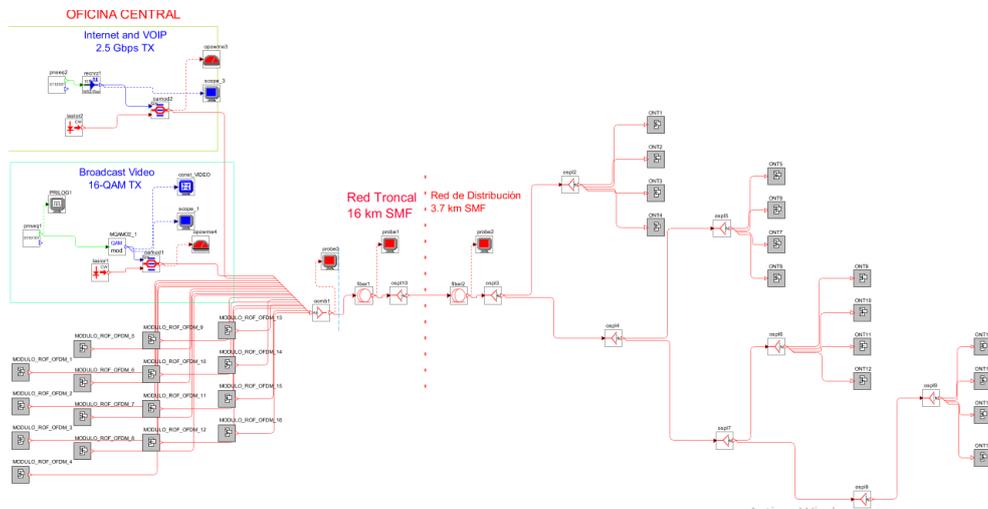


Figura 3.11, Escenario Red FTTH con 16 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.11 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH con 16 ONT a una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.8937 | 7.5325E-29 | 0.081888 | -31.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0234378 | -31.172 | 7.8657 | 0.006512 | 0.3872 | -33.023 | 6.8563 | 1.43E-02 | 0.2617 | -28.765 |
| 2 | 21.0817 | 1.8867E-29 | 0.0807 | -31.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0234777 | -31.172 | 7.7937 | 0.006985 | 0.3926 | -33.023 | 6.8772 | 0.01367 | 0.2569 | -28.775 |
| 3 | 20.9117 | 6.0620E-29 | 0.0829 | -31.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02275 | -31.172 | 7.9058 | 0.006365 | 0.3865 | -33.023 | 6.7055 | 0.01536 | 0.2157 | -28.773 |
| 4 | 20.8417 | 1.1882E-27 | 0.0821 | -31.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0234786 | -31.172 | 7.6741 | 0.007563 | 0.369 | -33.023 | 6.7019 | 0.01531 | 0.2653 | -28.765 |
| 5 | 20.8588 | 2.2715E-28 | 0.081949 | -34.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02350 | -34.172 | 7.6975 | 0.006984 | 0.3898 | -36.023 | 6.02 | 0.02275 | 0.2449 | -28.766 |
| 6 | 20.7862 | 1.0202E-27 | 0.0906 | -34.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02339 | -34.172 | 7.6934 | 0.00749 | 0.3942 | -36.023 | 6.6867 | 0.01578 | 0.2538 | -31.768 |
| 7 | 20.6762 | 4.7661E-27 | 0.08294 | -34.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0233661 | -34.172 | 7.7535 | 0.007291 | 0.3836 | -36.023 | 6.02 | 0.02275 | 0.259 | -31.774 |
| 8 | 20.5549 | 6.4249E-26 | 0.0803 | -34.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0233342 | -34.172 | 7.676 | 0.007602 | 0.3906 | -36.023 | 6.4685 | 0.01772 | 0.225 | -31.757 |
| 9 | 20.7973 | 3.0578E-28 | 0.0808 | -37.179 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0232148 | -37.172 | 7.8157 | 0.006905 | 0.3779 | -39.023 | 6.1723 | 0.02295 | 0.2621 | -34.764 |
| 10 | 20.4521 | 6.9235E-26 | 0.0798 | -37.179 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02340 | -37.172 | 7.7464 | 0.007275 | 0.3786 | -39.023 | 6.672155 | 0.01523 | 0.2397 | -34.767 |
| 11 | 20.4967 | 1.2848E-25 | 0.0807 | -37.179 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0239298 | -37.172 | 7.5991 | 0.008223 | 0.3657 | -39.023 | 6.2668 | 0.01985 | 0.2137 | -34.768 |
| 12 | 20.7048 | 2.31E-27 | 0.07769 | -37.179 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0233362 | -37.172 | 7.7364 | 0.0072 | 0.3635 | -39.023 | 6.6181 | 0.01618 | 0.2072 | -34.771 |
| 13 | 20.3038 | 2.51E-25 | 0.081334 | -40.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.023317 | -40.172 | 7.5949 | 0.007798 | 0.3911 | -42.023 | 6.5875 | 0.01645 | 0.1996 | -37.759 |
| 14 | 20.1194 | 4.32E-24 | 0.0782 | -40.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02313 | -40.172 | 7.8984 | 0.006464 | 0.381 | -42.023 | 6.9011 | 0.01357 | 0.2148 | -37.769 |
| 15 | 20.7634 | 3.26E-27 | 0.081262 | -40.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0238383 | -40.172 | 7.6536 | 0.008158 | 0.3761 | -42.023 | 6.3164 | 0.01925 | 0.1957 | -37.764 |
| 16 | 20.2147 | 7.61E-25 | 0.0823 | -40.178 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0230272 | -40.172 | 7.5 | 0.008622 | 0.3731 | -42.023 | 6.9712 | 0.01387 | 0.2234 | -37.773 |

Tabla 3.10, Resultados parámetros OPM para la Red FTTH con 16 ONT.



3.1.3 Evaluación desempeño y elección cable coaxial para el tramo de acceso en la red NG-HFC.

Para esta sección de este capítulo se realiza una comparación entre dos tipos de cable coaxial, donde se simuló una red NG-HFC con el cable coaxial RG 11 y RG 59

El cable coaxial RG11 es un cable coaxial de alta calidad que se utiliza para la transmisión de señales de alta frecuencia y largas distancias. Este cable tiene un diámetro mayor que el RG59, lo que le permite ofrecer una menor atenuación de la señal y una mayor capacidad de transmisión de datos.

Por otro lado, el RG59 es un cable coaxial más delgado que se utiliza para aplicaciones de baja frecuencia y distancias cortas. Este cable tiene un diámetro menor que el RG11, lo que lo hace más flexible y fácil de instalar en espacios reducidos.

Con el objetivo de evaluar su rendimiento en la transmisión de señales en una red NG-HFC, se utilizaron las mismas métricas que se consideran en el análisis de los escenarios, como el Jitter, BER, factor Q y la potencia en recepción y de esta manera obtener el comportamiento de la red con respecto al tipo de cable coaxial utilizado.

Después de realizar las pruebas y análisis correspondientes, se puede determinar cuál de los cables coaxiales tiene mejor rendimiento en términos de jitter, BER, factor Q y potencia en recepción en comparación con el otro. Estos resultados son de gran importancia para garantizar una transmisión eficiente y confiable de las señales en una red NG-HFC.

Las características físicas del cable coaxial están dadas por el tipo de cable y por el fabricante, por lo cual se eligieron los cables coaxiales, RG 11 y RG del mismo fabricante. Los parámetros de las características eléctricas están descritos en el capítulo II de este trabajo monográfico. Las figuras 3.12 y 3.13, presentan los *datasheet* del fabricante “KOAX 24_” con las características de los cables coaxiales RG 59 y RG 11, respectivamente.

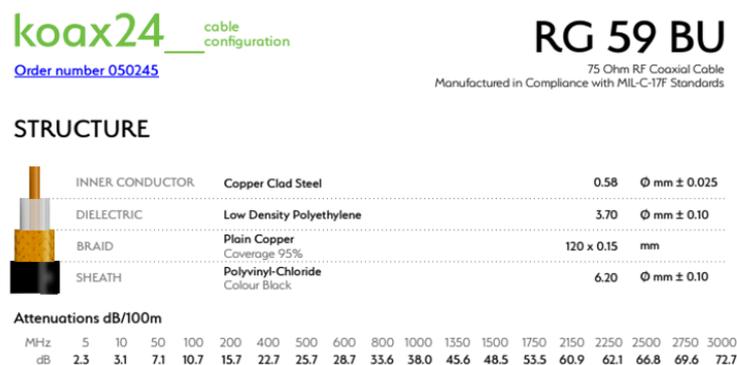


Figura 3.12, Datasheet cable coaxial RG 59 fabricante KOAX 24_.



koax24 cable configuration
 Order number 050246

RG 11 AU

75 Ohm RF Coaxial Cable
 Manufactured in Compliance with MIL-C-17F Standards

STRUCTURE

| | | | |
|-----------------|------------------------------------|------------|-------------|
| INNER CONDUCTOR | Tinned Copper | 7 x 0.40 | mm |
| DIELECTRIC | Low Density Polyethylene | 7.25 | Ø mm ± 0.18 |
| BRAID | Plain Copper Coverage 97% | 192 x 0.18 | mm |
| SHEATH | Polyvinyl-Chloride Colour Black | 10.30 | Ø mm ± 0.18 |

Attenuations dB/100m

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MHz | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 | 1350 | 1500 | 1750 | 2150 | 2250 | 2500 | 2750 | 3000 |
| dB | 1.2 | 1.7 | 4.2 | 6.2 | 9.3 | 13.8 | 15.5 | 17.1 | 20.5 | 23.4 | 30.2 | 32.5 | 36.6 | 42.5 | 43.1 | 45.8 | 47.6 | 50.1 |

Figura 3.13, Datasheet cable coaxial RG 11 fabricante KOAX 24_

3.1.4 Resultados Escenario red NG-HFC a 10Km usando cable coaxial RG-59 frente a un escenario de red NG-HFC usando cable coaxial RG-11.

En las tablas 3.11, 3.12 se observa los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter producto de la simulación del comportamiento del cable coaxial, para cada uno de los servicios en una red NG-HFC a una distancia de 10Km para un número de 1, 2, 4 y 8 ONT respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red NG-HFC CABLE COAXIAL RG-59 | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.816 | 3.3428E-28 | 0.0839 | -35.014 | 7.7 | 7.38E-03 | 0.3674 | -36.873 | 6.181 | 2.09E-02 | 0.2458 | -32.617 |
| 2 | 20.7814 | 4.1635E-28 | 0.07952 | -35.014 | 7.81 | 0.006827 | 0.383 | -36.873 | 6.3933 | 0.01852 | 0.2488 | -32.615 |
| 3 | 20.6721 | 1.1100E-26 | 0.08289 | -35.014 | 7.7242 | 0.007273 | 0.3809 | -36.873 | 6.89 | 0.01374 | 0.2024 | -32.62 |
| 4 | 20.594 | 2.1381E-26 | 0.0809 | -35.014 | 7.8034 | 0.0069 | 0.3809 | -36.873 | 6.5261 | 0.01706 | 0.2403 | -32.62 |
| 5 | 20.544 | 6.4448E-26 | 0.0801 | -35.014 | 7.6682 | 0.007568 | 0.2726 | -39.873 | 6.02 | 0.02275 | 0.2616 | -39.873 |
| 6 | 20.5711 | 9.2100E-26 | 0.0826 | -38.014 | 7.7238 | 0.007277 | 0.3725 | -39.873 | 6.02 | 0.02275 | 0.2612 | -39.612 |
| 7 | 20.5081 | 3.2934E-25 | 0.0811 | -38.014 | 7.8865 | 0.006437 | 0.3874 | -39.873 | 6.02 | 0.02275 | 0.2004 | -39.612 |
| 8 | 20.4262 | 5.9580E-26 | 0.082 | -38.014 | 7.682 | 0.007498 | 0.3749 | -39.873 | 6.02 | 0.02275 | 0.2646 | -39.871 |

Tabla 3.11 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con cable coaxial RG 59 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red NG-HFC | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.95 | 3.28E-29 | 0.0851 | -31,114 | 7,7656 | 7,20E-03 | 0,3821 | -32,973 | 6,5073 | 1,73E-02 | 0,2389 | -28,717 |
| 2 | 20,9195 | 5,55E-29 | 0,07904 | -31,114 | 7,8294 | 0,00682 | 0,39 | -32,973 | 6,4678 | 0,01781 | 0,2488 | -28,722 |
| 3 | 20,8692 | 1,80E-28 | 0,0844 | -31,114 | 7,76 | 0,007156 | 0,3792 | -32,973 | 6,911 | 0,01356 | 0,2084 | -28,72 |
| 4 | 20,773 | 4,62E-28 | 0,0831 | -31,114 | 7,8237 | 0,006776 | 0,3841 | -32,973 | 6,66721 | 0,01569 | 0,2363 | -28,70 |
| 5 | 20,5473 | 7,57E-28 | 0,07954 | -34,114 | 7,7038 | 0,006357 | 0,3742 | -35,973 | 6,02 | 0,02275 | 0,2511 | -31,707 |
| 6 | 20,74 | 1,76E-27 | 0,08322 | -34,114 | 7,7058 | 0,007058 | 0,372 | -35,973 | 6,02 | 0,02275 | 0,2254 | -75,247 |
| 7 | 20,69214 | 5,44E-27 | 0,0816 | -34,114 | 7,901 | 0,00632 | 0,3865 | -35,973 | 6,02 | 0,02275 | 0,1323 | -81,817 |
| 8 | 20,5921 | 3,07E-26 | 0,08196 | -34,114 | 7,5063 | 0,00637 | 0,3652 | -35,973 | 6,045 | 0,02275 | 0,2947 | -84,867 |

Tabla 3.12 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con cable coaxial RG 11 con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.



Análisis del desempeño para el servicio de Datos/VoIP en dos redes NG-HFC con cable coaxial RG-11 y RG-59

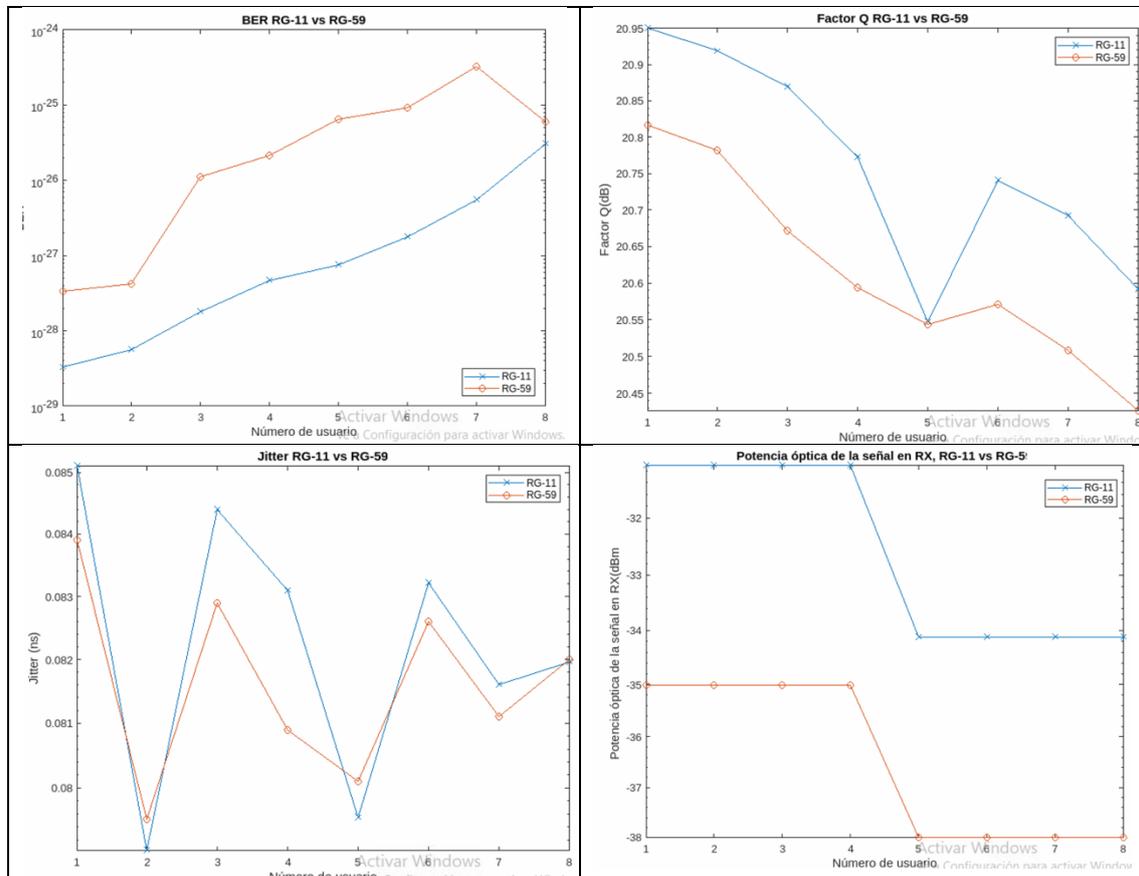


Figura 3.14, Gráficas comparación escenario NG-HFC Cable coaxial RG 11 vs escenario NG-HFC cable coaxial RG 59.

En general, ambos cables coaxiales se utilizan para la transmisión de señales de televisión, datos y voz en sistemas de comunicaciones. Sin embargo, el RG11 es preferible cuando se requiere una mayor calidad y velocidad de transmisión, mientras que el RG59 es más adecuado para aplicaciones de baja frecuencia y distancias cortas.

Luego de analizar las pruebas, la comparación entre el RG 11 y el RG 59 en términos de su rendimiento en una red HFC, demostró que el RG 11 es superior en cuanto a la calidad de la señal, la tasa de errores de transmisión, la atenuación y la potencia en recepción. Por lo tanto, se recomienda utilizar el RG 11 para lograr una transmisión de alta calidad y confiable en una red NG-HFC.

3.1.5 Escenario red NG-HFC a 10Km

Como se presentó en el capítulo I de marco teórico, y según la avance de las redes HFC [12][15]. NG-HFC es una tecnología de redes híbridas que combina la fibra óptica y el cable coaxial. Esta tecnología representa una evolución de las redes HFC tradicionales utilizadas por los proveedores de servicios de



telecomunicaciones para entregar servicios de televisión por cable, internet y telefonía.

A diferencia de las redes HFC convencionales que utilizan principalmente el cable coaxial, las redes NG-HFC utilizan en proporción más fibra óptica. Esto proporciona una mayor capacidad de ancho de banda y permite a los proveedores de servicios ofrecer servicios de alta velocidad a sus clientes.

Además, NG-HFC se caracteriza por la capacidad de emplear técnicas de división de frecuencia óptica (OFDM) en la red coaxial, lo que permite una mayor eficiencia espectral y una mayor capacidad de transmisión de datos en la red, por lo que es una tecnología que se adapta perfectamente al análisis que cabe dentro de este trabajo monográfico, en la búsqueda de la comparación con los sistemas FTTH convencionales, al ofrecer servicios *Quad Play*. La figura 3.15 muestra la comparación en arquitecturas de los sistemas FTTH tradicionales frente a la nueva generación de redes HFC. La Evolución de las redes HFC se traduce en una mejor calidad de servicio y una mayor capacidad para ofrecer servicios avanzados como televisión de alta definición, video bajo demanda y juegos en línea.

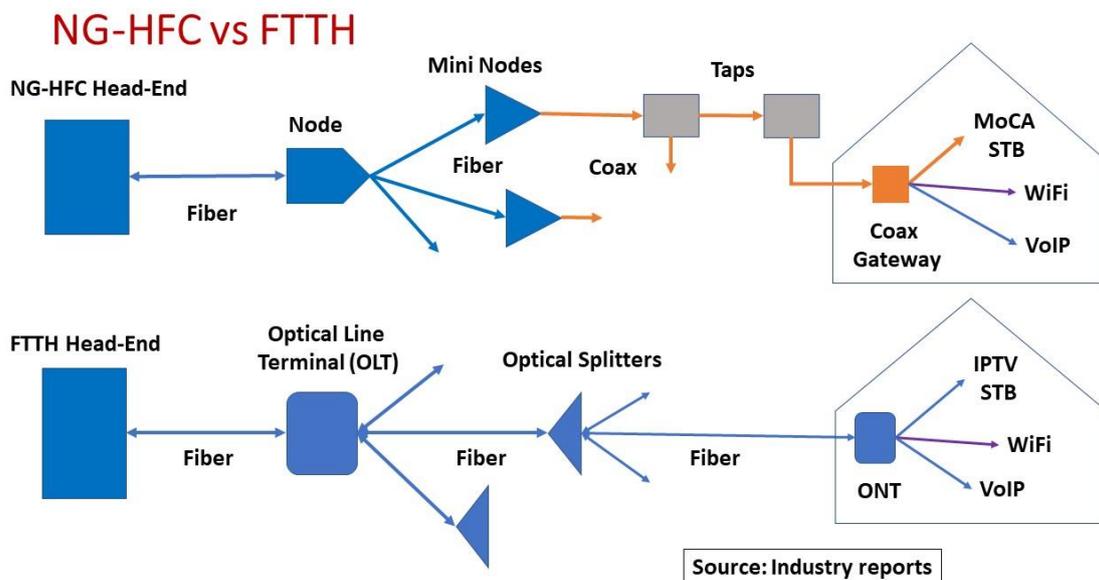


Figura 3.15, Diagrama topologías sistema FTTH vs NG-HFC [58].

En las redes HFC tradicionales, los amplificadores activos de Radiofrecuencia se utilizan para amplificar las señales de los canales de TV y los datos en el cable coaxial. Sin embargo, estos amplificadores activos pueden causar problemas de ruido y distorsión de señal, lo que limita la calidad de la señal y reduce la capacidad de la red.

Para abordar este problema, NG-HFC y su estándar DOCSIS 4.0 desarrolla nuevas arquitecturas de red, como los mininodos y el nodo +0 o también conocido como nodo cero, estos eliminan la necesidad de amplificadores activos y utilizan la fibra óptica para transportar la señal de manera más eficiente.



Los mininodos son dispositivos pasivos que se instalan en el cable coaxial y dividen la señal en múltiples rutas, reduciendo la cantidad de señal que se pierde a medida que se transmite a través de la red como se ilustra en la figura 3.16.

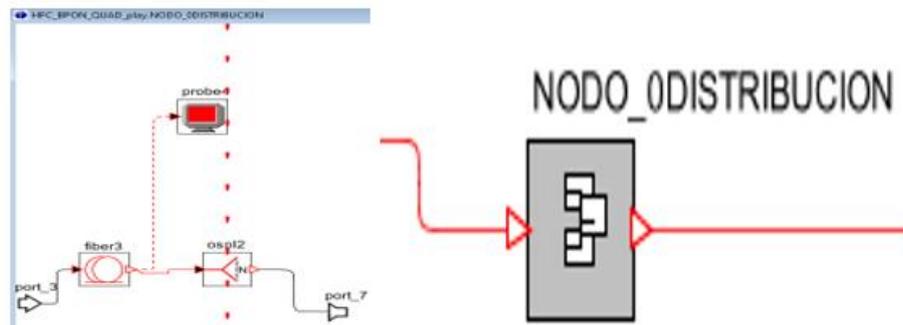


Figura 3.16, módulo nodo +0 NG-HFC [15]

El nodo +0 es una arquitectura de red que se basa en la fibra óptica y elimina por completo los amplificadores activos de RF. En lugar de amplificar la señal en cada nodo, la señal se divide en pequeños grupos de abonados y se envía directamente desde el nodo de distribución hasta la casa del abonado a través de la fibra óptica. Esto reduce la cantidad de señal que se pierde y mejora significativamente la calidad de la señal y la capacidad de la red. ver figura 3.17.

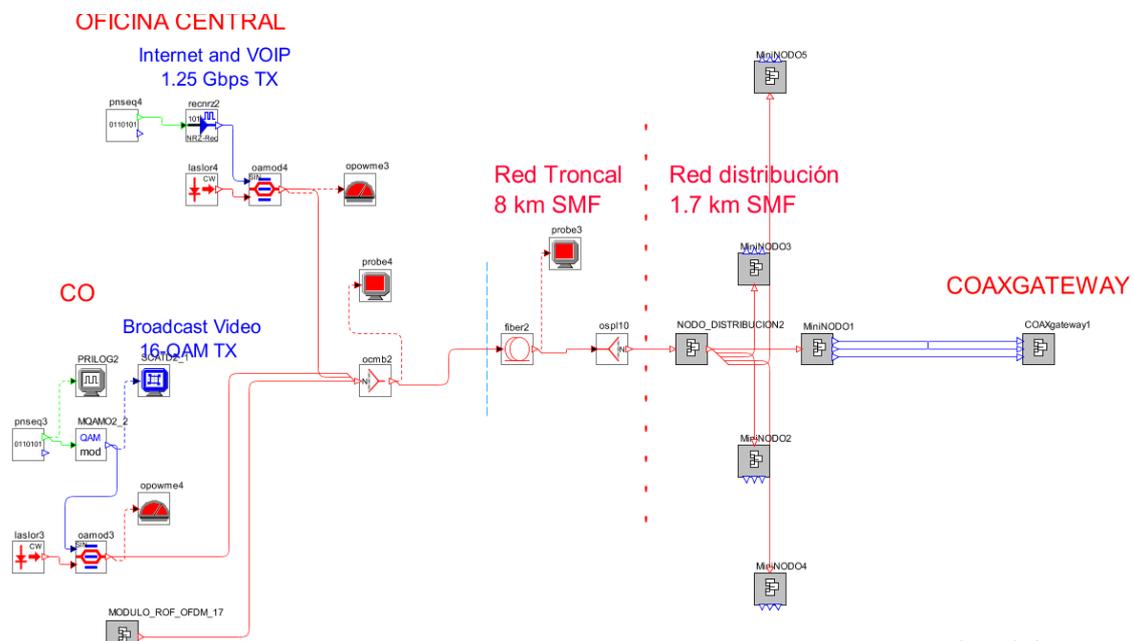


Figura 3.17, Escenario red la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.17 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 1 Coax Gateway y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.



Las tablas 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red NG-HFC a una distancia de 10Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 Coax Gateway respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.9426 | 8.97E-29 | 0.0843 | -27.144 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.02364 | -27.166 | 7.8284 | 6.69E-03 | 0.3846 | -27.023 | 6.8893 | 1.36E-02 | 0.2156 | -24.77 |

Tabla 3.13, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

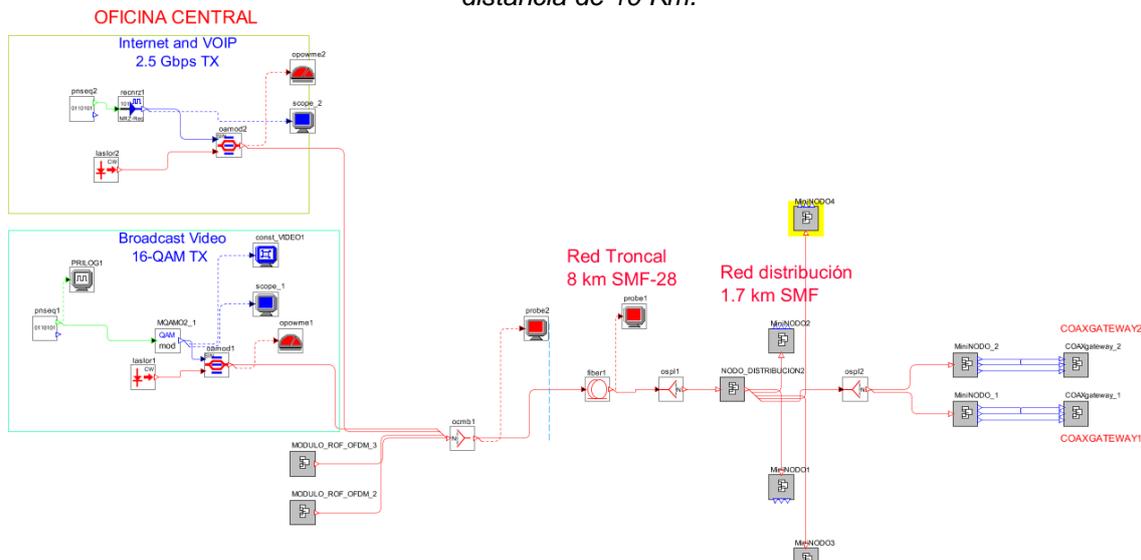


Figura 3.18, Escenario red la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.17 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 2 Coax Gateway y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.8445 | 1.55E-28 | 0.08521 | -30.144 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.0289 | -30.166 | 6.94 | 1.32E-02 | 0.21 | -32.023 | 6.7644 | 1.47E-02 | 0.1968 | -27.769 |
| 2 | 20.9122 | 1.26E-28 | 0.08273 | -30.144 | 6.0206 | 0.02275 | 0.0235 | -30.166 | 7.7814 | 0.006889 | 0.0833 | -32.023 | 6.94 | 0.01322 | 0.20 | -27.766 |

Tabla 3.14, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

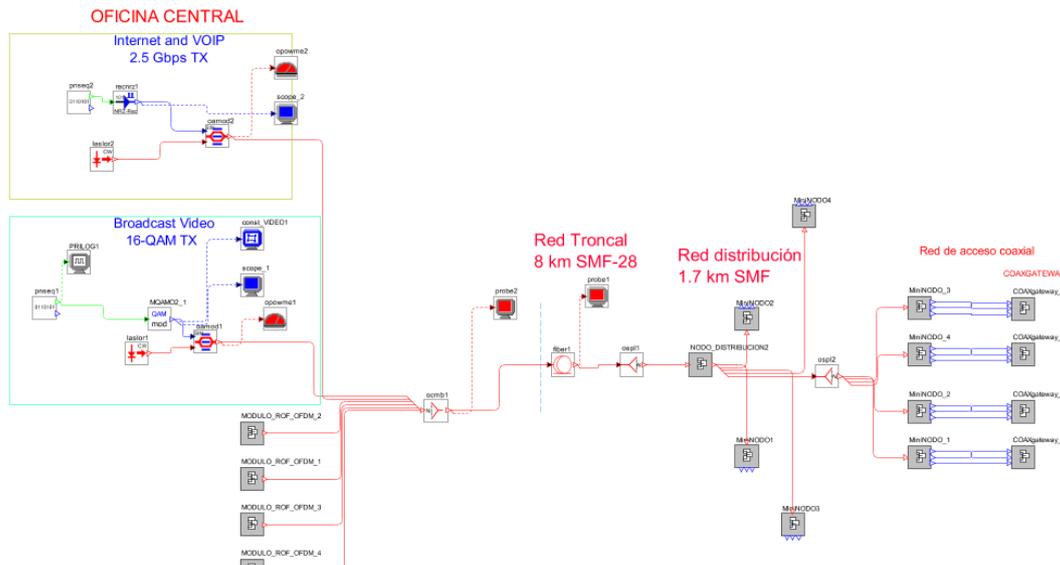


Figura 3.19, Escenario red la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.19 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 4 Coax Gateway y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red NG-HFC | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.85 | 1.57E-28 | 0.0806 | -30.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02366 | -30.179 | 7.7615 | 0.007366 | 0.3771 | -32.023 | 6.4611 | 1.70E-02 | 0.21 | -27.772 |
| 2 | 21.0159 | 2.47E-29 | 0.008 | -30.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02355 | -30.179 | 7.9137 | 6.43E-03 | 0.379 | -32.023 | 6.4611 | 0.01777 | 0.2167 | -27.759 |
| 3 | 20.85 | 1.96E-28 | 0.0802 | -30.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.23537 | -30.179 | 7.6418 | 0.007951 | 0.3816 | -32.023 | 6.881 | 0.01368 | 0.2436 | -27.773 |
| 4 | 20.955 | 1.34E-28 | 0.0828 | -30.161 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.023596 | -30.179 | 7.6663 | 0.007729 | 0.3396 | -32.023 | 6.6451 | 0.01592 | 0.2105 | -27.766 |

Tabla 3.15, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

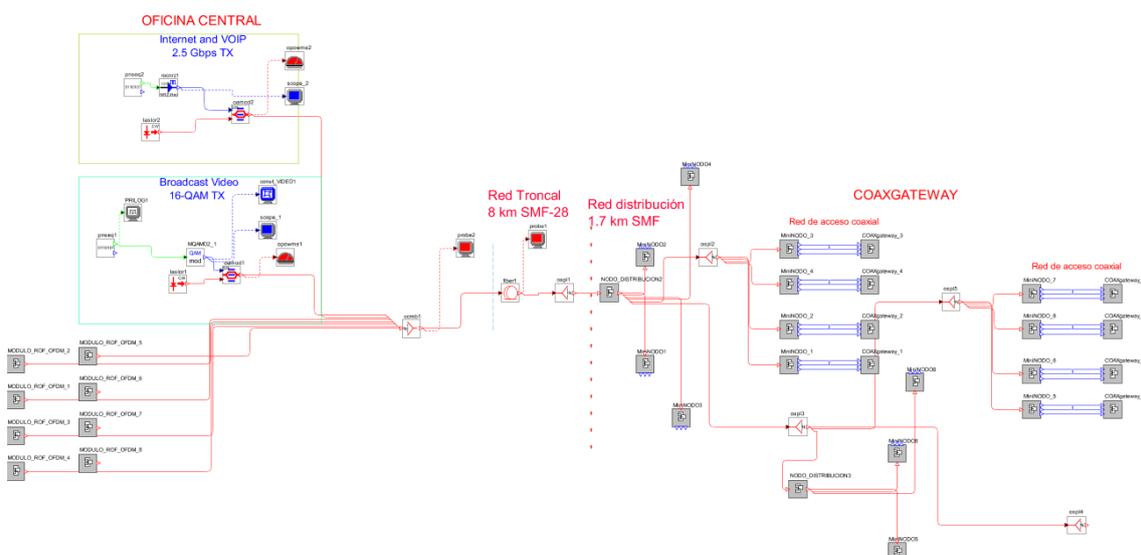


Figura 3.20, Escenario red la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.



En la figura 3.20 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 8 Coax Gateway y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.95 | 3.28E-29 | 0.0851 | -31.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.023752 | -34.179 | 7.7656 | 7.20E-03 | 0.3821 | -32.973 | 6.5073 | 1.73E-02 | 0.2389 | -28.717 |
| 2 | 20.9195 | 5.55E-29 | 0.07904 | -31.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02352 | -34.179 | 7.8294 | 0.00682 | 0.39 | -32.973 | 6.4678 | 0.01781 | 0.2488 | -28.722 |
| 3 | 20.8692 | 1.80E-28 | 0.0844 | -31.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02356 | -34.179 | 7.76 | 0.007156 | 0.3792 | -32.973 | 6.911 | 0.01356 | 0.2084 | -28.72 |
| 4 | 20.773 | 4.62E-28 | 0.0831 | -31.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02354 | -34.179 | 7.8237 | 0.006776 | 0.3841 | -32.973 | 6.66721 | 0.01569 | 0.2363 | -28.70 |
| 5 | 20.5473 | 7.57E-28 | 0.07954 | -34.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02363 | -37.179 | 7.7038 | 0.006357 | 0.3742 | -35.973 | 6.02 | 0.02275 | 0.2511 | -31.707 |
| 6 | 20.74 | 1.76E-27 | 0.08322 | -34.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02372 | -37.179 | 7.7058 | 0.007058 | 0.372 | -35.973 | 6.02 | 0.02275 | 0.2254 | -17.247 |
| 7 | 20.69214 | 5.44E-27 | 0.0816 | -34.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02356 | -37.179 | 7.901 | 0.00632 | 0.3865 | -35.973 | 6.02 | 0.02275 | 0.1323 | -81.817 |
| 8 | 20.5921 | 3.07E-26 | 0.08196 | -34.114 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02368 | -37.179 | 7.5063 | 0.00637 | 0.3652 | -35.973 | 6.045 | 0.02275 | 0.2947 | -84.867 |

Tabla 3.16, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

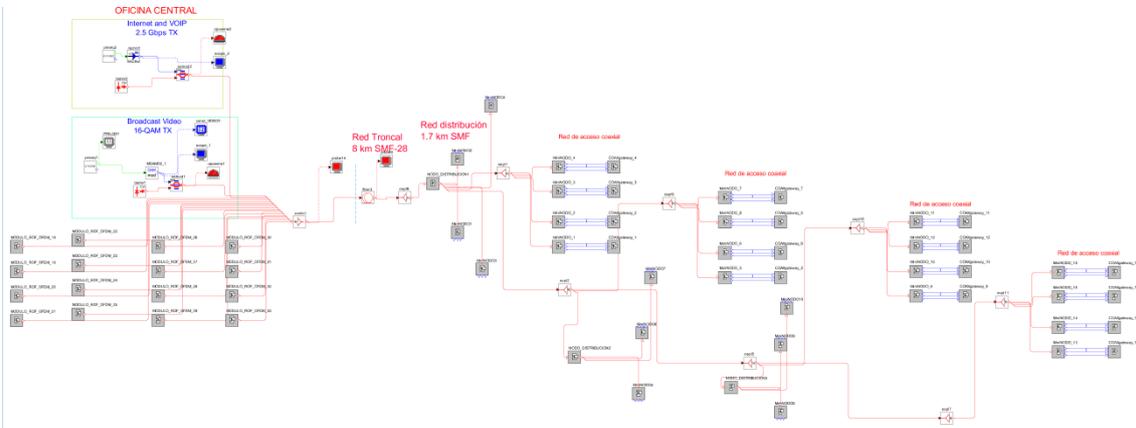


Figura 3.21, Escenario red la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.21 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 1 Coax Gateway y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.83 | 2.16E-28 | 0.08503 | -31.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02375 | -34.179 | 7.846 | 6.75E-03 | 0.3965 | -35.973 | 6.32 | 2.14E-02 | 0.2506 | -28.715 |
| 2 | 20.9071 | 1.24E-28 | 0.082 | -31.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02366 | -34.179 | 7.7818 | 0.00781 | 0.3751 | -35.973 | 6.8777 | 0.01372 | 0.2705 | -28.725 |
| 3 | 20.9747 | 2.84E-29 | 0.0836 | -31.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02345 | -34.179 | 7.8486 | 0.00663 | 0.3919 | -35.973 | 6.2992 | 0.01873 | 0.1965 | -28.723 |
| 4 | 20.6579 | 4.18E-26 | 0.0786 | -31.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02356 | -34.179 | 7.7832 | 0.007136 | 0.3626 | -35.973 | 6.5292 | 0.01726 | 0.2372 | -28.722 |
| 5 | 20.8908 | 1.46E-28 | 0.07959 | -34.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02362 | -37.179 | 7.521 | 0.008468 | 0.3827 | -35.973 | 6.4259 | 0.01813 | 0.2016 | -31.716 |
| 6 | 20.6665 | 7.45E-27 | 0.0806 | -34.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02343 | -37.179 | 7.6322 | 0.007787 | 0.3835 | -35.973 | 6.9717 | 0.0132 | 0.2472 | -31.718 |
| 7 | 20.7628 | 4.79E-28 | 0.0794 | -34.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02361 | -37.179 | 7.7179 | 0.007999 | 0.3801 | -35.973 | 6.5724 | 0.01666 | 0.2511 | -31.722 |
| 8 | 20.601 | 1.16E-26 | 0.0807 | -34.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02354 | -37.179 | 7.7481 | 0.007436 | 0.3919 | -35.973 | 6.2532 | 0.0203 | 0.2763 | -31.719 |
| 9 | 20.5361 | 2.60E-26 | 0.07825 | -37.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02347 | -40.179 | 7.7182 | 0.007151 | 0.3862 | -38.973 | 6.2185 | 0.02003 | 0.2845 | -34.714 |
| 10 | 20.436 | 5.45E-25 | 0.07994 | -37.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02362 | -40.179 | 7.6579 | 0.007782 | 0.3811 | -38.973 | 6.02 | 0.02275 | 0.2406 | -34.716 |
| 11 | 20.4877 | 1.54E-25 | 0.0802 | -37.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02349 | -40.179 | 7.6544 | 0.007621 | 0.3779 | -38.973 | 6.0838 | 0.02222 | 0.2224 | -34.721 |
| 12 | 20.71 | 1.59E-27 | 0.0826 | -37.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02355 | -40.179 | 7.6535 | 0.007534 | 0.3767 | -38.973 | 6.8534 | 0.01459 | 0.2049 | -34.715 |
| 13 | 20.3535 | 3.27E-25 | 0.0827 | -40.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02361 | -43.179 | 7.5791 | 0.008189 | 0.3803 | -41.973 | 6.1456 | 0.02135 | 0.1765 | -37.719 |
| 14 | 20.3809 | 7.82E-25 | 0.0823 | -40.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02344 | -43.179 | 7.5247 | 0.009023 | 0.3798 | -41.973 | 6.02 | 0.02275 | 0.0229 | -37.713 |
| 15 | 20.214 | 2.95E-24 | 0.0837 | -40.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02360 | -43.179 | 7.8905 | 0.006333 | 0.3704 | -41.973 | 6.1078 | 0.01354 | 0.2511 | -37.714 |
| 16 | 20.5771 | 1.23E-25 | 0.0845 | -40.129 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.02353 | -43.179 | 7.68 | 0.00762 | 0.3798 | -41.973 | 6.6025 | 0.001645 | 0.2447 | -37.716 |

Tabla 3.17, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.



3.1.6 Escenario red NG-HFC a 20Km

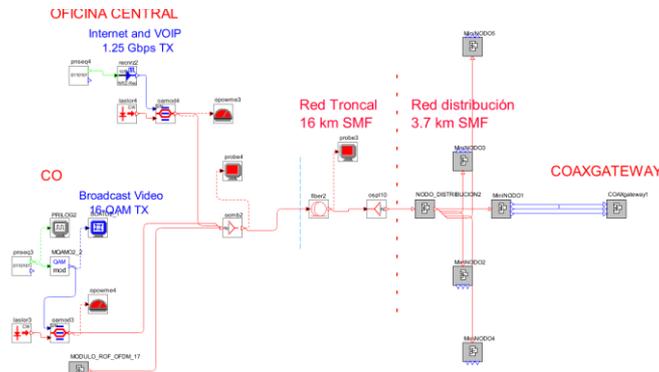


Figura 3.22, Escenario red la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway. a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.22 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 1 Coax Gateway y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

Las tablas 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red NG-HFC a una distancia de 20Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 Coax Gateway respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.3994 | 1.13E-24 | 0.08259 | -37.144 | 6.0206 | 2.28E-02 | 0.0234 | -37.166 | 7.7416 | 7.19E-03 | 0.3782 | -37.023 | 6.6813 | 1.59E-02 | 0.2215 | -34.77 |

Tabla 3.18, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 1 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

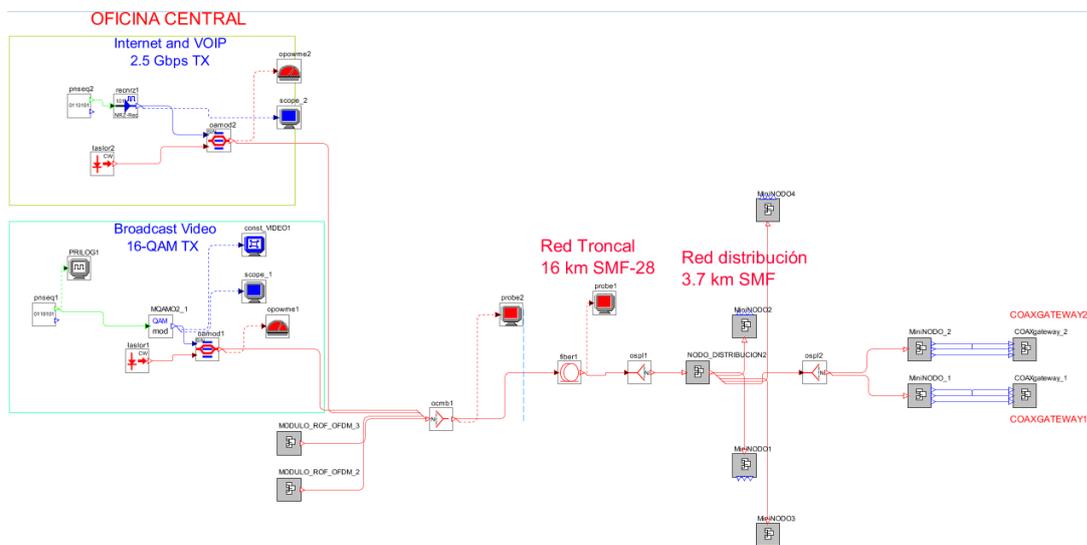


Figura 3.23, Escenario red la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway. a una distancia de 20 Km.



En la figura 3.23 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 2 Coax Gateway y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Red NG-HFC | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.48 | 2.63E-25 | 0.07985 | -41.09 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02345 | -41.09 | 7.76 | 7.18E-03 | 0.38 | -42.973 | 6.4414 | 1.96E-02 | 0.2374 | -38.716 |
| 2 | 20.37 | 3.28E-25 | 0.0856 | -41.09 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02353 | -41.09 | 7.8034 | 0.006943 | 0.34 | -42.973 | 6.2647 | 0.02 | 0.231 | -38.716 |

Tabla 3.19, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 2 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

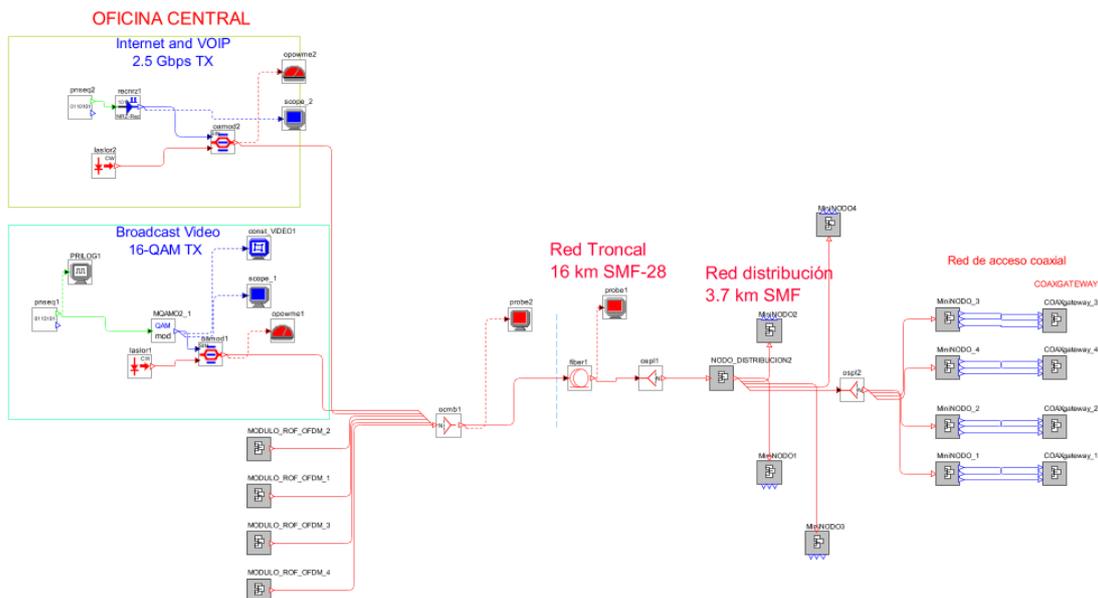


Figura 3.24, Escenario red la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway. a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.24 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 4 Coax Gateway y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|---------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Red NG-HFC | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.32 | 7.83E-25 | 0.08114 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02356 | -41.114 | 7.7714 | 0.007214 | 0.3779 | -42.973 | 6.04178 | 0.02162 | 0.2079 | -38.717 |
| 2 | 20.44 | 1.48E-24 | 0.07918 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02354 | -41.114 | 7.7218 | 0.007983 | 0.3802 | -42.973 | 6.0125 | 0.01783 | 0.2456 | -38.715 |
| 3 | 20.5432 | 3.42E-26 | 0.0818 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02336 | -41.114 | 7.8002 | 0.006848 | 0.3752 | -42.973 | 6.5354 | 0.01955 | 0.2418 | -38.722 |
| 4 | 20.5315 | 3.58E-26 | 0.0837 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02346 | -41.114 | 7.6745 | 0.007915 | 0.3845 | -42.973 | 6.35 | 0.01808 | 0.2302 | -38.717 |

Tabla 3.20 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 4 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

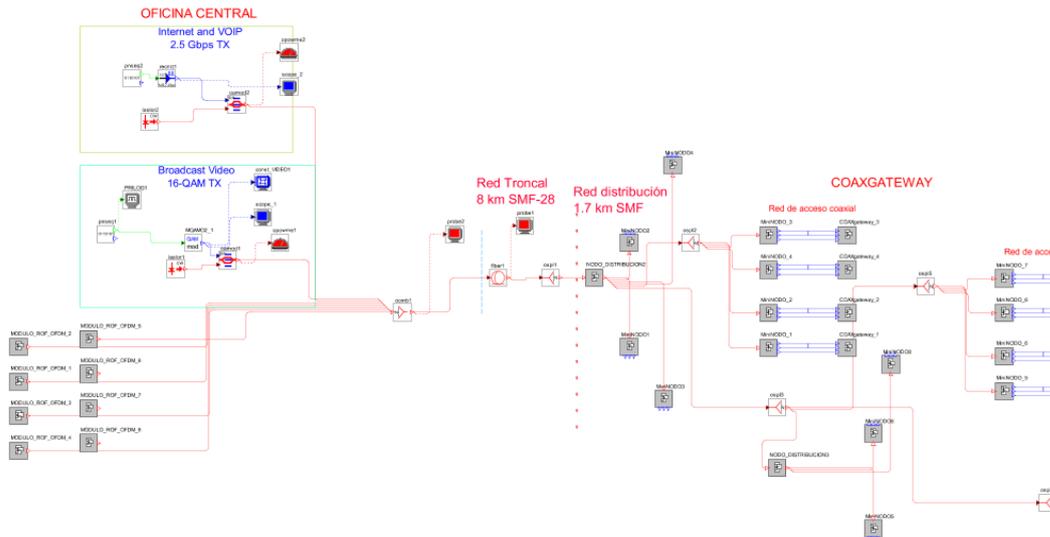


Figura 3.25, Escenario red la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.25 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 8 Coax Gateway y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red NG-HFC | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2,5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.6116 | 2.84E-26 | 0.0837 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02353 | -44.114 | 7.6642 | 7.79E-03 | 0.3816 | -42.973 | 6.3856 | 1.88E-02 | 0.2388 | -38.717 |
| 2 | 20.56 | 3.53E-26 | 0.08186 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02352 | -44.114 | 7.7951 | 0.006893 | 0.378 | -42.973 | 6.1812 | 0.0208 | 0.254 | -38.715 |
| 3 | 20.3889 | 7.81E-25 | 0.0818 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02342 | -44.114 | 7.669 | 0.007713 | 0.3781 | -42.973 | 6.8 | 0.01431 | 0.2024 | -38.722 |
| 4 | 20.36 | 1.50E-24 | 0.081 | -41.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02338 | -44.114 | 7.7742 | 0.007019 | 0.3798 | -42.973 | 6.2249 | 0.02044 | 0.2405 | -38.717 |
| 5 | 20.18 | 7.91E-25 | 0.07908 | -44.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02368 | -47.114 | 7.6165 | 0.0079 | 0.37 | -45.973 | 6.799 | 0.026 | 0.2563 | -41.707 |
| 6 | 20.3524 | 5.37E-25 | 0.0818 | -44.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02375 | -47.114 | 7.4604 | 0.007441 | 0.3667 | -45.973 | 6.226 | 0.0198 | 0.2257 | -41.714 |
| 7 | 20.2806 | 7.06E-25 | 0.0793 | -44.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02346 | -47.114 | 7.8629 | 0.006655 | 0.3859 | -45.973 | 6.384 | 0.0183 | 0.1895 | -41.717 |
| 8 | 20.2324 | 8.74E-25 | 0.0804 | -44.114 | 6.0206 | 0.02275 | 0.02364 | -47.114 | 7.6511 | 0.007687 | 0.3761 | -45.973 | 6.385 | 0.0195 | 0.2433 | -41.721 |

Tabla 3.21, Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 8 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

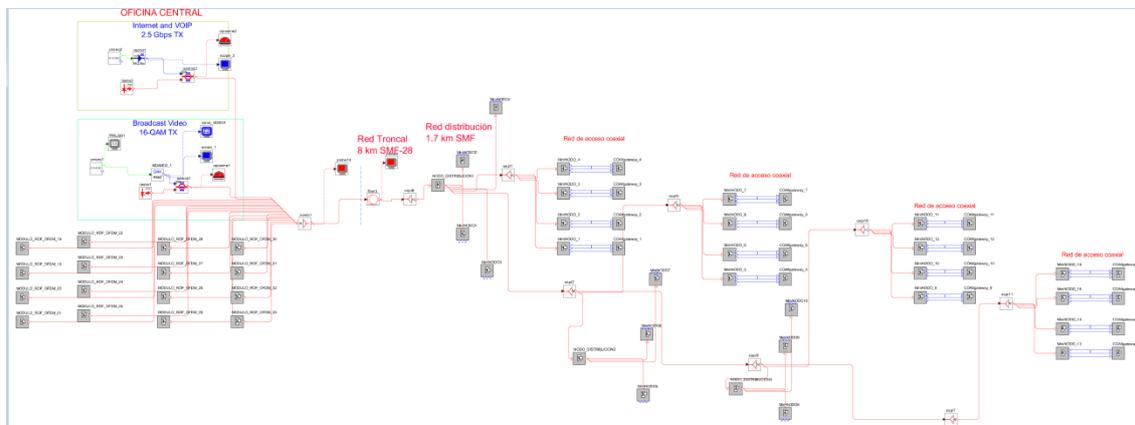


Figura 3.26, Escenario red la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.26 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 16 Coax Gateway y una distancia de 20



Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

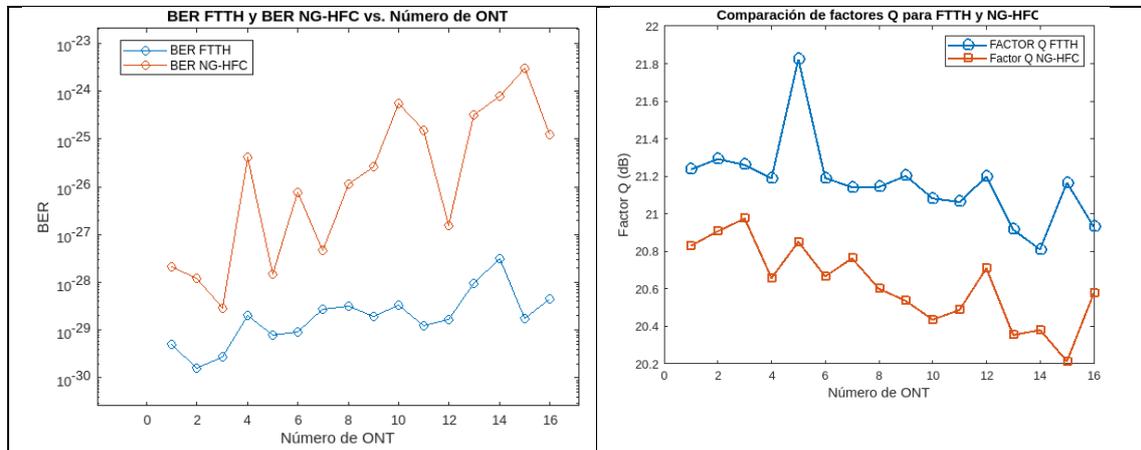
| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|---------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|-----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 20.4642 | 4.36E-25 | 0.07935 | -42.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.0234586 | -42.172 | 7.81 | 0.006904 | 0.3943 | -44.023 | 6.764 | 0.014714 | 0.2487 | -39.765 |
| 2 | 20.6783 | 2.92E-27 | 0.0789 | -42.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023563 | -42.172 | 7.6911 | 0.007452 | 0.3929 | -44.023 | 6.3204 | 0.01941 | 0.2457 | -39.772 |
| 3 | 20.4479 | 3.28E-25 | 0.0801 | -42.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.022583 | -42.172 | 7.8675 | 0.006605 | 0.386 | -44.023 | 6.5934 | 0.01732 | 0.2067 | -39.773 |
| 4 | 20.2363 | 8.31E-25 | 0.0816 | -42.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023365 | -42.172 | 7.54 | 0.08344 | 0.3622 | -44.023 | 6.2411 | 0.02015 | 0.2629 | -39.765 |
| 5 | 20.4819 | 6.23E-26 | 0.0817 | -45.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023468 | -45.172 | 7.894 | 0.007516 | 0.3846 | -47.023 | 6.02 | 0.0275 | 0.2448 | -42.766 |
| 6 | 20.3885 | 8.04E-25 | 0.0781 | -45.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023657 | -45.172 | 7.6357 | 0.007856 | 0.3918 | -47.023 | 6.0524 | 0.02241 | 0.2492 | -42.768 |
| 7 | 20.3554 | 1.19E-24 | 0.0802 | -45.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023354 | -45.172 | 7.6849 | 0.007519 | 0.3791 | -47.023 | 6.02 | 0.0275 | 0.2603 | -42.766 |
| 8 | 20.1256 | 1.96E-24 | 0.0809 | -45.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023468 | -45.172 | 7.5566 | 0.008337 | 0.3933 | -47.023 | 6.0861 | 0.02219 | 0.2328 | -42.767 |
| 9 | 20.5125 | 1.24E-25 | 0.0784 | -48.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023268 | -48.172 | 7.7752 | 0.00699 | 0.3771 | -50.023 | 6.02 | 0.02275 | 0.2567 | -50.023 |
| 10 | 20.2411 | 6.66E-25 | 0.0799 | -48.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023448 | -48.172 | 7.6616 | 0.00778 | 0.379 | -50.023 | 6.4302 | 0.0177644 | 0.2352 | -50.023 |
| 11 | 20.1526 | 3.06E-24 | 0.0789 | -48.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023926 | -48.172 | 7.4977 | 0.00899 | 0.364 | -50.023 | 6.1921 | 0.02333 | 0.2304 | -45.768 |
| 12 | 20.4144 | 8.16E-25 | 0.0771 | -48.179 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023254 | -48.172 | 7.6855 | 0.007489 | 0.3778 | -50.023 | 6.3139 | 0.01971 | 0.1746 | -45.771 |
| 13 | 19.9431 | 1.10E-22 | 0.0818 | -51.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023356 | -51.172 | 7.5418 | 0.008153 | 0.3863 | -53.023 | 6.4633 | 0.01798 | 0.2046 | -48.759 |
| 14 | 19.7817 | 2.31E-22 | 0.0763 | -51.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023154 | -51.172 | 7.8859 | 0.006498 | 0.3796 | -53.023 | 6.65172 | 0.01705 | 0.2148 | -48.769 |
| 15 | 20.5241 | 2.88E-26 | 0.0794 | -51.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023754 | -51.172 | 7.6173 | 0.00832 | 0.3745 | -53.023 | 6.1015 | 0.0218 | 0.2464 | -48.764 |
| 16 | 19.7093 | 2.48E-23 | 0.0813 | -51.178 | 6.0206 | 0.02275 | 0.023095 | -51.172 | 7.3761 | 0.009517 | 0.3659 | -53.023 | 6.9196 | 0.01333 | 0.264 | -48.773 |

Tabla 3.22 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC con 16 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

3.2 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED FTTH FRENTA A LA RED NG-HFC A UNA DISTANCIA DE 10KM

3.2.1. Análisis para el servicio de Datos/VoIP RED FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento del monitoreo óptico OPM para el servicio de voz sobre IP/datos de FTTH en comparación con NG-HFC para el escenario de 16 ONT, como se plantea en 3.1.1.



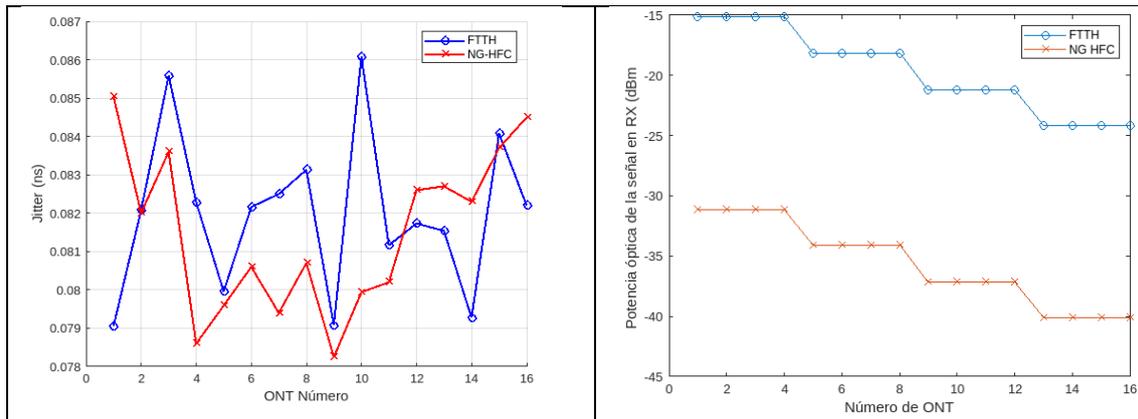


Figura 3.27, Gráficas monitoreo para Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, comparación FTTH frente NG-HFC

En la figura 3.27 la red FTTH a 10 km, los resultados indican una buena calidad de señal con un Factor Q de alrededor de 21 dB en todas las mediciones. La BER es muy baja y el Jitter también es bajo, el cual representa la variación en el tiempo de llegada de los paquetes. La potencia óptica de la señal en el receptor es de alrededor de -15 dBm a -24 dBm, lo que indica una buena potencia de señal.

En la red NG HFC a 10 km, los resultados indican una buena calidad de señal en todas las mediciones, con un Factor Q de alrededor de 20 dB y una BER muy baja en todas las mediciones. La potencia óptica de la señal en el receptor es más baja que en las redes FTTH, alrededor de -31 dBm a -40 dBm en todas las mediciones, lo que indica una mayor atenuación de la señal en la red.

En este escenario, se observa que la red FTTH tiene mejores resultados en términos de factor Q, BER, Jitter y potencia óptica de la señal en RX en todas las pruebas realizadas en comparación con la red NG-HFC. Por ejemplo, en la transmisión de datos y VoIP a 2.5 Gb/s, la red FTTH tiene un factor Q de alrededor de 21 dB, mientras que la red NG-HFC tiene un factor Q de alrededor de 20 dB. Además, la BER de la red FTTH es mucho menor que la BER de la red NG-HFC.

En la transmisión de datos y VoIP a 10 Gb/s, la red FTTH sigue teniendo mejores resultados en términos de Jitter y potencia óptica de la señal en RX en comparación con la red NG-HFC

En general para este servicio, los resultados indican una buena calidad de señal en todas las mediciones; la red FTTH presenta un mejor desempeño óptico en todos los escenarios y pruebas realizadas en comparación con la red NG-HFC. Esto se debe a que la red FTTH utiliza fibra óptica hasta la casa del usuario, lo que permite una mayor capacidad de ancho de banda y una menor atenuación de la señal en comparación con la red NG-HFC, que utiliza coaxial y fibra óptica hasta el nodo. La potencia óptica de la señal en el receptor es más baja en las redes NG HFC, pero aun así indica una buena potencia de señal.



3.2.2. Análisis para el servicio de Broadcast video RED FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km

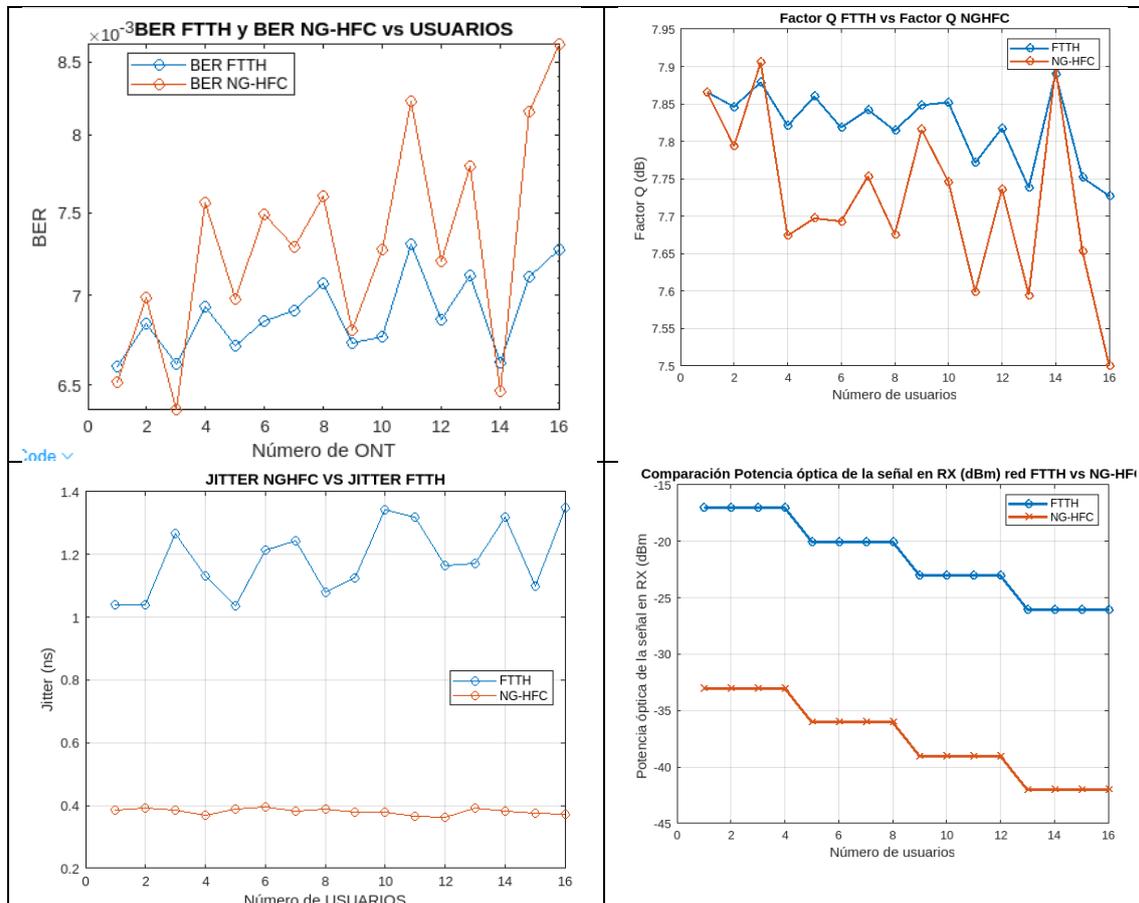


Figura 3.28, Gráficas desempeño para Video a 0.8 Gbps, 10 km, comparación FTTH NG-HFC

En la figura 3.28 los resultados indican que el sistema FTTH tiene un mejor rendimiento que el sistema NG-HFC en términos de factor Q, BER, Además, la potencia óptica en recepción también es más alta en el sistema FTTH. Estos resultados sugieren que el sistema FTTH tiene una mejor calidad de señal para el servicio de Video y puede proporcionar una mejor experiencia de usuario en comparación con el sistema NG-HFC.

3.2.1 Análisis para el servicio de RoF RED FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km

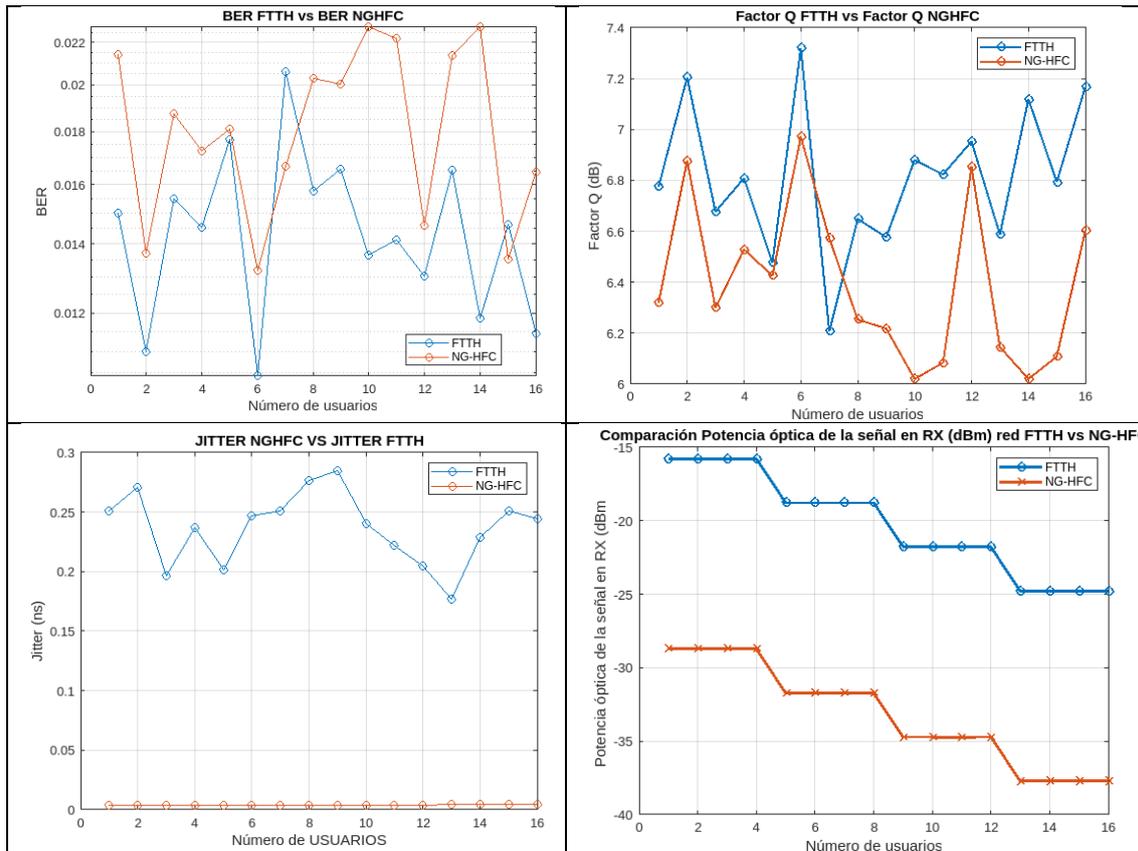


Figura 3.29, gráficas desempeño para RoF a 10 Gbps, 10 km, comparación FTTH NG-HFC

Observando los valores de factor Q, se observa que los valores para el escenario FTTH RoF transmisión varían entre 6,02 y 6,9712, mientras que los valores para NG-HFC RoF transmisión varían entre 6,02 y 6,764. Por lo tanto, FTTH RoF tiene valores más altos de factor Q en general, indicador que se puede ver gráficamente. lo que indica una mayor calidad de señal.

Con respecto a la tasa de error de bit, los valores para el escenario FTTH RoF varían entre 0,01357 y 0,2275, mientras que los valores para NG-HFC transmisión varían entre 0,01333 y 0,02275. En este caso, para el subsistema RoF no es evidente determinar cuál de las dos tecnologías es mejor debido a que los resultados presentaron valores ligeramente similares.

El Jitter, que mide la variación en el tiempo de llegada de los bits, es similar para ambas tecnologías de transmisión. Los valores varían entre 0,1746 y 0,2653 para FTTH y entre 0,2046 y 0,2603 para NG-HFC. No hay una clara ventaja en términos de Jitter para una tecnología sobre la otra.

Por último, la potencia óptica de la señal en RX varía entre -50,023 dBm y -28,765 dBm para NG-HFC, mientras que para FTTH varía entre -48,773 dBm y -34,764 dBm. En este caso, RoF para FTTH tiene valores más altos de potencia óptica de la señal en RX en general, lo que indica una mayor eficiencia en la transmisión.



3.3 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED FTTH FRENTE A LA RED NG-HFC A UNA DISTANCIA DE 20KM

3.3.1 Análisis para el servicio de datos/VoIP RED FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 20km

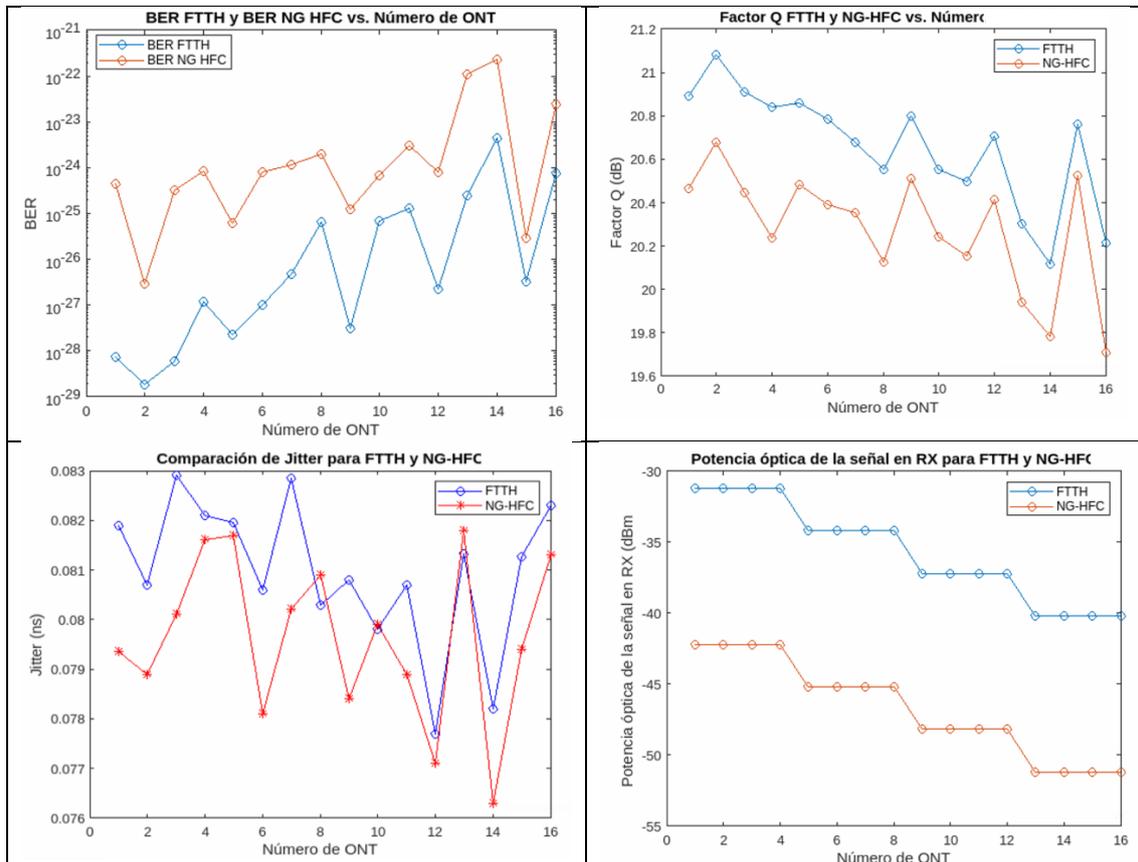


Figura 3.30, Gráficas desempeño para datos/VoIP a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG-HFC

Para la figura 3.30, en la red FTTH a 20 km, los resultados indican una calidad de señal un poco más baja que en la red a 10 km. El Factor Q es de alrededor de 20 dB en todas las mediciones. La potencia óptica de la señal en el receptor es más baja, alrededor de -31 dBm a 40 dBm en las mediciones, lo que indica una pérdida de potencia en la señal a lo largo del trayecto de 20 km en comparación con las de 10km. podemos ver que en general, los valores de Factor Q, BER, Jitter y Potencia óptica en recepción son mejores para FTTH que para NG HFC.

En cuanto al Factor Q, los valores son consistentemente más altos para FTTH que para NG HFC en todas las mediciones, lo que indica una mejor calidad de la señal para FTTH. La BER es significativamente menor para FTTH que para NG HFC. BER más bajo indica que hay menos errores de bits en la transmisión de datos, lo que es una buena señal para la calidad de la señal.



El Jitter también es menor para FTTH que para NG HFC. El Jitter bajo indica que hay menos variabilidad en los tiempos de llegada de los bits, lo que también indica una mejor calidad de la señal. Finalmente, la Potencia óptica en recepción es consistentemente más alta para FTTH que para NG HFC en todas las mediciones, lo que significa que la señal de FTTH se recibió con una mayor potencia que la de NG HFC. En resumen, para este servicio, los resultados sugieren que FTTH tiene una mejor calidad de señal en comparación con NG HFC.

3.3.2 Análisis para el servicio de Broadcast video red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 20km

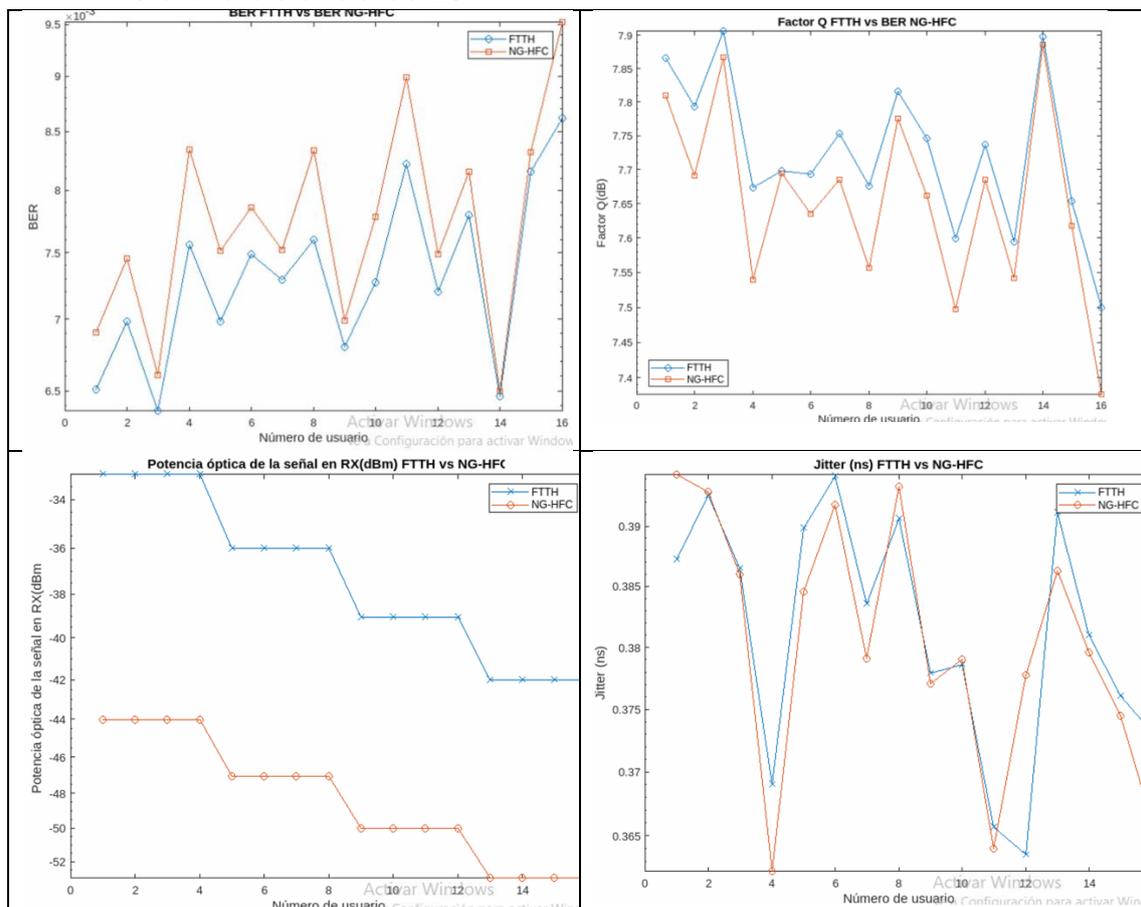


Figura 3.31, gráficas desempeño para broadcast a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG-HFC

En la Figura 3.31, en cuanto al Factor Q, se observa que los valores son similares en ambas tecnologías, con una ligera ventaja para FTTH en algunos casos. Esto indica que la calidad de la señal es buena en ambas tecnologías.

Sin embargo, la tasa de error de bits (BER) es significativamente más baja en FTTH que en NG-HFC en la mayoría de los casos. Esto significa que la tecnología FTTH ofrece una mayor confiabilidad en la transmisión de datos, con menos errores en la recepción de los mismos. En cuanto al Jitter, se observa



que los valores son similares en ambas tecnologías, valores más bajos indican una mejor calidad de la transmisión.

Finalmente, la potencia óptica de la señal en RX es significativamente mayor en FTTH que en NG-HFC. Esto indica que la señal llega con mayor intensidad en FTTH, lo que puede traducirse en una mejor calidad de imagen y sonido, y que la señal del sistema FTTH no está siendo atenuada en gran medida.

En resumen, los datos obtenidos que se representan en la gráfica indican que la tecnología FTTH tiene un mejor desempeño que NG-HFC para el servicio de Broadcast video, en un enlace de 20 km, en términos de BER y potencia óptica de la señal en RX, mientras que los valores de Factor Q y Jitter son similares en ambas tecnologías, pero con una tendencia ligera a FTTH con mejor desempeño en dicho caso.

3.3.3 Análisis para el servicio de RoF video red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 20km

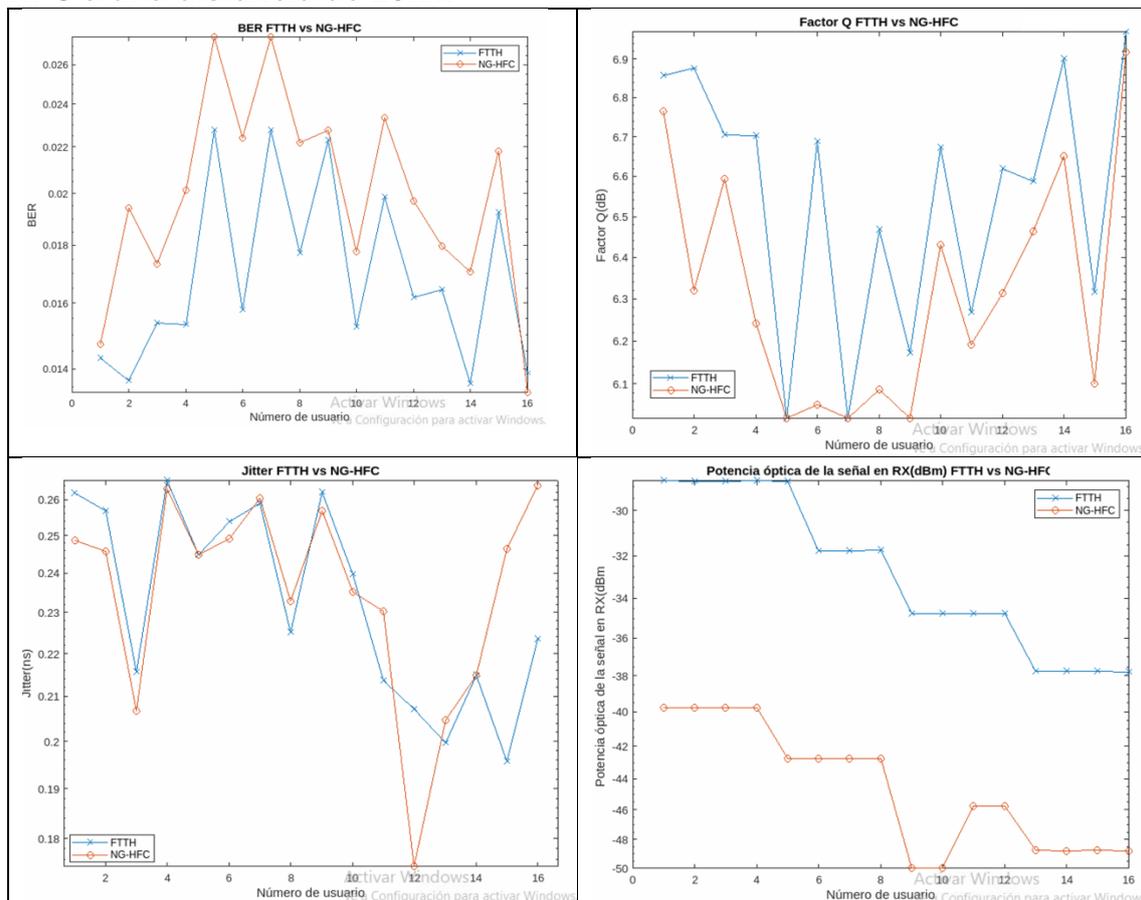


Figura 3.32, gráficas desempeño para RoF a 2.5 Gbps, 20 km, comparación FTTH NG-HFC

En la figura 3.32 se puede observar que en la transmisión RoF, la potencia óptica de la señal del sistema FTTH en RX es considerablemente mayor que en la transmisión NG-HFC, lo que indica que la señal llega con mayor potencia en la transmisión RoF. Además, el factor Q en la transmisión RoF también es mayor



en promedio, lo que sugiere una mejor calidad de la señal. En cuanto a la BER (tasa de error de bits), la transmisión FTTH presenta valores ligeramente menores en la mayoría de los casos, lo que indica una menor tasa de errores en la transmisión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores de BER para ambas transmisiones son altos, lo que sugiere una deficiente calidad de la señal en general.

En general, los resultados sugieren que la transmisión RoF a través de FTTH posee una mejor calidad de la señal en términos de potencia óptica y factor Q, sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar dependiendo de las condiciones específicas de la red y del entorno en el que se realizan las transmisiones, por ejemplo, la variación del tipo de fibra, si el sistema está compensado, el tipo del algoritmo empleado, las frecuencias portadoras y plan de canalización, el número de usuarios finales.

3.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EXACT FIT

Al ejecutarse el CCM en el que está el script de Matlab™ con la lógica del algoritmo de asignación dinámica, se observa su funcionamiento en la figura 3.34, donde muestra la grilla que se define dentro del archivo CCM_Algorithmo, el ancho del slot del servicio, definidos en los parámetros de los Pseudocódigos del algoritmo (fig 2.33, Fig 2.34) ubica el espectro necesario dentro del primer slot disponible que tenga la banda espectral requerida.

| Parámetros de simulación | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------|
| | Parámetro | servicio | Valores |
| escenarios con Asignación de espectro | Número de Slots | DATOS/VoIP | 16 |
| | | Broadcast video | 16 |
| | | RoF | 16 |
| | Cantidad de espectro por slot | DATOS/VoIP | 6,25GHz |
| | | Broadcast video | 12,5 GHz |
| | | RoF | 100 GHz |
| Distancia | | | 10 km |
| | | | 20 km |
| Tasa de transmisión | | | 2,5 Gbps |
| | | | 10 Gbps |
| Número de Usuarios | ONT, COAX GATEWAY | | 1 |
| | | | 2 |
| | | | 4 |
| | | | 8 |
| | | | 16 |



Tabla 3.33 parámetros para los sistemas FTTH y NG-HFC con asignación dinámica de espectro.

```
Ocupacion disponible del lado izquierdo en:5

disponibilidadSlots =
    -1  -1  -1  -1  1  0  0  0  0  0  0  0  -1  -1  -1  -1

disponibilidadUsuarios =
    0  0  0  0  4  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0

Table =
    disponibilidadSlots
    [1x16 double]

Table2 =
    disponibilidadUsuarios
    [1x16 double]

contador =
    5

n =
    -6

CF =
    193.0625

b =
    193.0625
    4.0000
```

Figura 3.34, funcionamiento asignación de espectro del algoritmo Exact Fit.

3.4.1 Escenario red FTTH con método de asignación dinámica de espectro a 10Km

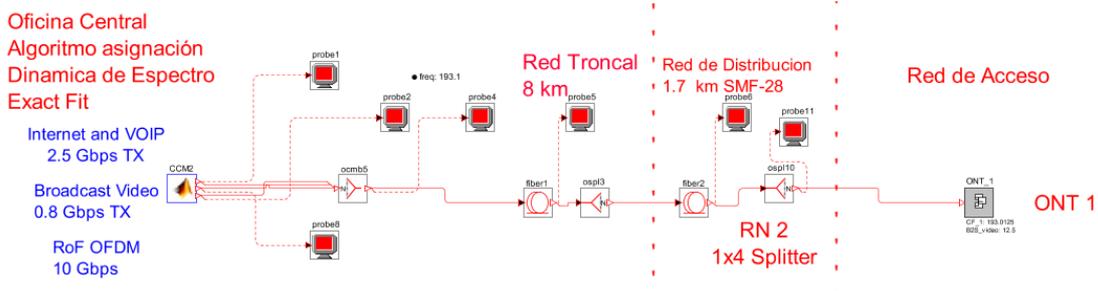


Figura 3.35 Escenario Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.35 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 1 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.



Las tablas 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red FTTH con método de asignación dinámica de espectro a una distancia de 10Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 ONT respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-------------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|--------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 18.9257 | 1.91E-18 | 0.1077 | -18.124 | 11.1404 | 0.000155124 | 0.029536 | -18.124 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.3613 | -12.051 | 6.02 | 0.0275 | 0.2041 | -12.051 |

Tabla 3.24 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT.

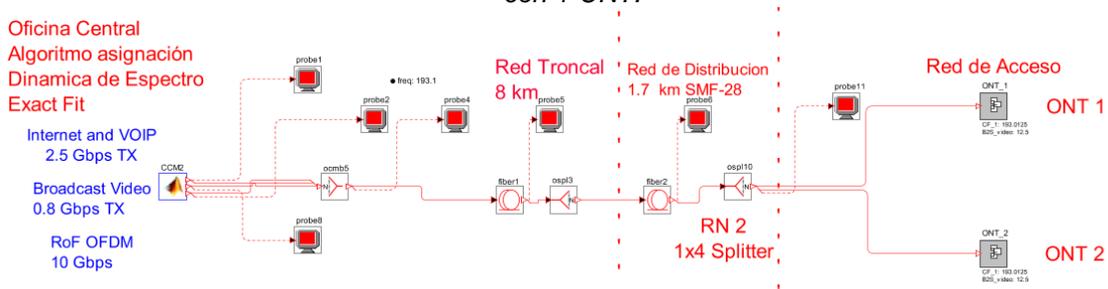


Figura 3.36 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.36 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 2 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-------------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|--------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 18.9034 | 2.41E-18 | 0.1085 | -18.124 | 11.1372 | 0.000157674 | 0.02916 | -18.124 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.3768 | -12.051 | 6.02 | 0.0275 | 0.2786 | -12.051 |
| 2 | 1.89E+01 | 1.95E-18 | 0.108453 | -18.124 | 11.1415 | 0.000154596 | 0.02931 | -18.124 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.3877 | -12.051 | 6.02 | 0.0275 | 0.2732 | -12.051 |

Tabla 3.25 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT.

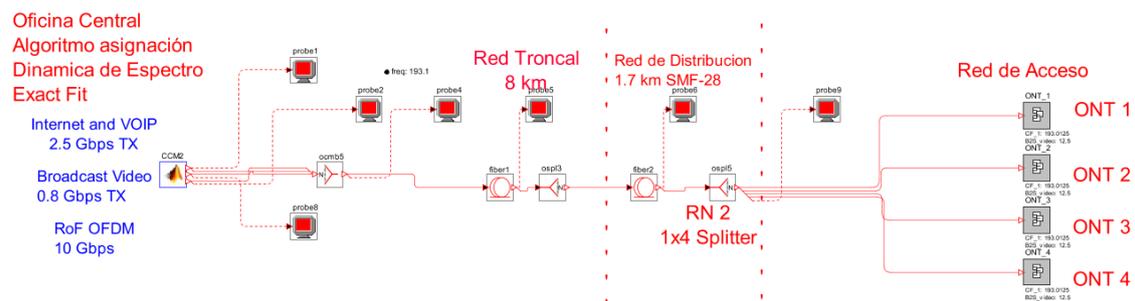


Figura 3.37 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.37 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 4 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como



referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|--------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.2036 | 2.31E-13 | 0.0925 | -18.487 | 8.5114 | 0.0003826 | 0.02827 | -11.83 | 6.3531 | 1.90E-02 | 0.9811 | -11.83 | 6.02 | 0.0275 | 0.03080 | -12.051 |
| 2 | 19.0275 | 7.38E-19 | 0.0901 | -17.962 | 8.9471 | 0.0002473 | 0.0280 | -17.962 | 6.480949 | 0.01755 | 1.0826 | -11.833 | 6.02 | 0.0275 | 0.01966 | -12.051 |
| 3 | 17.8739 | 1.02E-14 | 0.0918 | -18.187 | 8.4345 | 0.000409 | 0.02833 | -18.187 | 6.02 | 0.2275 | 1.2948 | -11.939 | 6.02 | 0.0275 | 0.2632 | -12.051 |
| 4 | 19.083 | 2.77E-19 | 0.0911 | -18.062 | 8.95276 | 0.002483 | 0.02775 | -11.83 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.05 | 0.0275 | 0.2748 | -12.051 |

Tabla 3.26 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT.

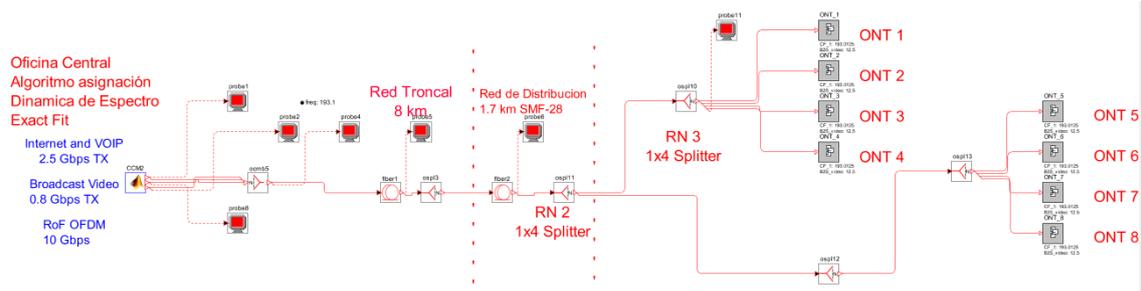


Figura 3.37 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.37 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 8 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|-----------|------------|--|---------------------------|--------|------------|--|
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.3669 | 3.44E-13 | 0.0909 | -25.04 | 8.5085 | 0.003831 | 0.02821 | -11.83 | 6.7195 | 1.54E-02 | 0.99 | -18.791 | 6.02 | 0.0275 | 0.1780 | -12.051 |
| 2 | 19.0082 | 8.84E-19 | 0.0884 | -24.72 | 8.9495 | 0.002385 | 0.02786 | -17.962 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.0275 | 0.3093 | -12.051 |
| 3 | 17.8763 | 6.41E-15 | 0.09083 | -24.983 | 8.4257 | 0.004117 | 0.0282 | -18.011 | 6.21 | 0.0209144 | 1.0311 | -18.932 | 6.02 | 0.0275 | 0.1903 | -12.051 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.2275 | 0.8791 | -24.615 | 6.05 | 0.0275 | 0.2633 | -12.051 |
| 5 | 18.5491 | 1.53E-17 | 0.098 | -25.39 | 8.8354 | 0.002767 | 0.02746 | -21.499 | 6.02 | 0.2275 | 1.2794 | -24.78 | 6.02 | 0.0275 | 0.1571 | -15.051 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.2275 | 1.3648 | -24.88 | 6.02 | 0.0275 | 0.2871 | -15.051 |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.1489 | 0.2148 | 0.8345 | -24.857 | 6.02 | 0.0275 | 0.1932 | -15.051 |
| 8 | 18.5995 | 1.72E-17 | 0.08873 | -25.64 | 8.9425 | 0.002459 | 0.02779 | -21.790 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.05 | 0.0275 | 0.1240 | -15.051 |

Tabla 3.27 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT.

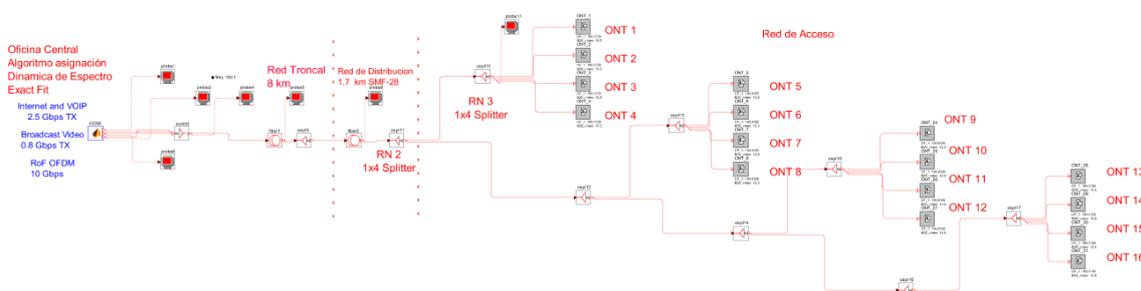


Figura 3.38 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.38 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 16 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como



referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|-----------|------------|--|---------------------------|---------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.3669 | 3.44E-13 | 0.0909 | -25.04 | 8.5147 | 0.003795 | 0.02792 | -21.448 | 6.7195 | 1.54E-02 | 0.99 | -18.791 | 6.02 | 0.02275 | 0.2044 | -12.049 |
| 2 | 19.0082 | 8.84E-19 | 0.0884 | -24.72 | 8.9466 | 0.02475 | 0.0276 | -20.97 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 3 | 17.8763 | 6.41E-15 | 0.09083 | -24.983 | 8.7069 | 0.003155 | 0.0276 | -21.186 | 6.21 | 0.0209144 | 1.0311 | -18.932 | 6.02 | 0.02275 | 0.1351 | -12.049 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 5 | 18.5491 | 1.53E-17 | 0.088 | -25.39 | 8.8324 | 0.002786 | 0.02723 | -24.502 | 6.02 | 0.02275 | 0.8791 | -24.615 | 6.05 | 0.02275 | 0.2116 | -12.049 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 8 | 18.5995 | 1.72E-17 | 0.08873 | -25.64 | 8.8928 | 0.002721 | 0.02771 | -24.793 | 6.1489 | 0.02148 | 0.8345 | -24.857 | 6.02 | 0.02275 | 0.1650 | -15.049 |
| 9 | 17.177 | 2.61E-13 | 0.0919 | -21.488 | 8.5134 | 0.003821 | 0.02791 | -21.888 | 6.022 | 0.02275 | 0.9194 | -20.590 | 6.02 | 0.02275 | 0.1364 | -15.049 |
| 10 | 18.7974 | 2.53E-18 | 0.0905 | -20.980 | 8.9296 | 0.0026207 | 0.0278 | -20.96 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 11 | 17.878 | 1.25E-14 | 0.0928 | -21.188 | 8.087 | 0.003161 | 0.02772 | -21.188 | 6.6099 | 0.01609 | 1.20 | -21.1002 | 6.05 | 0.02275 | 0.1925 | -18.050 |
| 12 | 18.5404 | 1.47E-17 | 0.0883 | -21.066 | 8.9859 | 0.002467 | 0.02751 | -21.065 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 13 | 17.82 | 1.61E-14 | 0.0918 | -24 | 8.8196 | 0.002848 | 0.0276 | -24.5 | 6.02 | 0.0275 | 1.239 | -24.5 | 6.02 | 0.02275 | 0.2856 | -21.050 |
| 14 | 18.5653 | 4.04E-17 | 0.0905 | -24.5 | 8.8137 | 0.002848 | 0.02676 | -24.5 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 15 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 16 | 18.7653 | 4.61E-14 | 0.09013 | -24.793 | 8.8977 | 0.002765 | 0.0276 | -24.78 | 6.02 | 0.02275 | 1.2591 | -24.089 | 6.02 | 0.02275 | 0.2658 | -21.050 |

Tabla 3.28 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT.

3.4.2 Escenario red FTTH con método de asignación dinámica de espectro a 20Km

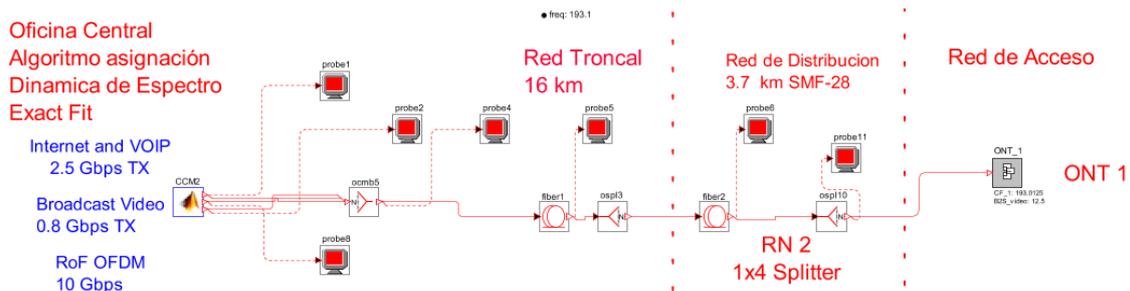


Figura 3.39 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.39 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 1 ONT y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

Las tablas 3.29, 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red FTTH con método de asignación dinámica de espectro a una distancia de 20Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 ONT respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|--------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 19.656 | 1.43E-16 | 0.1014 | -21.176 | 11.1565 | 0.0001498 | 0.02779 | -28.176 | 6.02 | 0.0275 | 1.3964 | -22.064 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2629 | -22.044 |

Tabla 3.29 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 1 ONT.

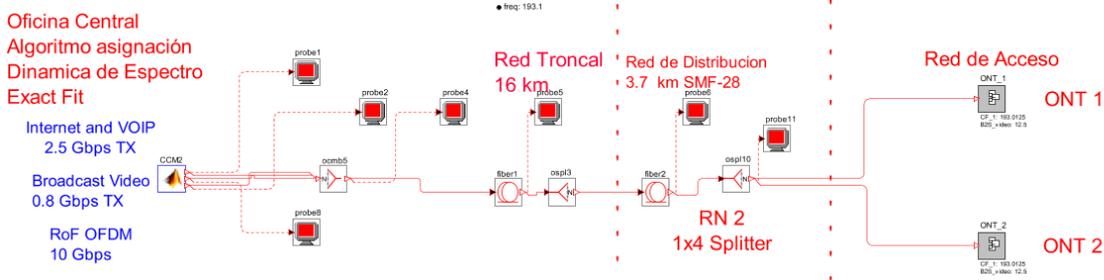


Figura 3.40 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.40 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 2 ONT y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------|-----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 19.037 | 2.2352E-19 | 0.1013 | -28.176 | 11.17 | 0.0001473 | 0.02779 | -22.044 | 6.02 | 2.275E-02 | 1.2993 | -22.044 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1698 | -22.044 |
| 2 | 18.9767 | 4.94E-19 | 0.1021 | -28.176 | 11.1514 | 0.00015098 | 0.02817 | -22.044 | 6.02 | 2.275E-02 | 1.3778 | -22.044 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1331 | -22.044 |

Tabla 3.30 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 2 ONT.

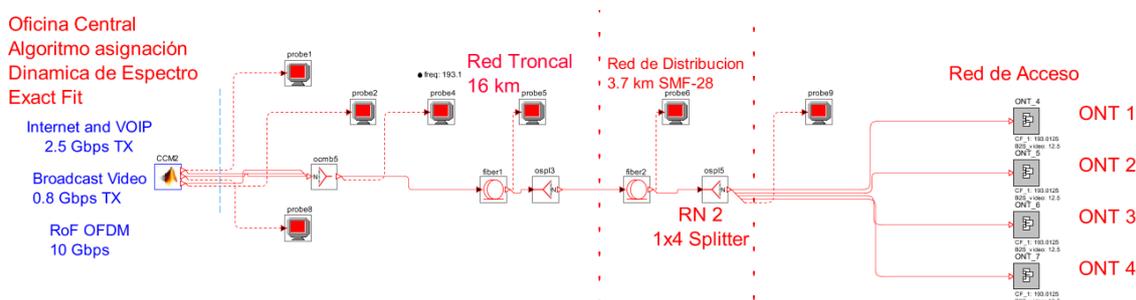


Figura 3.41 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.41 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 4 ONT y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|---------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.3383 | 2.38E-09 | 0.09 | -28.309 | 8.5644 | 0.003618 | 0.02732 | -28.309 | 6.51 | 0.01742 | 0.9518 | -21.9 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2261 | -22.044 |
| 2 | 19.2256 | 1.65E-9 | 0.01071 | -27.93 | 8.9757 | 0.00249 | 0.0273 | -27.936 | 6.3547 | 0.01936 | 0.7742 | -21.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2402 | -22.044 |
| 3 | 17.1146 | 6.43E-13 | 0.091121 | -28.168 | 8.6806 | 0.003243 | 0.02723 | -28.178 | 6.334 | 0.01905 | 10.409 | -22.079 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1582 | -22.044 |
| 4 | 178.425 | 1.06E-14 | 0.0916 | -28.155 | 8.9678 | 0.002446 | 0.02665 | -28.11011 | | | | | 6.02 | 2.75E-02 | 1628 | -22.044 |

Tabla 3.31 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 4 ONT.

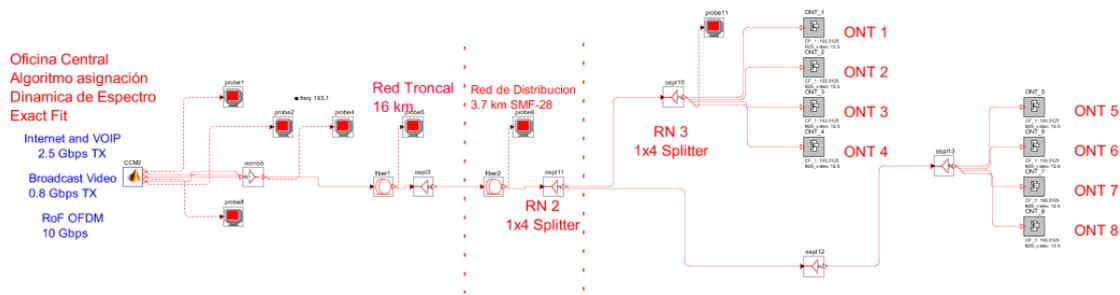


Figura 3.42 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT a una distancia de 20 Km.

En la figura 3.42 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 8 ONT y una distancia de 20 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuesta en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|---------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH y ALGORITMO DE ASIGANCION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGANCION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.3619 | 1.2347E-13 | 0.09 | -28.309 | 85.453 | 0.003758 | 0.0273 | -28.309 | 6.5 | 0.0175 | 0.9391 | -21.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2451 | -22.044 |
| 2 | 18.8607 | 9.7574E-19 | 0.0867 | -27.936 | 8.9617 | 0.002474 | 0.02728 | -27.936 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | | | | |
| 3 | 17.6913 | 8.653E-15 | 0.08984 | -28.178 | 8.6869 | 0.003210 | 0.0271 | -28.178 | 6.1501 | 0.02143 | 1.057 | -22.079 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2877 | -22.044 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.02275 | 1.0971 | -22.079 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2469 | -22.044 |
| 5 | 17.17 | 1.01E-12 | 0.0866 | -31.309 | 8.7653 | 3.14E-03 | 0.02697 | -31.406 | 6.3495 | 0.01897 | 1.1505 | -24.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1175 | -25.044 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.2792 | 0.02005 | 0.9142 | -24.906 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.1134 | 0.02346 | 1.078 | -25.079 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 8 | 18.7519 | 3.64E-18 | 0.087 | -33.801 | 8.8686 | 0.002707 | 0.0273 | -3.185,216 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2595 | -25.044 |

Tabla 3.32 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 8 ONT.

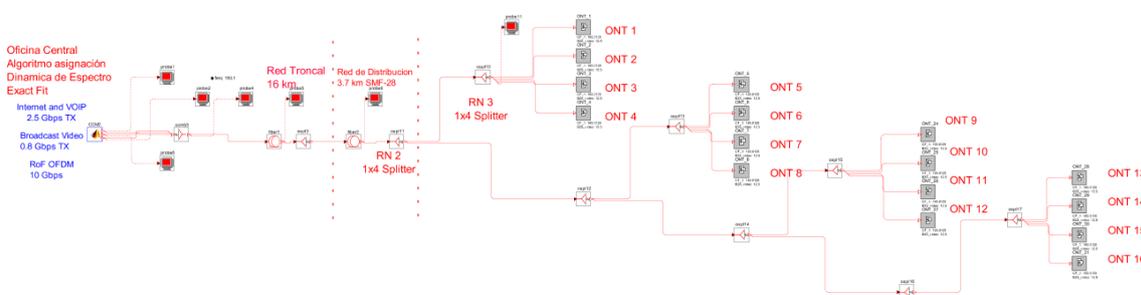


Figura 3.43 Escenario red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT a una distancia de 10 Km.

En la figura 3.43 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema FTTH que emplea un método de asignación dinámica de espectro para 16 ONT y una distancia de 10 Km, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [21]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6 y 2.8.



| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| Red FTTH Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ONT Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.388 | 1.6489E-13 | 0.0914 | -29.311 | 8.5515 | 3.68E-03 | 0.02741 | -28.311 | 6.4873 | 1.75E-02 | 0.972 | -21.907 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2707 | -22.045 |
| 2 | 18.8327 | 6.3801E-19 | 0.0873 | -27.932 | 8.9563 | 0.002544 | 0.0274 | -27.932 | 6.2512 | 0.02 | 0.9948 | -21.907 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2897 | -25.045 |
| 3 | 17.7485 | 8.1653E-15 | 0.08813 | -28.18 | 8.6867 | 0.003658 | 0.02707 | -28.180 | 6.2375 | 0.02037 | 1.0805 | -22.079 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1533 | -22.045 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 5 | 18.4318 | 2.4600E-16 | 0.0876 | -31.032 | 8.6803 | 0.02955 | 0.0273 | -31.08 | 6.02 | 0.02275 | 1.2699 | -31.032 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2885 | -25.045 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 8 | 18.1615 | 2.89E-16 | 0.0841 | -31.816 | 8.8443 | 0.002805 | 0.02723 | -31.852 | 6.02 | 0.02275 | 1.2483 | -27.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2592 | -25.045 |
| 9 | 18.8675 | 7.5950E-13 | 0.08912 | -34.308 | 8.4359 | 0.004088 | 0.02749 | -34.308 | 6.02 | 0.02275 | 1.2483 | -27.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2592 | -25.045 |
| 10 | 18.408 | 7.3855E-17 | 0.08634 | -33.948 | 8.8955 | 0.002709 | 0.02757 | -33.933 | 6.02 | 0.02275 | 1.2483 | -27.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2592 | -25.045 |
| 11 | 17.5111 | 2.8757E-14 | 0.08399 | -34.177 | 8.6017 | 0.003543 | 0.0272 | -34.177 | 6.3874 | 0.01928 | 1.1217 | -28.079 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1468 | -28.045 |
| 12 | 18.4706 | 1.4604E-16 | 0.0873 | -34.012 | 8.843 | 0.002852 | 0.0274 | -34.012 | 6.02 | 0.02275 | 1.2483 | -27.906 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.2592 | -25.045 |
| 13 | 17.3757 | 8.1029E-14 | 0.08237 | -37.596 | 8.4951 | 0.003864 | 0.0271 | -37.306 | 6.02 | 0.02575 | 1.2162 | -37.045 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1332 | -28.045 |
| 14 | 17.6615 | 5.0484E-14 | 0.08154 | -37.608 | 8.5994 | 0.003489 | 0.0268 | -37.606 | 6.02 | 0.02575 | 1.2162 | -37.045 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.1332 | -28.045 |
| 15 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 16 | 17.4221 | 5.540E-14 | 0.084 | -37.816 | 8.6627 | 0.003296 | 0.0266 | -37.852 | 6.02 | 0.02575 | 1.2015 | -37.038 | 6.02 | 2.75E-02 | 0.146 | -28.045 |

Tabla 3.33 Resultados parámetros OPM para la Red FTTH Asignación dinámica de espectro con 16 ONT.

3.4.3 Escenario red NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro a 10Km

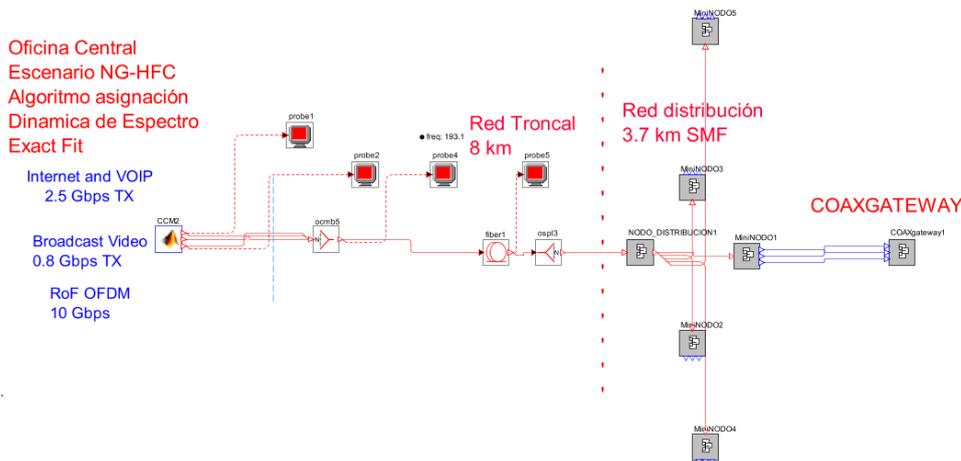


Figura 3.44, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 1 usuario.

En la figura 3.44 se muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 1 Coax Gateway y una distancia de 10 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

Las tablas 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro a una distancia de 10Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 Coax Gateway respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 18.792 | 3.28E-18 | 0.1004 | -30.414 | 11.07 | 1.78E-04 | 0.0274 | -30.612 | 6.2404 | 2.31E-02 | 1.1071 | -24.382 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2742 | -24.566 |

Tabla 3.34 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 1 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

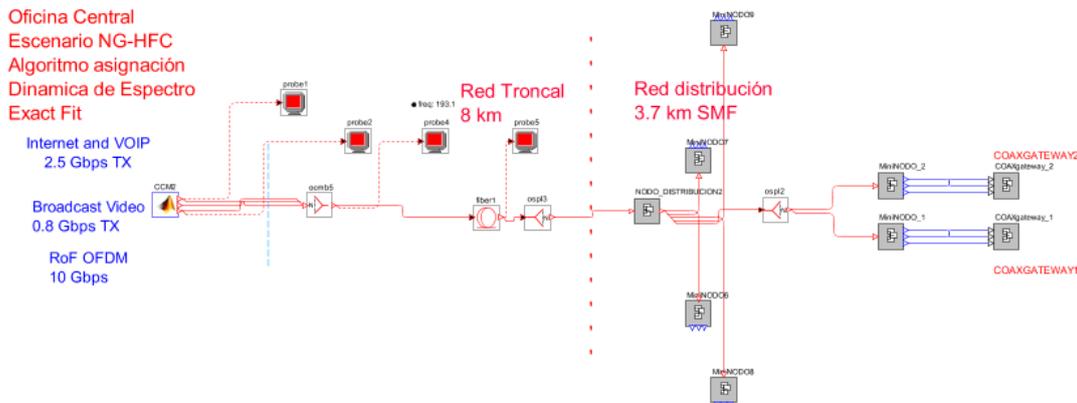


Figura 3.45, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 2 Coax Gateway

La figura 3.45 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 2 Coax Gateway y una distancia de 10 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2,5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 18.8834 | 2.56E-18 | 0.1002 | -30.14 | 11.095 | 1.80E-04 | 0.02772 | -30.612 | 6.02 | 2.85E-02 | 1.348 | -24.382 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2976 | -24.566 |
| 2 | 18.8709 | 6.77E-18 | 0.1013 | -30.14 | 11.1331 | 0.0001563 | 0.02 | -30.612 | 6.0447 | 0.02292 | 1.11 | -24.382 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2467 | -24.566 |

Tabla 3.35 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 2 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

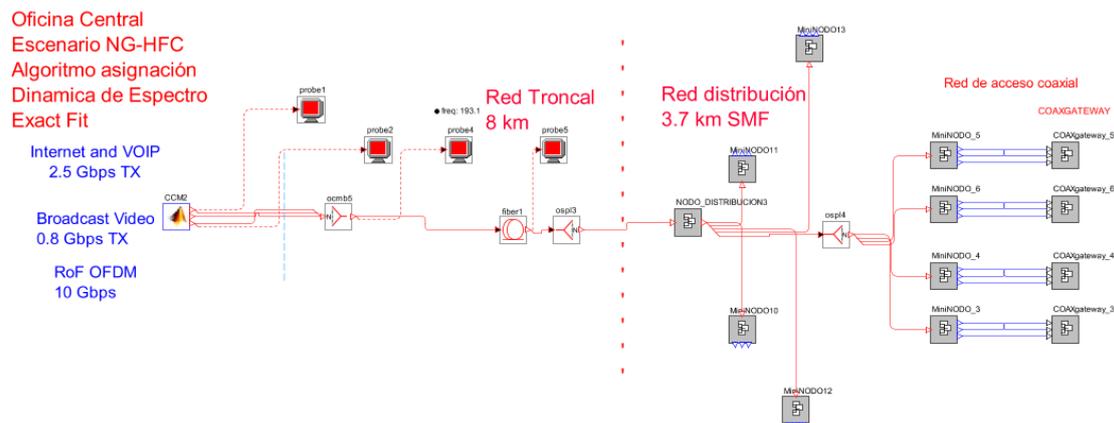


Figura 3.46, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 4 usuarios.

La figura 3.46 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 4 Coax Gateway y una distancia de 10 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.



| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.2552 | 2.70E-13 | 0.0889 | -30.627 | 11.1283 | 1.63E-04 | 0.02785 | -30.612 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.3144 | -24.184 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2794 | -24.566 |
| 2 | 18.82 | 1.54E-18 | 0.0884 | -30.266 | 11.09 | 0.000168 | 0.02766 | -30.612 | 6.02 | 0.0275 | 1.33 | -24.184 | 6.02 | 0.02275 | 0.1536 | -24.566 |
| 3 | 18.93 | 1.05E-12 | 0.0891 | -30.627 | 11.104 | 0.000168 | 0.02751 | -30.612 | 6.7074 | 0.01555 | 1.1074 | -24.184 | 6.02 | 0.02275 | 0.2869 | -24.566 |
| 4 | 18.7809 | 2.89E-18 | 0.0819 | -30.627 | 11.1315 | 0.0001557 | 0.02771 | -30.612 | | | | | 6.02 | 0.02275 | 0.2457 | -24.566 |

Tabla 3.36 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 4 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

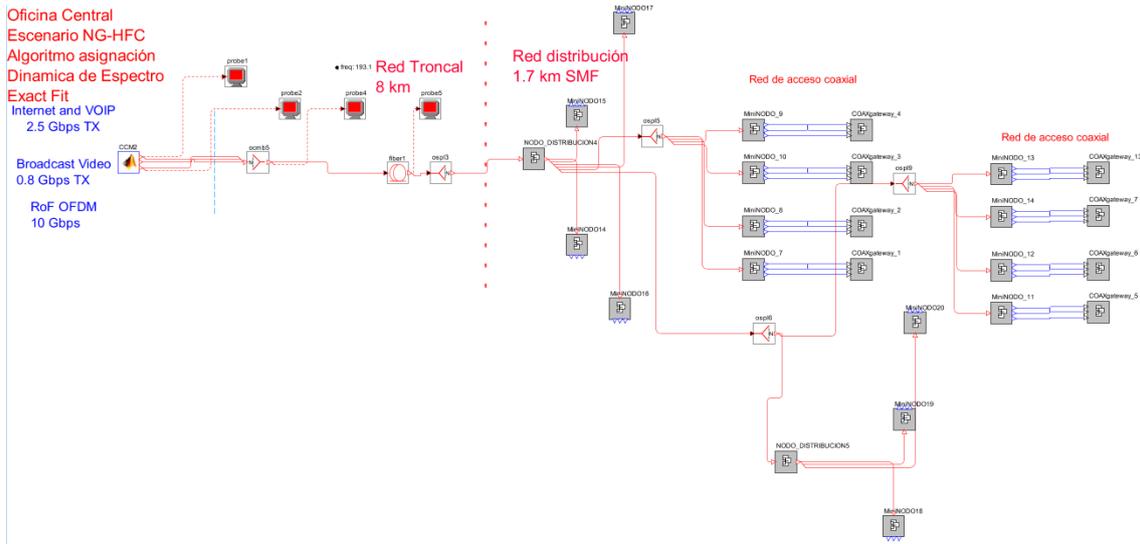


Figura 3.47, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 8 usuarios.

La figura 3.47 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 8 Coax Gateway y una distancia de 10 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.2996 | 3.23E-13 | 0.0879 | -30.627 | 11.1083 | 1.69E-03 | 0.0278 | -30.612 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.2978 | -24.184 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2539 | -24.566 |
| 2 | 18.8533 | 1.03E-18 | 0.0817 | -30.266 | 11.121 | 0.0001591 | 0.027 | -30.612 | | | | | | | | |
| 3 | 17.71 | 1.12E-14 | 0.0882 | -30.454 | 11.1244 | 0.0001577 | 0.0276 | -30.612 | 6.6029 | 0.01584 | 1.1099 | -24.184 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1486 | -24.566 |
| 4 | | | | | | | | | | | | | 6.02 | 0.0275 | 0.9375 | -24.336 |
| 5 | 18.2945 | 5.48E-16 | 0.0881 | -33.871 | 11.0703 | 0.0002914 | 0.0271 | -33.612 | 6.02 | 0.02275 | 1.243 | -33.321 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2513 | -27.566 |
| 6 | | | | | | | | | 6.02 | 0.02275 | 1.382 | -33.389 | | | | |
| 7 | | | | | | | | | 6.02 | 0.02275 | 1.2652 | -33.415 | | | | |
| 8 | 18.2644 | 4.41E-16 | 0.0885 | -34.143 | 11.0813 | 0.0001936 | 0.0273 | -33.612 | | | | | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1519 | -27.566 |

Tabla 3.37 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 8 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

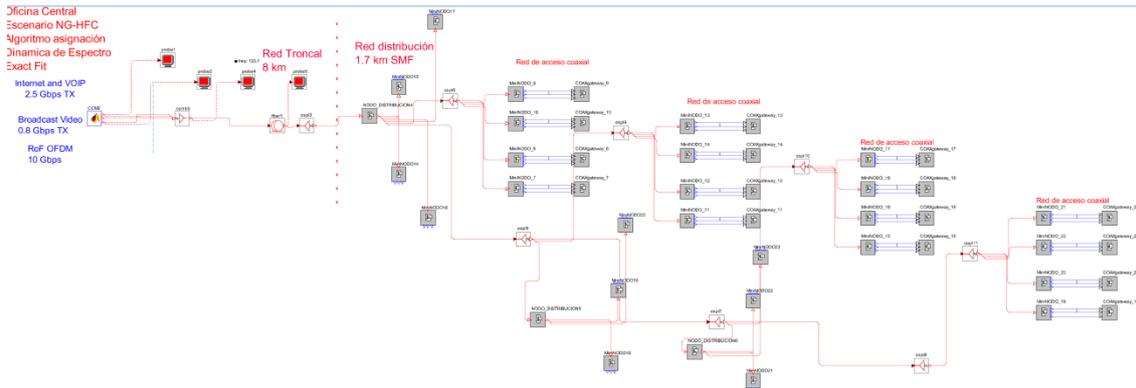


Figura 3.48, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 10Km para 16 usuarios.

La figura 3.48 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 16 Coax Gateway y una distancia de 10 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 10Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 16.994 | 2.84E-12 | 0.0895 | -30.827 | 11.1266 | 1.57E-04 | 0.02773 | -30.612 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.3655 | -24.385 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2521 | -24.566 |
| 2 | 18.7902 | 1.65E-18 | 0.08564 | -30.465 | 11.1118 | 0.000176 | 0.02776 | -30.612 | 6.02 | 0.2275 | 1.1295 | -23.385 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2312 | -24.566 |
| 3 | 17.7 | 2.24E-14 | 0.0855 | -30.465 | 11.3618 | 0.0001614 | 0.0277 | -30.612 | 6.8895 | 0.01349 | 1.1295 | -23.385 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.254 | -24.566 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.2275 | 0.9376 | -24.536 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2312 | -24.566 |
| 5 | 18.2052 | 2.46E-16 | 0.0857 | -33.508 | 11.0399 | 0.0001966 | 0.02755 | -33.61 | 6.02 | 0.0275 | 1.1825 | -33.266 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2484 | -27.566 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.0275 | 1.18775 | -33.522 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1484 | -27.566 |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.0275 | 1.2643 | -33.56 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2547 | -27.566 |
| 8 | 18.08 | 5.84E-16 | 0.0801 | -33.764 | 11.0825 | 0.0001915 | 0.0275 | -33.61 | 6.02 | 0.0275 | 1.2587 | -36.824 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2639 | -27.566 |
| 9 | 16.58 | 7.82E-12 | 0.0844 | -36.824 | 10.9764 | 0.0002248 | 0.02715 | -36.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.1295 | -36.824 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1454 | -30.566 |
| 10 | 18.025 | 1.02E-15 | 0.08575 | -36.465 | 10.9676 | 0.0002265 | 0.02729 | -36.61 | 6.02 | NO SOLICITUD SERVICIO | NO SOLICITUD SERVICIO | NO SOLICITUD SERVICIO | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1454 | -30.566 |
| 11 | 17.284 | 4.84E-13 | 0.0842 | -36.807 | 10.9677 | 0.0002287 | 0.02682 | -36.61 | 6.7435 | 0.01501 | 1.04 | -36.641 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1505 | -30.566 |
| 12 | 18.08 | 5.73E-16 | 0.0861 | -39.266 | 10.9815 | 0.00021 | 0.027 | -36.61 | 6.02 | NO SOLICITUD SERVICIO | NO SOLICITUD SERVICIO | NO SOLICITUD SERVICIO | 6.02 | 2.28E-02 | 0.257 | -33.566 |
| 13 | 16.8688 | 3.01E-12 | 0.0828 | -40.107 | 10.8228 | 0.0002648 | 0.0268 | -39.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.7391 | -39.522 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.257 | -33.566 |
| 14 | 17.2196 | 6.34E-13 | 0.0799 | -40.081 | 10.8581 | 0.0002654 | 0.02666 | -39.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.1779 | -39.56 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2529 | -33.566 |
| 15 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 0.02275 | 0.9186 | -42.101 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2504 | -33.566 |
| 16 | 16.8779 | 4.11E-12 | 0.08438 | -40.342 | 10.923 | 0.0002211 | 0.0266 | -39.61 | 6.02 | 0.02275 | 0.9186 | -42.101 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2504 | -33.566 |

Tabla 3.38 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 16 Coax Gateway a una distancia de 10 Km.

3.4.4 Escenario red NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro a 20Km

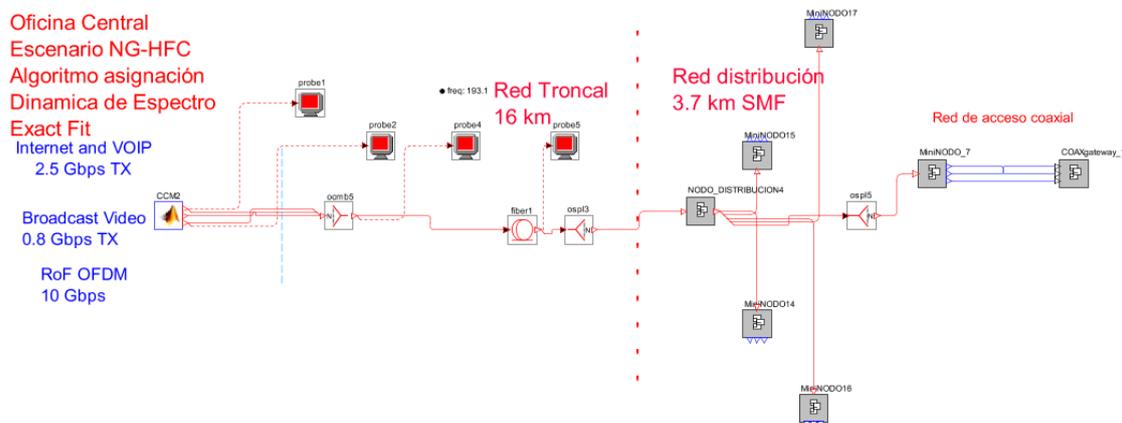


Figura 3.49, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 1 usuario.



La figura 3.49 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 1 Coax Gateway y una distancia de 20 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

Las tablas 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43 reflejan los datos obtenidos de los parámetros: Factor Q, BER, Potencia óptica de la señal en recepción y Jitter para cada uno de los servicios en los escenarios de una red NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro a una distancia de 20Km para un número de 1, 2, 4, 8 y 16 Coax Gateway respectivamente.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 1ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.5947 | 7.53E-14 | 0.0911 | -40.578 | 17.57 | 7.57E-14 | 0.0911 | -40.578 | 6.02 | 2.28E-02 | 1.2166 | -34.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2742 | -24.566 |

Tabla 3.39 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 1 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

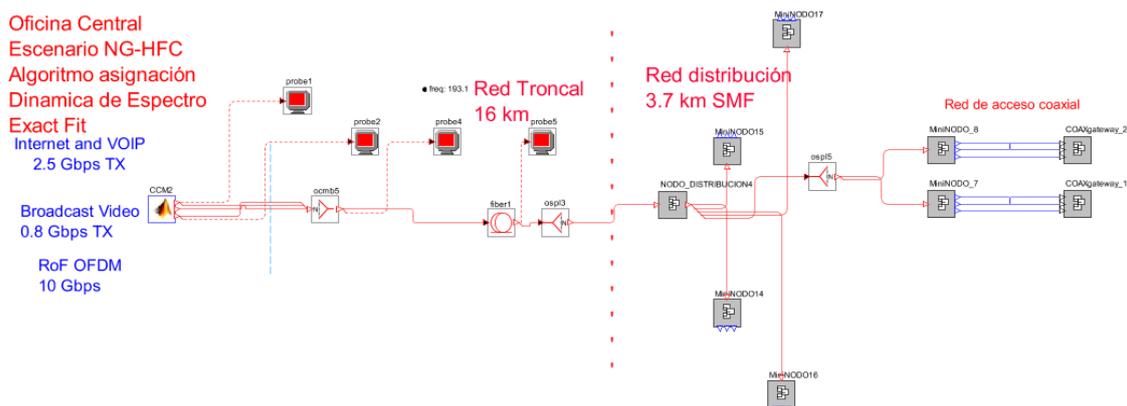


Figura 3.50, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 2 usuarios.

La figura 3.50 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 2 Coax Gateway y una distancia de 20 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 2ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.4113 | 2.09E-13 | 0.924 | -40.578 | 11.095 | 1.80E-04 | 0.02772 | -40.612 | 6.02 | 2.28E-03 | 1.31 | -34.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2976 | -24.566 |
| 2 | 17.41 | 5.41E-14 | 0.0927 | -40.578 | 11.1331 | 0.0001563 | 0.02801 | -40.612 | 6.02 | 0.002275 | 1.3401 | -34.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2467 | -24.566 |

Tabla 3.40 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 2 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

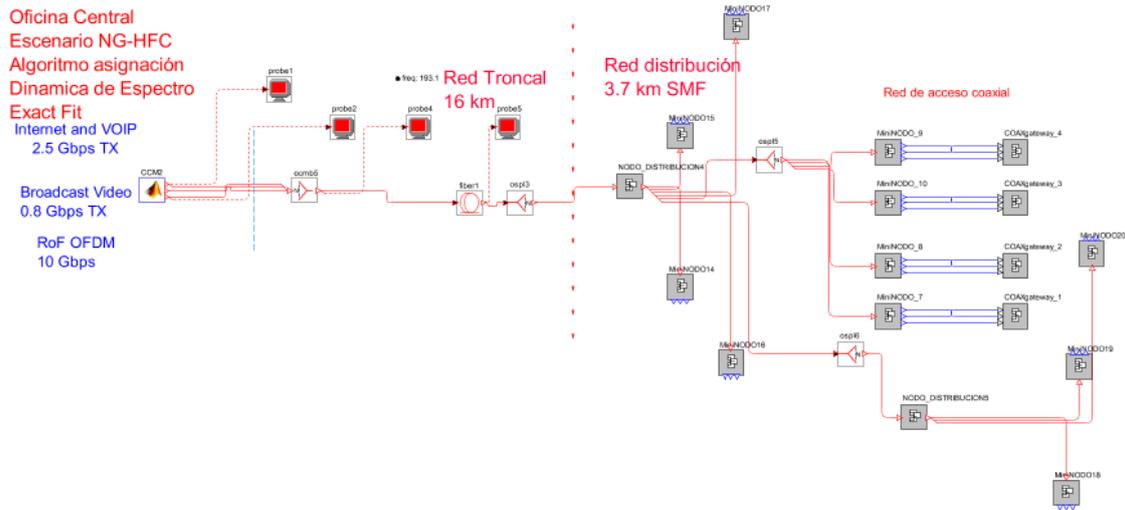


Figura 3.51, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 4 usuarios.

La figura 3.51 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 4 Coax Gateway y una distancia de 20 Km que emplea un método de asignación dinámica de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 4ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0.8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 15.9312 | 3.15E-09 | 0.08516 | -40.86 | 10.81 | 2.66E-04 | 0.02686 | -40.726 | 6.01 | 2.28E-03 | 1.1271 | -34.707 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1386 | -34.355 |
| 2 | 15.1614 | 4.36E-09 | 0.0847 | -40.043 | 10.7114 | 0.0002946 | 0.02688 | -40.726 | 6.01 | 2.28E-03 | 0.08473 | -34.704 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.267 | -34.355 |
| 3 | 16.5592 | 1.25E-11 | 0.0826 | -40.37 | 10.7095 | 0.0003657 | 0.02635 | -40.726 | 6.01 | 2.28E-03 | 1.1271 | -34.707 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1287 | -34.355 |
| 4 | 17.2321 | 1.77E-13 | 0.0223 | -40.489 | 10.7325 | 0.0002894 | 0.02678 | -40.726 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1431 | -34.355 |

Tabla 3.41 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 4 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

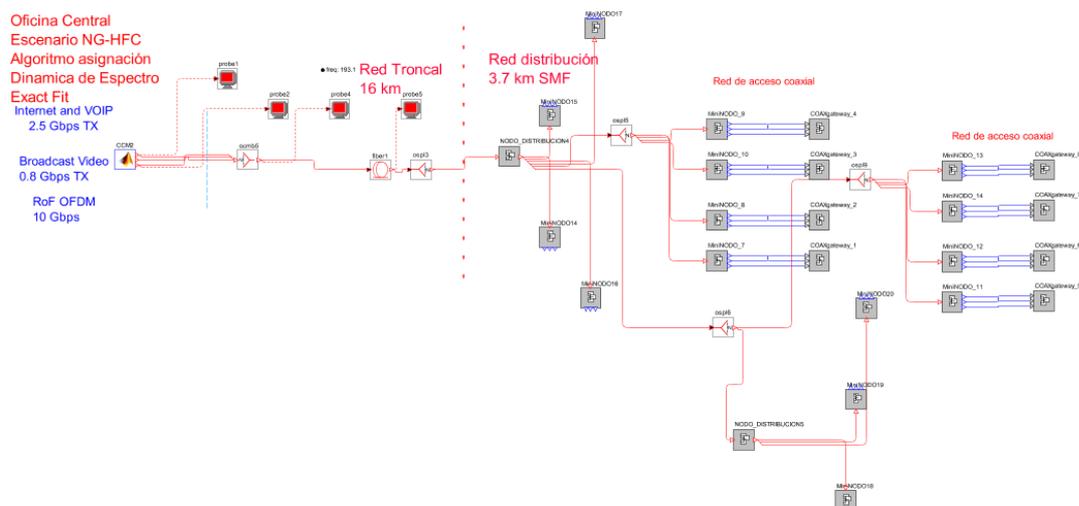


Figura 3.52, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 8 usuarios.



La figura 3.52 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 8 Coax Gateway y una distancia de 20 Km que emplea un método de asignación dinámico de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 8ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 17.2996 | 3.23E-13 | 0.0879 | -40.578 | 11.108 | 1.69E-04 | 0.02781 | -40.612 | 6.02 | 2.28E-03 | 1.29 | -34.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2539 | -24.566 |
| 2 | 18.85 | 1.03E-18 | 0.0857 | -40.578 | 11.12 | 0.0001591 | 0.02744 | -40.612 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 3 | 17.75 | 1.12E-14 | 0.08827 | -40.578 | 11.1244 | 0.0001577 | 0.0276 | -40.612 | 6.02 | 2.28E-03 | 1.1787 | -34.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1488 | -24.566 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 5 | 16.86 | 1.17E-11 | 0.0873 | -43.173 | 11.07 | 0.0001914 | 0.0271 | -43.612 | 6.02 | 2.28E-03 | 1.243 | -37.174 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2513 | -27.566 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 8 | 18.2664 | 4.50E-16 | 0.08854 | -43.173 | 11.0813 | 0.0001936 | 0.0273 | -43.612 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1519 | -27.566 |

Tabla 3.42 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 8 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.

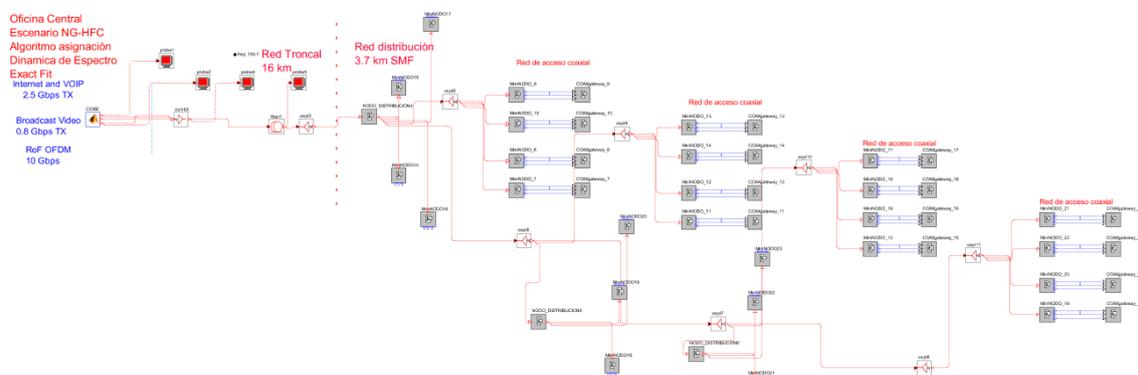


Figura 3.53, Esquema Red NG-HFC con asignación dinámica de espectro a 20Km para 16 usuarios.

La figura 3.50 muestra el esquema físico de la red en la herramienta planteado para el sistema NG-HFC para 16 Coax Gateway y una distancia de 20 Km que emplea un método de asignación dinámico de espectro, el cual se tomó como referencia las redes propuestas en [15]. Los parámetros de configuración se han descrito en la sección 2.6.

| RESULTADOS PARA ESCENARIOS A UNA DISTANCIA DE 20Km y 16ONT | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------|------------|--|------------------------------------|-----------|------------|--|------------------------------|-----------|------------|--|---------------------------|----------|------------|--|
| RED NG-HFC Y ALGORITMO DE ASIGNACION DINAMICA DE ESPECTRO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COAX GATEWAY Número | Datos + VoIP transmisión a 2.5 Gb/s | | | | Datos + VoIP transmisión a 10 Gb/s | | | | Video transmisión a 0,8 Gb/s | | | | RoF transmisión a 10 Gb/s | | | |
| | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) | Factor Q(dB) | BER | Jitter(ns) | Potencia óptica de la señal en RX(dBm) |
| 1 | 16.0588 | 1.66E-10 | 0.0827 | -41.095 | 11.1266 | 1.57E-04 | 0.02773 | -40.61 | 6.02 | 2.58E-02 | 1.26 | -40.251 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2521 | -24.568 |
| 2 | 17.6137 | 7.22E-14 | 0.0857 | -41.095 | 11.11 | 0.0001761 | 0.0277 | -40.61 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 3 | 16.4891 | 1.38E-11 | 0.0845 | -41.095 | 11.1138 | 0.0001614 | 0.0277 | -40.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.1895 | -40.586 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.254 | -24.568 |
| 4 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 5 | 15.8934 | 2.54E-10 | 0.083189 | -44.258 | 11.0299 | 0.0001956 | 0.0275 | -40.61 | 6.0227 | 0.0227501 | 1.21794 | -44.258 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2432 | -27.568 |
| 6 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 7 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 8 | 15.7687 | 4.37E-10 | 0.08252 | -44.095 | 11.0825 | 0.0001915 | 0.0275 | -40.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.2397 | -44.258 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2547 | -27.568 |
| 9 | 14.4906 | 6.43E-08 | 0.07844 | -47.095 | 10.9764 | 0.0002248 | 0.027615 | -40.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.2075 | -47.259 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2639 | -27.568 |
| 10 | 15.3707 | 2.34E-09 | 0.08463 | -47.095 | 10.9673 | 0.0002265 | 0.02729 | -46.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.2692 | -47.259 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 11 | 15.4046 | 1.96E-09 | 0.0855 | -47.095 | 10.9277 | 0.0002277 | 0.02272 | -46.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.0899 | -47.259 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.1505 | -30.567 |
| 12 | 15.5484 | 1.49E-09 | 0.0797 | -47.095 | 10.9815 | 0.00021 | 0.02704 | -46.61 | 6.02 | 0.02275 | 0.9201 | -47.259 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 13 | 13.92 | 3.09E-07 | 0.08199 | -50.095 | 10.8218 | 0.0002798 | 0.0268 | -49.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.15199 | -50.259 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.257 | -33.567 |
| 14 | 14.08 | 2.20E-07 | 0.07909 | -50.095 | 10.8581 | 0.000264 | 0.02581 | 49.61 | 6.02 | 0.02275 | 1.03484 | -50.259 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 15 | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | | NO SOLICITUD SERVICIO | | | |
| 16 | 14.26 | 1.11E-07 | 0.08018 | -50.095 | 10.423 | 0.0002211 | 0.0268 | -49.61 | 6.02 | 0.02275 | 0.921 | -50.259 | 6.02 | 2.28E-02 | 0.2604 | -33.567 |

Tabla 3.43 Resultados parámetros OPM para la Red NG-HFC Asignación dinámica de espectro con 16 Coax Gateway a una distancia de 20 Km.



3.5 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED FTTH CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO FRENTE A LA RED NG-HFC CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 10KM

3.5.1 Análisis para el servicio de Datos/VoIP red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km usando método de asignación dinámica de espectro

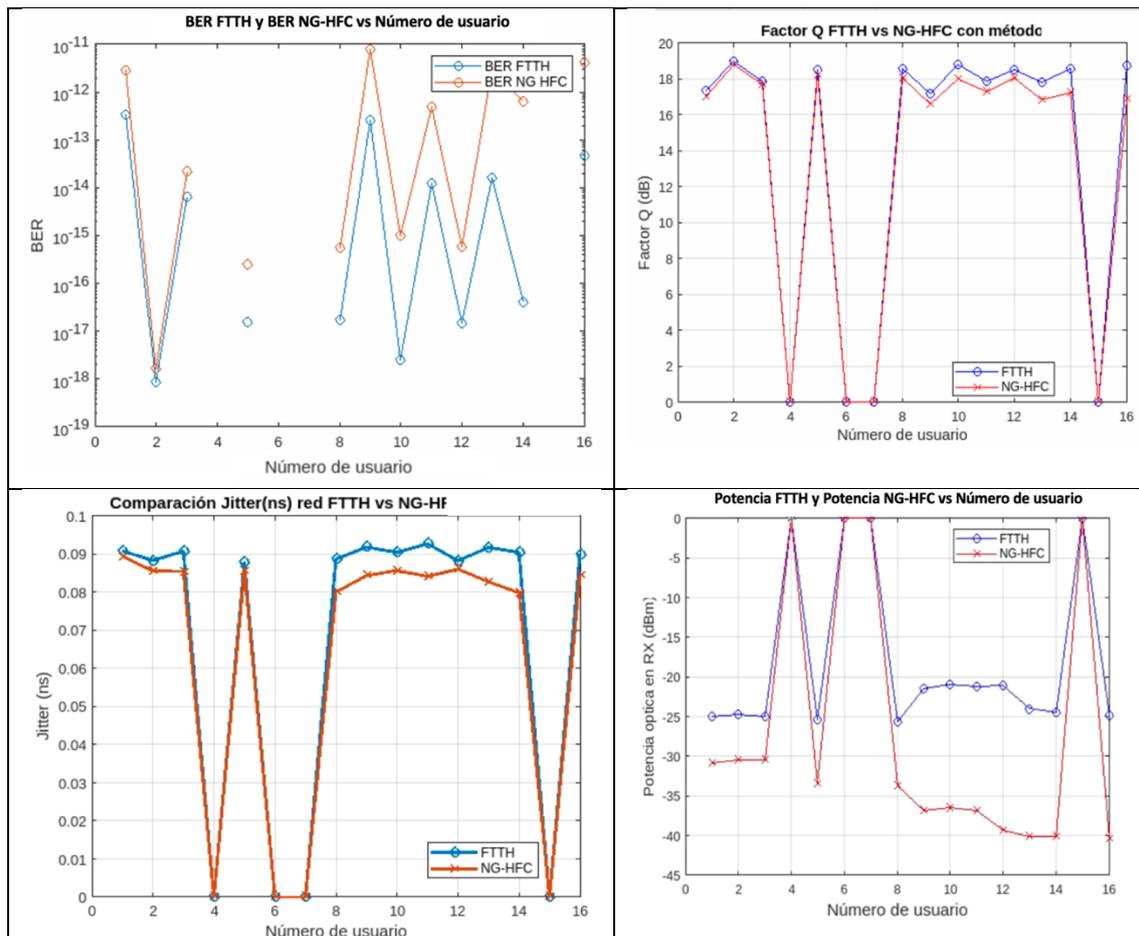


Figura 3.53 gráficas desempeño para Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro.

En la figura 3.53 se puede apreciar las gráficas de desempeño para las arquitecturas FTTH y NG-HFC que están haciendo uso del método de asignación dinámica de espectro, en donde se puede observar que la BER es relativamente baja en ambas figuras, lo que indica que existe una buena calidad de la señal y las redes están prestando el servicio para los usuarios que requirieron de estos, para los puntos donde la gráfica de la BER presenta cortes significa que el usuario, no requirió del servicio en ese determinado instante de tiempo. En el caso de la red FTTH se puede analizar que está presenta una menor BER respecto a la red NG-HFC. Esta afirmación se puede respaldar en la gráfica de factor Q, donde se observa un mayor valor para la red FTTH., lo cual sugiere una



mejor calidad de la señal y una menor tasa de errores ofreciendo una mayor fiabilidad en la transmisión de datos.

En cuanto al Jitter, los valores son similares en ambas tablas y se encuentran dentro de un rango aceptable para la transmisión de datos, indicando que las señale de datos se encuentra transmitiendo con precisión.

Finalmente, para el caso de la potencia en recepción podemos observar que el valor de este parámetro es más bajo en el sistema con arquitectura NG-HFC lo cual significa que la señal es más débil y ha presentado una mayor degradación de la señal lo cual puede estar ligado directamente a la naturaleza del medio de transmisión.

3.5.2 Análisis para el servicio de *broadcast* video red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km usando método de asignación dinámica de espectro

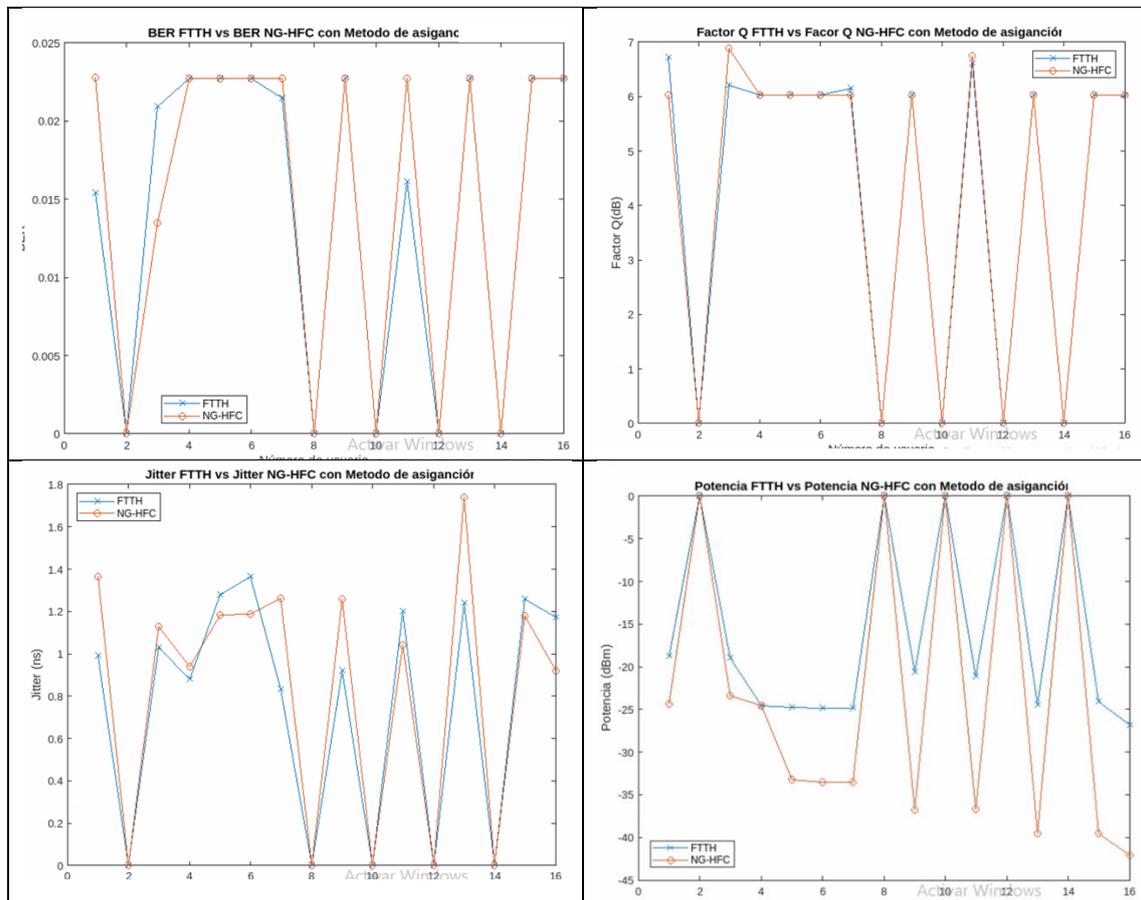


Figura 3.54 gráficas desempeño servicio de vídeo a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro.

De acuerdo con las gráficas de la figura 3.54 donde se describe el comportamiento para el servicio de video en las redes FTTH y NG-HFC que emplean método de asignación dinámica de espectro, se puede observar que la BER se encuentra alrededor de 0.02275 y el factor Q es de 6.02dB, lo que sugiere que ambas redes presentan una buena calidad de la señal. Sin embargo,

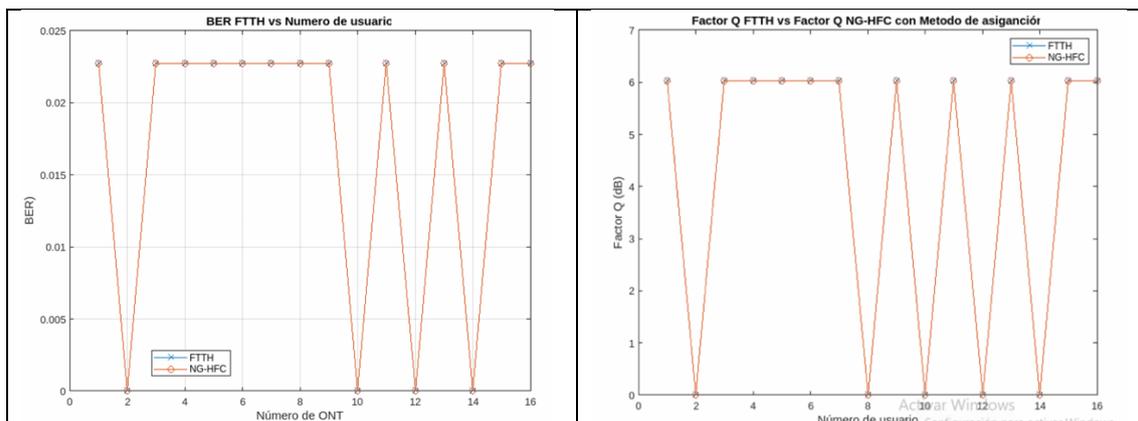


es importante destacar que la herramienta Optsim no permite detectar niveles que se encuentran por debajo de estos valores, lo que genera un tipo de constante para estos valores. Esto implica que no se podría analizar claramente estos sistemas desde parámetros como la BER y el factor Q si estos valores están por debajo del rango de detección de la herramienta.

Por otro lado, al comparar las redes desde parámetros como el Jitter y la potencia en recepción, se puede observar que la red FTTH es ligeramente superior respecto a estos parámetros en comparación con la red NG-HFC, en este sentido, la red FTTH presenta valores más bajos de Jitter y una mayor potencia en recepción en comparación con la red NG-HFC. Esto sugiere que la señal se está transmitiendo con mayor precisión y que la red FTTH puede soportar una mayor cantidad de usuarios y servicios.

En conclusión, aunque las gráficas para el servicio de vídeo en las redes FTTH y NG-HFC presentan una BER y un factor Q similares, es importante considerar otros parámetros como el Jitter y la potencia en recepción para evaluar la calidad de la señal y la capacidad de las redes para soportar diferentes tipos de servicios y aplicaciones. también, es importante tener en cuenta que los resultados pueden variar según el tipo de fibra y cable coaxial que sean utilizados, la disponibilidad de recursos y el tipo de algoritmo implementado que adaptarse a diferentes condiciones de la red.

3.5.3 Análisis para el servicio de RoF red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 10km usando método de asignación dinámica de espectro



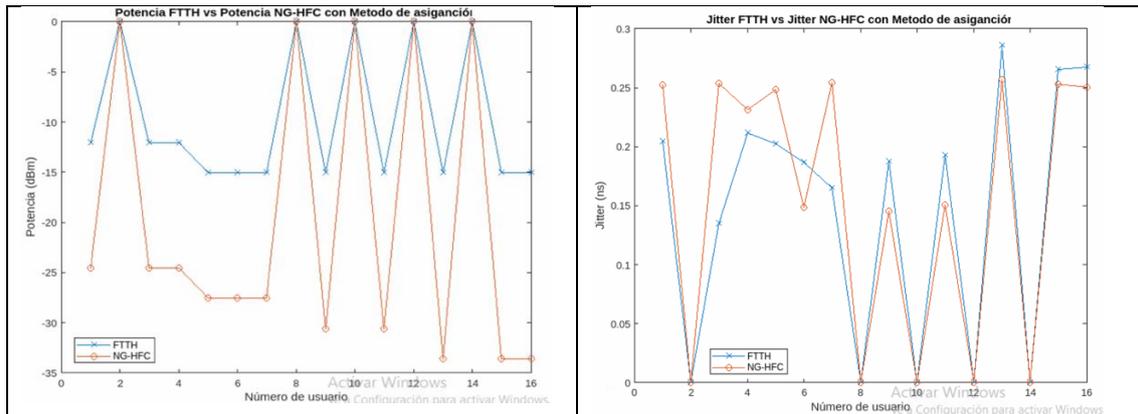


Figura 3.55 gráficas desempeño servicio de RoF a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro.

La figura 3.55 muestra los resultados del desempeño de las arquitecturas de red para el servicio de RoF. En dicha figura se puede apreciar que, en los momentos en que se generó una solicitud de servicio por parte del usuario, la BER y el Factor Q presentaron valores de 0.02275 y 6dB respectivamente durante cada instante de tiempo con variaciones mínimas entre estos valores. La razón que estos valores se mantuvieron prácticamente constantes debido a que como se mencionó anteriormente la herramienta de simulación Optsim no permite detectar niveles que se encuentran por debajo de estos números.

Es importante mencionar que, para evaluar el desempeño de las redes desde otros parámetros, se analizaron las gráficas de jitter y la potencia en recepción. En el caso del jitter, se observa que la red FTTH presenta valores más pequeños, lo que indica que las señales de datos se están transmitiendo de manera más precisa y uniforme que en la red HFC. Por otra parte, en la gráfica de potencia en recepción, se puede apreciar que la red FTTH presenta valores más altos que la red HFC, lo cual sugiere que la señal se está recibiendo con mayor intensidad en la red FTTH.

En concreto, se puede decir que, aunque la BER y el Factor Q presentaron resultados similares en ambas arquitecturas de red, la red FTTH presentó un mejor desempeño desde el punto de vista del jitter y la potencia en recepción. Esto indica que la red FTTH tiene un mayor desempeño en la transmisión de datos, y que la señal se está recibiendo con mayor intensidad en los usuarios que hacen uso de esta red.

3.6 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LA RED FTTH CON METODO DE ASIGNACIÓN DINAMICA DE ESPECTRO FRENTE A LA RED NG-HFC CON MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 20KM



3.6.1 Análisis para el servicio de Datos/VoIP red FTTH frente a la red NG-HFC a una distancia de 20km usando método de asignación dinámica de espectro

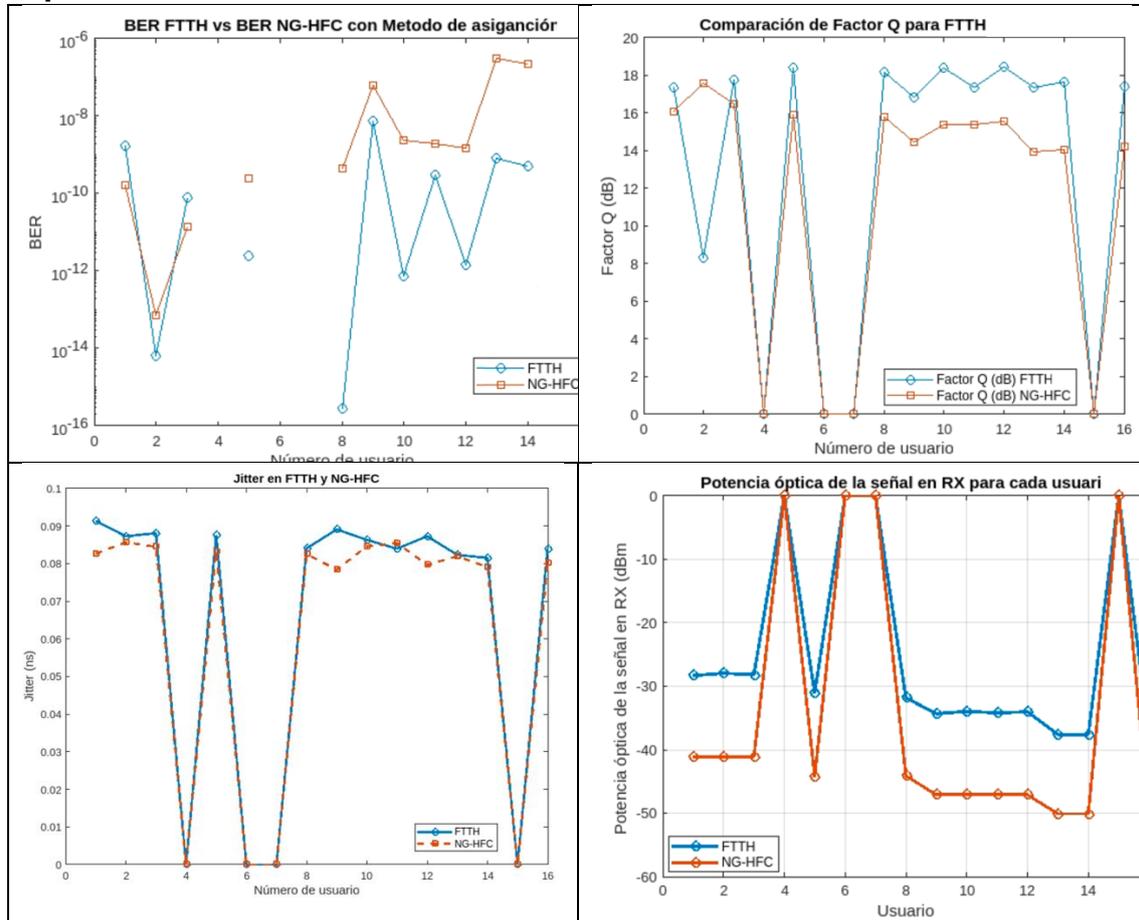


Figura 3.56 gráficas desempeño servicio de Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 20 km, redes FTTH y NG-HFC con método de asignación dinámica de espectro.

De acuerdo a los datos en la gráfica 3.56. Se puede observar que los valores de factor Q para el sistema NG-HFC oscilan entre 13.92 dB y 17.6137 dB, mientras que los valores de factor Q para el sistema FTTH oscilan entre 17.3757 dB y 18.9484 dB, lo cual indica que la red FTTH presenta un mejor desempeño respecto a la NG-HFC aun así cuando se está haciendo uso de un método de asignación dinámica de espectro.

Respecto a la BER se puede observar que el sistema NG-HFC tiene una tasa de BER más baja en general, con valores que oscilan entre $1.96E-09$ y $6.43E-08$, mientras que el sistema FTTH tiene valores de BER que oscilan entre $1.4078E-18$ y $7.5950E-13$ sabiendo que un valor de BER más bajo indica una mejor calidad de transmisión de datos podemos deducir que la red FTTH presenta mejor desempeño respecto a la red NG-HFC.

Sobre el Jitter podemos deducir que el sistema NG-HFC tiene valores de Jitter que oscilan entre 0.07844 ns y 0.0857 ns, mientras que el sistema FTTH tiene



valores de Jitter que oscilan entre 0.08154 ns y 0.0914 ns. En promedio, el sistema NG-HFC tiene un valor de Jitter más bajo que el sistema FTTH.

La potencia óptica de la señal recibida en dBm es otra medida importante de la calidad de la transmisión óptica. En la tabla, se puede observar que la potencia óptica recibida para el sistema NG-HFC oscila entre -50.095 dBm y -41.095 dBm, mientras que la potencia óptica recibida para el sistema FTTH oscila entre -34.308 dBm y -27.932 dBm. En promedio, la potencia óptica recibida para el sistema NG-HFC es más baja que la potencia óptica recibida para el sistema FTTH, por lo que se evidencia mejor comportamiento del sistema FTTH frente a la atenuación.

3.7 ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SERVICIO DE DATOS/VoIP EN LAS RED FTTH Y NG-HFC CON Y SIN MÉTODO DE ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO A UNA DISTANCIA DE 10KM

3.7.1 Análisis general para los sistemas FTTH y NG-HFC con y sin asignación dinámica de espectro a una distancia de 10Km.

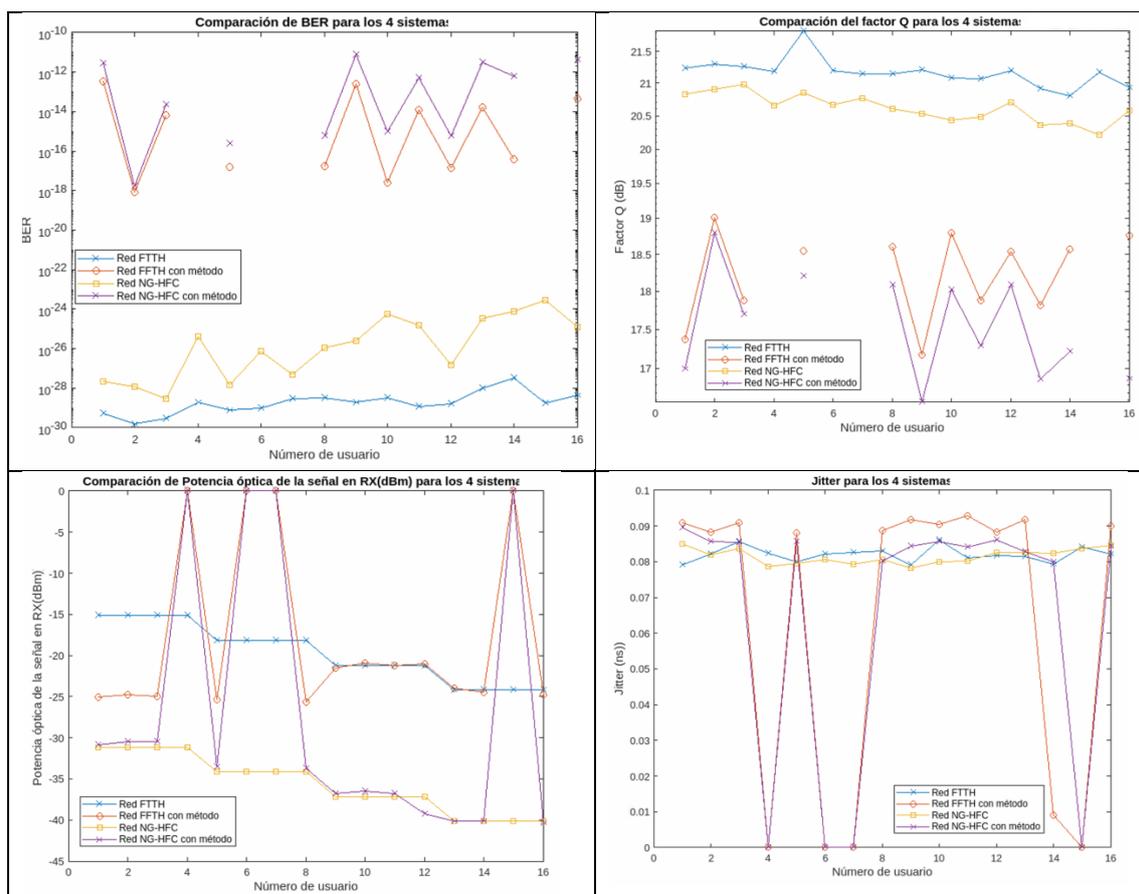


Figura 3.57 gráficas desempeño servicio de Datos/VoIP a 2.5 Gbps, 10 km, redes FTTH y NG-HFC con y sin método de asignación dinámica de espectro.



Para este análisis se comparó por medio de gráficas de BER, factor Q, Potencia óptica de la señal en recepción y el jitter para cuatro sistemas tipo FTTH y NG-HFC con y sin asignación dinámica de espectro a una distancia de 10 km, donde en primera instancia se puede observar que las redes que no utilizan un método de asignación dinámica de espectro presentan una mejor calidad en términos de BER y factor Q en comparación con las que sí lo utilizan. Sin embargo, es importante considerar que el uso de un método de asignación dinámica de espectro puede tener beneficios en términos de eficiencia espectral y flexibilidad en el uso del espectro.

En relación al factor Q este es inversamente proporcional a la BER, razón por la cual se puede observar que los valores de factor Q más altos estarán dados por los sistemas que tienen una BER menor y que NO utilizan un método de asignación dinámica de espectro al interior de su arquitectura. En términos de porcentajes se puede demostrar que, para el factor Q el escenario FTTH es 0.94% mejor con respecto al escenario NG-HFC y mejor 16,6% frente al escenario FTTH con asignación dinámica de espectro, así mismo este sistema es 3,6% mejor que el sistema NG-HFC con método asignación dinámica. Por último, el sistema NG-HFC es 19.7% mejor en desempeño que este mismo con asignación dinámica.

Por otro lado, se puede observar que la red FTTH presenta un mejor desempeño en términos de jitter y potencia óptica en recepción en comparación con la red HFC. Esto indica que la red FTTH tiene una mejor calidad en términos de la estabilidad y precisión de la señal transmitida, lo que puede ser beneficioso para aplicaciones que requieren una alta calidad de transmisión, como el vídeo en tiempo real o la transmisión de datos críticos.

Con respecto a la potencia en recepción, el escenario FTTH es 62.04% mejor con respecto al escenario NG-HFC y es mejor 19,75% frente al escenario FTTH con asignación dinámica de espectro, a su vez este escenario es 33.655% mejor que el sistema NG-HFC con método asignación dinámica. Por último, el sistema NG-HFC es 13.63% mejor en desempeño que este mismo con asignación dinámica.

En resumen, este estudio demuestra la importancia de evaluar diferentes parámetros de calidad de transmisión en redes de comunicaciones y cómo la implementación de ciertas técnicas, como la asignación dinámica de espectro, puede tener un impacto en la calidad de la transmisión. También se destaca la importancia de seleccionar la arquitectura adecuada para la red de comunicaciones según los requisitos de calidad de transmisión de las aplicaciones específicas.



CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo de grado se alcanzaron los objetivos propuestos permitiendo ampliar múltiples habilidades sobre el desarrollo de escenarios de redes de acceso como lo son FTTH y NG-HFC así mismo, permitió comprender las métricas y parámetros para el diseño de las redes de nueva generación HFC y el monitoreo del desempeño óptico a nivel físico para las redes propuestas. Se recrearon los escenarios de las redes completas con el objetivo de entregar servicios *Quadplay*, se observó el comportamiento de los sistemas al ser simulados con un algoritmo de asignación dinámica propuesto. A través de la investigación sobre las redes de acceso, se definieron criterios para los subsistemas de última milla, por lo que se evaluaron la fibra óptica y el cable coaxial, además de que para este último se determinó la eficiencia con respecto a las características físicas del cable coaxial y la atenuación que presenta en la línea de transmisión

A continuación, se presentan las conclusiones generales obtenidas del trabajo realizado, después de desarrollar el objetivo principal de este trabajo de grado, el análisis a través del monitoreo óptico a nivel físico de una red FTTH y NG-HFC, con y sin asignación dinámica de espectro. Además, se incluyen recomendaciones y trabajos futuros.

4.1 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y LA SIMULACIÓN

- El método de asignación dinámica de espectro ***Exact Fit*** mejoró la eficiencia en la administración de los recursos de la red en los escenarios FTTH y NG-HFC, en términos de la disponibilidad del servicio solicitado. Esto se debe a que el método permite una asignación más precisa del ancho de banda de la grilla de espectro, evitando asignar recursos a servicios que no los requieren.
- El desempeño físico de los sistemas simulados de las redes de acceso FTTH y NG-HFC que incluían el método de asignación dinámica de espectro ***Exact Fit*** fue menor respecto a los sistemas que no hicieron uso del método, debido a que los niveles de los parámetros ópticos tales como la BER, factor Q y Potencia de la señal en recepción fueron inferiores.
- Se observó que al simular los escenarios con una tasa de transmisión a 10 Gbps los datos de los parámetros OPM empeoraron en su desempeño respecto a la transmisión de 2.5 Gbps, esto debido a que a mayor tasa de transmisión el sistema se verá afectado negativamente por degradaciones ópticas como la dispersión cromática.



- La potencia óptica de la señal en recepción y el Jitter son parámetros de los que depende el monitoreo de la atenuación de los sistemas de transmisión de datos. Para este caso, la red FTTH presentó un mejor desempeño frente a la red NG-HFC en términos de Jitter y potencia óptica de la señal en recepción.
- La elección de una arquitectura de red ya sea FTTH o NG-HFC y la incorporación del método de asignación de espectro dependerá del equilibrio entre la eficiencia en la administración de recursos de la red y la calidad de la transmisión de datos con respecto al monitoreo óptico.

4.2. SOBRE EL TRABAJO

- Los proveedores de servicios que dentro de sus arquitecturas de red aún presenten redes de tipo NG-HFC todavía pueden ser explotadas en la actualidad, especialmente en áreas donde la implementación de una red FTTH puede ser costosa o inviable. A pesar de que la red FTTH tiene algunas ventajas en términos de desempeño, como menor BER y mayor potencia en recepción, la red NG-HFC todavía puede ofrecer una buena calidad en algunos servicios de telecomunicaciones. Además, la implementación de técnicas como la asignación dinámica de espectro y la actualización de su arquitectura a una de acceso distribuido pueden elevar aún más el desempeño de la red NG-HFC y permitirle competir con las redes FTTH en términos de calidad de servicio.
- En términos del gasto de capital (CAPEX, *Capital Expenditure*) la red FTTH requiere una inversión inicial más alta en comparación con la NG-HFC, ya que la infraestructura de fibra óptica es más costosa. Además, la red FTTH requiere más trabajos de instalación y un mayor tiempo de implementación en comparación con la NG-HFC. Sin embargo, en términos del Gasto Operativo (OPEX, *Operational Expenditures*) la red FTTH es más rentable, ya que el costo de mantenimiento y operación es menor en comparación con la NG-HFC. Esto se debe a que la fibra óptica es más resistente y menos propensa a fallas, lo que reduce el costo de mantenimiento y la necesidad de reparaciones. También se debe tener en cuenta la vida útil de la red. Ya que para el caso de una red FTTH es mucho más larga que la de una red con arquitectura NG-HFC, lo que significa que la inversión realizada en la red FTTH se amortiza en un período más largo de tiempo, sumando el hecho que la red FTTH tiene una mayor capacidad de ancho de banda, lo que la hace más adecuada para soportar la continua evolución en la demanda de servicios por parte de los usuarios; Por lo cual, aunque la red FTTH requiere una inversión inicial más alta en comparación con la NG-HFC, es más rentable en términos de OPEX a largo plazo. Por lo tanto, si se consideran los factores de rentabilidad, la red FTTH es la opción más adecuada para proporcionar servicios de comunicaciones de alta velocidad y calidad.



4.3 SOBRE LA HERRAMIENTA

- Optsim™ es una herramienta que permite generar una gran cantidad de resultados numéricos y gráficos, donde el modo muestra o “*sample mode*”, es dentro de este un *tool* donde se pueden configurar gran diversidad de escenarios ópticos y eléctricos, sin embargo, para la versión con la que se cuenta la licencia en los laboratorios, no permite hacer un análisis con sistemas de mal comportamiento o desempeño físico, por lo que no es posible calcular sistemas que sobre pasen una BER de 0.02275 y un factor Q de 6.02. Además, la versión Optsim™ no permite mejorar los subsistemas de los servicios como lo presentado en [21] debido a que esos bloques de nueva configuración no se encuentran dentro de las librerías.

4.4 RECOMENDACIONES

Se recomienda en general a las personas interesadas en el estudio de sistemas basados en arquitecturas tipo FTTH y NG-HFC con sistemas *Quadplay* lo siguiente:

- Implementar la tecnología FTTH en nuevas instalaciones de telecomunicaciones para aprovechar la alta velocidad de transmisión de datos, el bajo costo de mantenimiento y la capacidad de soportar múltiples servicios simultáneamente.
- Es importante considerar el factor costo cuando se selecciona una tecnología de red. Aunque la implementación de una red FTTH puede ser más costosa inicialmente, la reducción en costos de mantenimiento y la capacidad de soportar múltiples servicios pueden hacer que esta opción sea más rentable a largo plazo.
- Es recomendable hacer un análisis detallado de los costos CAPEX y OPEX antes de tomar decisiones de inversión en la implementación de nuevas redes de telecomunicaciones.
- También es importante tener en cuenta que las tecnologías de redes evolucionan constantemente, por lo que es importante mantenerse actualizado sobre las nuevas tendencias y tecnologías emergentes para tomar decisiones informadas en cuanto a la mejora y actualización de las redes existentes.
- Se recomienda al público interesado en el estudio de sistemas ópticos contar con conocimientos sólidos sobre el tema, teoría de la información y procesamiento de señales para poder interpretar y analizar los resultados obtenidos.



- Para el diseño y simulación de redes utilizando la herramienta Optsim™, se recomienda contar con un equipo de cómputo de alta capacidad de procesamiento, memoria de solo lectura y almacenamiento. Esto se debe a que los sistemas complejos pueden requerir largos tiempos de simulación, llegando a estar en el orden de horas, y los datos recogidos durante la simulación pueden ocupar un gran espacio en el disco. Por lo tanto, contar con un equipo adecuado permitirá una ejecución más eficiente y precisa de la simulación.
- Se sugiere que los usuarios adquieran una comprensión profunda del funcionamiento y las capacidades de OptSim, para lo cual pueden aprovechar los recursos disponibles en línea, como tutoriales y ejemplos prácticos que se encuentran en la documentación de la herramienta y en otros sitios web especializados con el fin de obtener resultados precisos y confiables en el desarrollo de los proyectos.
- Se recomienda realizar una selección cuidadosa de los parámetros y configuraciones necesarios para la simulación, adaptándolos a las necesidades específicas de cada proyecto en particular. Esto garantizará que los resultados obtenidos sean precisos y relevantes para el análisis y evaluación del rendimiento de la red en cuestión.
- Es altamente recomendable que los usuarios exploren las diversas herramientas de simulación que son compatibles e integrables con OptSim. De esta manera, podrán obtener soluciones más detalladas y precisas para los casos de estudio que deseen analizar, lo que se traducirá en resultados más completos y fiables.

4.5 TRABAJOS FUTUROS

- Implementar un nuevo método de asignación dinámica de espectro basada en algún tipo de distribución probabilística.
- Simular haciendo uso de mecanismos de compensación en la red de acceso y de distribución para la fibra óptica.
- Implementación de técnicas de gestión de tráfico en redes FTTH y NG-HFC para garantizar una distribución eficiente de los recursos y una buena calidad de servicio.
- Diseño e implementación de soluciones de seguridad para redes FTTH y NG HFC, incluyendo protección contra ataques cibernéticos, prevención de fugas de información y seguridad de la red en general.
- Estudio de las tendencias y evolución de las tecnologías de redes FTTH y NG HFC, incluyendo aspectos como la virtualización de funciones de red (NFV, *Network Function Virtualization*) y la automatización de procesos de redes definidas por software (SDN, *Software Defined Networking*).



- Diseño de una estrategia de despliegue de redes *FTTH* y *NG-HFC* en zonas urbanas y rurales, considerando factores como la densidad poblacional, el costo y la viabilidad técnica.
- Evaluación del impacto ambiental de las redes *FTTH* y *NG-HFC* en términos de emisiones de carbono y consumo de energía, y diseño de soluciones para reducir su huella de carbono.
- Estudio de las políticas y regulaciones relacionadas con las redes *FTTH* y *NG-HFC*, incluyendo aspectos como el acceso abierto a la infraestructura y la neutralidad de la red.
- Desarrollo de soluciones de monitoreo y gestión de la red en tiempo real, incluyendo herramientas de diagnóstico y resolución de problemas para mejorar la eficiencia operativa y la calidad de servicio.



REFERENCIAS

- [1] D. R. Acero Patiño, H. F. Choles Mejía, and L. C. Ruiz Moreno, “Estudios técnicos para aportar en la disminución de mantenimientos de redes HFC,” *Trab. Grado Institución Univ. Politécnico Gran Colombiano*, pp. 1–27, 2017.
- [2] M. A. Melo López, A. Toledo Tovar, G. A. Gómez Agredo, and I. F. Velasco Andrade, “Estudio de factibilidad técnico - económico para la implementación de una red FTTH/GPON en el contexto colombiano para servicios Triple Play,” *Perspectiv@s*, vol. 15, no. 16, pp. 50–63, 1995, [Online]. Available: <http://revistas.uigv.edu.pe/index.php/perspectiva/article/view/604>.
- [3] A. Kora and O. Ringar, “*Evolution to 200G Passive Optical Network*,” *Comput. Technol. Appl.*, vol. 3, no. 11, pp. 723–728, 2012.
- [4] Comisión de regulación de Comunicaciones, *Resolución 4625 de 2014.pdf*. 2014, p. 12.
- [5] V. Escobar Caiza, “Estudio para la provisión de internet sobre redes hfc del servicio de audio y video por suscripción para operadores locales en Ecuador – caso de estudio”. Maestría en redes de comunicación, Pontificia Universidad Católica, Quito, Ecuador, 2016.
- [6] Mheducation. Antenas 1. [Online]. Available: <https://n9.cl/9ld>
- [7] Planteamiento del Proyecto de Montaje e Instalación de la Red de Telecomunicaciones por Cable Coaxial, Manfred Jaramillo Bonilla, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, 2003.
- [8] R. Nera Vela. “*Líneas de transmisión*”. Primera edición, México. Mcgraw Hill Latinoamericana editores s.a. de c.v. 1999.
- [9] I. A. Vargas, “Sistemas de fibra óptica,” Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, p. 17
- [10] Sistema de Monitoreo e Integración de Datos de Usuario de una Red FTTH/GPON para la Empresa Telcofiber S.A.A, Óscar Alexander López Cobo, Universidad del Cauca 2021
- [11] López Pastor, Eduardo. (2013). Divisores Ópticos (Splitters) en FTTH.
- [12] F. D, Angulo Bellio, H. Polo Olivo. “Diseño de una red de acceso HFC (hibrido fibra coaxial) para la prestación de servicio triple play”. Especialización en Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de Bolívar. Catagena, Colombia. 2011.
- [13] M. G, Espinoza Villareal. “Análisis de la integración de redes hfc con tecnologías inalámbricas, bajo el estándar docsis” título de ingeniería electrónica y telecomunicaciones. Escuela politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2008
- [14] L. A, Moreno Valino. “Procedimiento para la migración en redes Híbridas Fibra Coaxial al estándar DOCSIS 3.1”. Tesis de maestría, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara, Cuba. 2016
- [15] J. Burton, “FTTH and Next-Generation HFC: Myth vs. Reality,” *Broadband Success Partners*, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.broadbandsuccess.com/wp-content/uploads/2019/08/FTTH-or-NG-HFC-Myth-vs-Reality-082019.pdf>
- [16] M. Lattanzi y A. Graf, “Redes FTTx: Conceptos y Aplicaciones” IEEE



- Argentina, 2016.
- [17] M. Josan, «Cómo funciona una conexión de fibra. GPON y FTTH,» 17 Marzo 2017. [En línea]. Disponible e: <https://naseros.com/2017/03/13/como-funciona-una-conexion-de-fibra-gpon-y-ftth/>.
- [18] S. D. Ossa Hernández, J. A. Vargas Gutiérrez, y G. Gómez, "Propuesta de un algoritmo para la asignación dinámica de espectro en redes ópticas elásticas (EON)", *Lámpsakos*, (23), pp. 15-24. (enero-junio, 2020).
- [19] N. Nowshin. A. K. M. Arifuzzman, and M. Tarique, "Demonstration and Performance Analysis of Rof Based OFDM-PON System for Next-Generation Faber Optic Comunication Int. J. Comput. Networks Commun., vol. 4, no. 1, pp. 193 209, 2012.
- [20] G. Keiser, FTTH Concepts and Applications. Canada, 2006
- [21] A. F. Escallón Portilla, y V. H. Guachetá, Ruíz Guachetá. "Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios QUAD PLAY al integrar un módulo ROF" Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. 2018.
- [22] A. López de Lerma, "Algoritmos de planificación para redes elásticas," Tesis de Pregado, Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [23] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDMBased Elastic Core Optical Networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2012, doi: 10.1109/SURV.2012.010912.00123.
- [24] P. M. Pereira, «Redes Ópticas Elásticas,» sao paulo: Universidad de Sao Paulo, Escuela de Ingeniería, 2013.
- [25] K. Deepak Sharma, «An Overview of Elastic Optical Networks and its Enabling
- [26] *MATLAB™ - MathWorks - MATLAB™ & Simulink*. (n.d.). Retrieved October 2, 2022, from https://www.mathworks.com/products/Matlab.html?s_tid=hp_ff_p_Matlab
- [27] OptSim for Optical Communication | Synopsys Photonic Solutions. (n.d.). Retrieved October 4, 2022, from <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim/single-mode-network.html>.
- [28] OMNeT++ - Simulation Manual. (n.d.). Retrieved October 2, 2022, from <https://doc.omnetpp.org/omnetpp5/manual/#sec:introduction:what-is-omnetpp>.
- [29] E. Marcela Rivera, A. Niyireth Girón, Medida De La Eficiencia Espectral De Una Arquitectura De Red Heterogénea De Tipo Ng-Pon Para Un Régimen De Propagación Cuasilineal, Universidad del Cauca, 2022.
- 30] "Optilux - an open-source optical system simulator." <https://optilux.sourceforge.io/> (accessed Oct. 07, 2022).
- [31] A. Asensio Garcia, "Elastic spectrum allocation in flexgrid optical networks," Tesis de Pregado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012
- [32] A. Cunha de Sousa, "Políticas de Alocação de Espectro em Roteamento baseado em Balanceamento de Cargas e Fragmentação para Redes Ópticas Elásticas," Tesis de Maestría, Universidad Federal de Pará, Pará,



- Brasil, 2015.
- [33] S. Shakya, "Management of Spectral Resources in Elastic Optical Networks," Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad Estatal de Georgia, Atlanta, Estados Unidos, 2015.
- [34] A. López de Lerma, "Algoritmos de planificación para redes elásticas," Tesis de Pregado, Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [35] A. Sevilla Majin and E. Zúñiga Quisoboní, "Análisis comparativo del desempeño de algoritmos RSA y RWA sobre una red óptica basada en la topología NSFNET", Repositorio.unicauca.edu.co, 2017. Disponible en: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1573>.
- [36] Sayyad Khodashenas, P. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks. Tesis doctoral, UPC, Departament de Teoria del Senyal I Comunicacions, 2014.
- [37] B. C. Chatterjee, N. Sarma, y E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 17, núm. 3, pp. 1776–1800, 2015
- [38] R. I.-T. G.697, «"Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa",» Junio, 2004.
- [39] R. Gallager, "Channels, Modulation and Demodulation," En: "Course Materials for 6450 Principles of Digital Communications I," MIT OpenCourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [40] D. José Antonio, "Análisis de diagramas de ojo," Disponible en: <https://docplayer.es/2638743-Analisis-de-diagramas-de-ojo.html>, Retrived November 1, 2022.
- [41] M. Ana María, P. Paola Juliana" Análisis Del Desempeño A Nivel De Simulación, De Amplificadores Ópticos Para Un Entorno De Red DWDM XGS-PON", Universidad del Cauca, 2019.
- [42] D. Van Den Borne, "Robust optical transmission systems: modulation and equalization," Universidad Tecnológica de Eindhoven, Tesis doctoral, 2008.
- [43] A. Escallón, J. Barrios, and A. Toledo, "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 12, pp. 12–19, 2008.
- [44] S. L. Criollo Obando and F. R. Lasso Rodríguez, "Impacto de la fibra óptica sobre el desempeño de una red WDM a 10Gb/s," Universidad del Cauca, Tesis de pregrado, 2014.
- [45] Telnet Redes Inteligentes, "Fibra Óptica Para NGN - Dispersión Cromática Y PMD," Zaragoza, España, 2009.
- [46] A. Abdelkerim, "Nonlinear effects compensation for long-haul superchannel transmission system," Eindhoven University of Technology, Tesis doctoral, 2017.
- [47] S. P. Singh and N. Singh, "Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 73, pp. 249–275, 2007.
- [48] J. G. López Perafán, A. Toledo Tovar, H. Ordóñez, and J. P. Pablo Agredo, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una



- red WDM," *Rev. Fac. Ing. UPTC*, vol. 20, no. 31, pp. 23–25, 2011.
- [49] J. F. Sacanamboy Imbachi, *Análisis Del Desempeño A Nivel Físico De Una Red De Acceso FTTH-EON En La Prestación De Servicios Triplay Mediante La Implementación De Un Algoritmo De Asignación Dinámica De Espectro*, Universidad del Cauca, 2022.
- [50] FiberLabs Inc, "Wavelength-Division Multiplexing (WDM)" Available online: <https://www.fiberlabs.com/glossary/wavelength-division-multiplexing/> Accessed: August 2 2022
- [51] A. C. Bustamante Tipán y A. R. Macas Macas, "Análisis de la transmisión de banda ancha en redes HFC: limitaciones tecnológicas, revisión de estándares," Informe de materia de graduación, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [52] M. I., "La Evolución de la Especificación DOCSIS," 2006.
- [53] J. C. Monteza Salazar y J. B. Sandoval Ramírez, "Diseño de Red de Banda Ancha Inalámbrica para mostrar la mejora de la cobertura con calidad de servicio al acceso de las redes y servicios de telecomunicaciones en los centros poblados del Distrito de Chota-Cajamarca," Tesis de ingeniería electrónica, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú, 2017.
- [54] Harris, S, «FTTX Technologies». Society of Cable Telecommunications Engineers, 2016.
- [55] M. M. Farid, "Design and Analysis of Different Types of Coaxial Cables Using CST Microwave Studio," *American Journal of Electromagnetics and Applications*, vol. 3, no. 5, 2015, pp. 72-78.
- [56] J. Martínez García, "Ingeniería de Comunicaciones", 2a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2011, cap. 4, pp. 131-140.
- [57] D. Illán González Horna, "Evaluación de algoritmos de asignación de recursos que ofrezcan protección en redes ópticas elásticas," Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, julio 2017.
- [58] Inside Tower Cable's Capital Conundrum – NG-HFC or FTTH?," May 29, 2020. [Online]. Available: <https://insidetowers.com/cell-tower-news-cables-capital-conundrum-ng-hfc-or-ftth/>
- [59] J. Burton, "FTTH and Next-Generation HFC: Myth vs. Reality," *Broadband Success Partners*, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://www.broadbandsuccess.com/wp-content/uploads/2019/08/FTTH-or-NG-HFC-Myth-vs-Reality-082019.pdf>



ANEXOS

ANEXO A

código Matlab™ que simula una transmisión de una línea coaxial, coaxial RG - 11

```
1 % Datos del cable coaxial RG 11
2 - att = 0.25; % Atenuación en dB/metro a 1 GHz dado por fabricante
3 % Zc = 75; % Impedancia característica en ohmios
4 - OuterRadius = 7.25e-3; % Radio exterior [m]
5 - InnerRadius = 2.8e-3; % Radio interior [m]
6 - MuR = 1; % Permeabilidad relativa del aislante
7 - EpsilonR = 2.3; % Constante dieléctrica relativa del aislante
8 - SigmaCond = 5.8e7; % Conductividad eléctrica del conductor [S/m]
9 - Z0 = 75; % Impedancia característica en ohmios
10
11 % Datos de la línea de transmisión
12 - freq = 1e9; % Frecuencia de operación en Hz
13 - linelength = 20; % Longitud del cable [m]
14
15 % Cálculo de la atenuación por unidad de longitud
16 %attenuation = (sqrt(EpsilonR) / (OuterRadius * log(OuterRadius/InnerRadius))) *
17 % (sqrt(pi*f*MuR/SigmaCond) + 1/(8*pi*f*MuR*SigmaCond));
18 % Cálculo de la atenuación total
19 - total_attenuation = att * linelength;
20 - Zc = (60 / sqrt(EpsilonR)) * log(OuterRadius / InnerRadius);
21 % Impedancia de carga
22 - Zload = 75; % Impedancia de carga en ohmios
23 % Impedancia del cable
24 - Zcable = Zc;
25 % Coeficientes de reflexión
26 - Gamma = (Zload - Zcable) / (Zload + Zcable);
27
28 % Potencia a la entrada
29 - Pin = 0.127E-08; % Potencia de entrada en Watts
30
31 % Potencia a la salida
32 - Pout = Pin * exp(-total_attenuation) * abs(1 - Gamma)^2;
33 - Pout_dB = 10*log(Pout)
34 % Mostrar resultado
35 - fprintf('La potencia de salida es %f pW\n', Pout * 1e12);
36 - fprintf('La impedancia carga del cable coaxial es: %.3f ohms\n', Zc);
37
```

Figura, Código Matlab™ que simula la transmisión línea cable coaxial RG 11.



ANEXO B

código Matlab™ que simula una transmisión de una línea coaxial, coaxial RG - 59

```
1 % Datos del cable coaxial RG 59
2 - att = 0.38; % Atenuación en dB/metro a 1 GHz dado por fabricante
3 - OuterRadius = 3.7e-3; % Radio exterior [m]
4 - InnerRadius = 0.6e-3; % Radio interior [m]
5 - MuR = 1; % Permeabilidad relativa del aislante
6 - EpsilonR = 2.3; % Constante dieléctrica relativa del aislante
7 - SigmaCond = 5.8e7; % Conductividad eléctrica del conductor [S/m]
8
9 % Datos de la línea de transmisión
10 - freq = 1e9; % Frecuencia de operación en Hz
11 - linelength = 20; % Longitud de la línea de transmisión en metros
12
13 % Cálculo de la atenuación por unidad de longitud
14 %attenuation = (sqrt(EpsilonR) / (OuterRadius * log(OuterRadius/InnerRadius))) * ...
15 % (sqrt(pi*f*MuR/SigmaCond) + 1/(8*pi*f*MuR*SigmaCond));
16
17 % Cálculo de la atenuación total
18 - total_attenuation = att * linelength;
19 - Zc = (60 / sqrt(EpsilonR)) * log(OuterRadius / InnerRadius);
20 % Impedancia de carga
21 - Zload = 75; % Impedancia de carga en ohmios
22 % Impedancia del cable
23 - Zcable = Zc;
24 % Coeficientes de reflexión
25 - Gamma = (Zload - Zcable) / (Zload + Zcable);
26 % Potencia a la entrada
27 - Pin = 0.127E-08; % Potencia de entrada en Watts
28
29 % Potencia a la salida
30 - Pout = Pin * exp(-total_attenuation) * abs(1 - Gamma)^2;
31 - Pout_dB = 10*log(Pout)
32 % Mostrar resultado
33 - fprintf('La potencia de salida es %f pW\n', Pout * 1e12);
34 - fprintf('La impedancia carga del cable coaxial es: %.3f ohms\n', Zc);
```

Figura, código Matlab™ que simula la transmisión línea cable coaxial RG 59.