ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE UNA RED DE ACCESO NG-PON2 (40-GIGABIT-CAPABLE PASSIVE OPTICAL NETWORKS) PARA BRINDAR SERVICIO TRIPLE PLAY A DETERMINADAS ZONAS URBANAS DE LA PARROQUIA DE SANGOLQUÍ

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

JONATHAN FABRICIO PAUCAR MOPOSITA

DIRECTORA: M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ

Quito, octubre 2021

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jonathan Fabricio Paucar Moposita, bajo mi supervisión.

M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ
DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Jonathan Fabricio Paucar Moposita, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

JONATHAN FABRICIO PAUCAR MOPOSITA

DEDICATORIA

Dedico este logro profesional a mis padres y toda mi familia, ya que han sido la motivación y el pilar fundamental para enfrentar las dificultades que conlleva este largo camino de la vida universitaria.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la oportunidad de formarme como una persona de bien y el gusto de compartir este logro profesional con toda mi familia y mis seres queridos.

De manera especial agradezco a mis padres por haberme enseñado a valorar lo que día a día la vida nos puede dar a través de dedicación y sacrificio, además, agradezco el amor y el esfuerzo que ellos demostraban en las buenas y en las malas por lograr formar a sus hijos como profesionales.

También, agradezco a la M.Sc. María Soledad Jiménez por compartir su experiencia, conocimientos y sobre todo la preocupación de llevar adelante el desarrollo de este trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
RESUMEN X
ABSTRACT XI
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.2 ALCANCE 2
1.3 MARCO TEÓRICO 4
1.3.1 FIBRA ÓPTICA 4
1.3.1.1 Definición 4
1.3.1.2 Propagación de la luz en una fibra óptica 5
1.3.1.2.1 Reflexión y refracción de la luz 5
1.3.1.2.2 Ángulo crítico 6
1.3.1.2.3 Reflexión total 6
1.3.1.2.4 Ángulo de aceptación 7
1.3.1.2.5 Apertura numérica (AN) 7
1.3.1.3 Clasificación de la fibra óptica 7
1.3.1.3.1 Fibra óptica monomodo 8
1.3.1.3.2 Fibra óptica multimodo 8
1.3.1.3.3 Fibras normalizadas según la ITU 9
1.3.1.4 Pérdidas en la fibra óptica 10
1.3.1.4.1 Pérdidas por absorción 10
1.3.1.4.2 Pérdidas por Scattering 11
1.3.1.4.3 Pérdidas por curvaturas 12
1.3.1.5 Dispersión en la fibra óptica 12
1.3.1.5.1 Dispersión modal 12
1.3.1.5.2 Dispersión cromática 13
1.3.1.5.3 Dispersión de modo de polarización 14

1.3.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA 15
1.3.2.1 Transmisor 15
1.3.2.1.1 Fuente de luz 15
1.3.2.2 Medio de transmisión 16
1.3.2.3 Receptor 17
1.3.2.3.1 Detector de luz 17
1.3.3 MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICA 18
1.3.3.1 Multiplexación óptica por división de tiempo 18
1.3.3.2 Multiplexación por división de longitud de onda 19
1.3.3.2.1 Multiplexación por división de longitud de onda gruesa 20
1.3.3.2.2 Multiplexación por división de longitud de onda densa 21
1.3.4 REDES XPON 22
1.3.4.1 Definición 23
1.3.4.2 Estructura de una red XPON 23
1.3.4.3 Estándares 24
1.3.4.3.1 APON 25
1.3.4.3.2 BPON 25
1.3.4.3.3 GPON 25
1.3.4.3.4 EPON/GEPON/10 GEPON 26
1.3.5 REDES NG-PON 27
1.3.5.1 XG-PON 27
1.3.5.1.1 Arquitectura de red 27
1.3.5.1.2 Requerimientos básicos de la capa física 28
1.3.5.1.3 Servicios 30
1.3.5.2 TWDM-PON 31
1.3.5.2.1 Arquitectura TWDM-PON 31
1.3.5.2.2 Plan de longitudes de onda 32
1.3.5.2.3 Aplicaciones 33
1.3.5.3 NG-PON2 34
1.3.5.3.1 Arquitectura de red 34
1.3.5.3.2 Requerimientos básicos de la capa física 35
1.3.5.3.3 Servicios 38
1.3.6 MIGRACIÓN NG-PON2 39
1.3.6.1 Escenario de migración PON brownfield 39
1.3.6.2 Escenario de migración PON greenfield 40
1.3.6.3 Coexistencia de sistemas PON heredados y NG-PON2 40

1.3.6.4 Rutas de migración 42
1.3.7 SERVICIO TRIPLE PLAY 43
1.3.7.1 Definición 43
1.3.7.2 Servicios Triple Play 44
1.3.7.2.1 VoIP 44
1.3.7.2.2 Internet de alta velocidad 44
1.3.7.2.3 IPTV 44
2 METODOLOGÍA 46
2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA PARROQUIA DE SANGOLQUÍ 46
2.1.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA 46
2.1.2 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS 47
2.1.2.1 Población 47
2.1.2.2 Proyección poblacional 47
2.1.2.3 Densidad poblacional 48
2.1.2.4 Tasa de crecimiento poblacional 48
2.1.3 ACCESO A SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES 48
2.2 PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA RED NG-PON2 48
2.2.1 REPLANTEO DE RED 49
2.2.1.1 Número de viviendas 49
2.2.1.2 Zonificación 52
2.2.1.3 Proveedores de telecomunicaciones en el sector 53
2.2.2 ESTUDIO DE MERCADO 55
2.2.2.1 Participación del mercado de telecomunicaciones según el servicio prestado 55
2.2.2.1.1 Telefonía fija 55
2.2.2.1.2 Acceso a Internet 55
2.2.2.1.3 Televisión por suscripción 57
2.2.2.2 Planes de servicios de telecomunicaciones 57
2.2.2.2.1 CNT EP 57
2.2.2.2.2 Megadatos (Netlife) 59
2.2.2.2.3 Directv 60
2.2.2.2.4 Conecel S.A. 60
2.2.2.2.5 Fibramax 62
2.2.3 ESTUDIO DE LA DEMANDA 62
2.2.3.1 Clientes potenciales 62
2.2.3.2 Proyección de la demanda 66

2.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO A CONSIDERAR 68
2.2.4.1 Ancho de banda requerido por los servicios triple play 69
2.2.4.2 Arquitectura de la red NG-PON2 72
2.2.4.2.1 Arquitectura centralizada 72
2.2.4.2.2 Arquitectura en cascada 72
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 75
3.1 DISEÑO DE LA RED NG-PON2 75
3.1.1 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PASIVOS DE LA ODN 75
3.1.1.1 Cajas de distribución y splitters de segundo nivel 75
3.1.1.2 Mangas porta splitter y splitters de primer nivel 77
3.1.1.3 Fibra óptica y cables de fibra óptica 79
3.1.2 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS ACTIVOS DE LA RED NG-PON2 83
3.1.2.1 Optical Line Terminal (OLT) 83
3.1.2.2 Wavelength Multiplexer (WM) 86
3.1.2.3 Tarjetas de servicio 87
3.1.2.4 Optical Network Unit (ONU) 89
3.1.3 DISEÑO DE LA ODN 91
3.1.3.1 Red de dispersión 91
3.1.3.2 Red de distribución 93
3.1.3.3 Red de alimentación 94
3.1.3.4 Ubicación de las cajas de distribución y trayecto de la red de distribución 94
3.1.3.5 Ubicación de las mangas porta splitter y trayecto de la red de alimentación (Feeder) 96
3.1.3.6 Esquema de la red NG-PON2 98
3.1.4 PRESUPUESTO DE POTENCIA DE LA RED NG-PON2 99
3.1.4.1 Pérdidas en la ODN 100
3.1.4.2 Pérdidas del cliente más cercano 101
3.1.4.3 Presupuesto de potencia del cliente más cercano 104
3.1.4.4 Pérdidas del cliente más lejano 105
3.1.4.5 Presupuesto de potencia del cliente más lejano 108
3.1.5 PRESUPUESTO REFERENCIAL 109
3.1.5.1 Presupuesto de los elementos activos 109
3.1.5.2 Presupuesto de los elementos pasivos de la ODN 110
3.1.5.2.1 Red de alimentación 111
3.1.5.2.2 Red de distribución 111

3.1.5.2.3 Red de dispersión....113
3.1.5.3 Presupuesto total de la red NG-PON2 113
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 115
4.1 CONCLUSIONES....115
4.2 RECOMENDACIONES 118
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 120
ANEXOS 126

RESUMEN

El presente trabajo de titulación realiza el diseño de una red de acceso con tecnología NG-PON2 (40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks) para ofrecer servicio triple play a determinados sectores urbanos de la parroquia de Sangolquí, ubicados en el cantón Rumiñahui.

En el primer capítulo se realiza un estudio de los fundamentos de las comunicaciones ópticas, una breve revisión de la estructura básica de las redes XPON. Además, se describe la evolución de los estándares XPON hasta llegar a las tecnologías de nueva generación (NG-PON) destacando la tecnología NG-PON2, las arquitecturas de referencia para la coexistencia y migración de redes PON heredadas (EPON, GPON, XG-PON) hacia NG-PON2 y por último se realiza una breve descripción del servicio triple play.

En el segundo capítulo se presenta la situación actual de la parroquia de Sangolquí, donde se muestra características del sector tales como situación geográfica, aspectos demográficos, acceso a servicios de telecomunicaciones, etc. Además, se realiza la planificación y diseño de la red NG-PON2 que consta de replanteo de red, estudio de mercado, estudio de demanda y los criterios de diseño establecidos por la CNT EP, los cuales son adaptados para el diseño de la red NG-PON2.

En el tercer capítulo se lleva a cabo el diseño de la red NG-PON2, a través del cálculo de los elementos activos y pasivos que intervienen en el diseño de la red y la correspondiente ubicación de los elementos pasivos de la ODN (Optical Distribution Network) tales como mangas de fusión de fibra óptica, cajas de distribución óptica (NAP, Network Access Point), splitters, rosetas ópticas, etc., dentro del área de cobertura. Además, se realiza el presupuesto de potencia óptico, así como también el presupuesto referencial de los elementos activos y pasivos de la red NG-PON2 diseñada.

En el cuarto y último capítulo se presentan las respectivas conclusiones y recomendaciones que deja el desarrollo del presente trabajo de titulación.

PALABRAS CLAVE: NG-PON2, NG-PON, PON heredadas, ODN, CNT EP

ABSTRACT

This degree work carries out the design of an access network with NG-PON2 technology (40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks) to offer triple play service to certain urban sectors of the Sangolquí parish, located in the Rumiñahui canton.

In the first chapter, a study of the fundamentals of optical communication is carried out, a brief review of the basic structure of XPON networks. In addition, the evolution of the XPON standards is described until reaching the new generation technologies (NG-PON), highlighting the NG-PON2 technology, the reference architectures for the coexistence and migration of legacy PON networks (EPON, GPON, XG-PON) towards NG-PON2 and finally a brief description of the triple play service is made.

In the second chapter, the current situation of the Sangolquí parish is presented, showing characteristics of the sector such as geographical location, demographic aspects, access to telecommunications services, etc. In addition, the planning and design of the NG-PON2 network is carried out, which consists of network stakeout, market research, demand analysis and the design criteria established by the CNT EP, which are adapted for the design of the NG-PON2 network.

In the third chapter, the design of the NG-PON2 network is carried out, through the calculation of the active and passive elements that involved in the design of the network and the corresponding location of the passive elements of the ODN (Optical Distribution Network) such as fiber optic splice closure, optical distribution boxes (NAP, Network Access Point), splitters, optical rosettes, etc., within the coverage area. In addition, the optical power budget is made, as well as the referential budget of the active and passive elements of the designed NG-PON2 network.

In the fourth and last chapter, the respective conclusions and recommendations left by the development of this degree work are presented.

KEYWORDS: NG-PON2, NG-PON, legacy PON, ODN, CNT EP

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el gran reto que atraviesa el sector de las telecomunicaciones, en especial los entes encargados del desarrollo y la estandarización de normas para la implementación de redes de acceso a través de fibra óptica, se ha enfocado en la exigente demanda por parte de los usuarios finales y el gran ancho de banda que día a día requieren los nuevos servicios de telecomunicaciones.

Servicios como VoIP, IPTV e Internet de alta velocidad han evolucionado de manera sorprendente y con el tiempo pueden comprometer la capacidad de redes tradicionales en el despliegue de fibra tales como FTTX/GPON. Para lo cual, redes de acceso de nueva generación son una solución atractiva para dar soporte al gran ancho de banda que requiere este tipo de servicios.

Por esta razón, el presente trabajo de titulación se centra en el diseño de una red de acceso de Nueva Generación NG-PON2, para los sectores urbanos de la parroquia de Sangolquí, sitio en el cual conviven entidades financieras, centros educativos, centros comerciales, sitios turísticos y usuarios residenciales, es decir, aquí converge la zona comercial, residencial y turística más grande del cantón Rumiñahui; por lo que, se hace necesario contar con redes de acceso de gran capacidad que cumplan con los requerimientos de los diferentes servicios de telecomunicaciones y la excesiva demanda de los usuarios finales.

Típicamente las redes de acceso que han brindado servicios de telecomunicaciones al sector han sido a través de redes tradicionales tales como ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), cable coaxial y enlaces inalámbricos, los cuales brindan servicios de forma independiente. Además, los excesivos costos que conlleva adquirir servicios de voz, datos y video por separado han limitado que ciertos usuarios sobre todo residenciales puedan contar con estos tipos de servicios al hogar.

De esta manera, una solución propuesta en el presente trabajo de titulación es la integración de servicios triple play en el sector de Sangolquí, con el propósito de reducir costos de facturación de los usuarios finales, garantizando ciertos parámetros propios de las redes de Nueva Generación tales como: mayor cobertura, mayor tasa de transmisión, mayor número de abonados, etc.

Además, el presente trabajo de titulación puede servir como modelo referencial para el despliegue de redes NG-PON2 futuras en diferentes ciudades del Ecuador, debido a que al momento no existe un despliegue de este tipo de redes en el país.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Titulación es: Diseñar una red de acceso con tecnología NG-PON2 (40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks) para ofrecer servicio triple play a determinados sectores urbanos de la parroquia de Sangolquí, ubicados en el cantón Rumiñahui.

Los objetivos específicos de este Trabajo de Titulación son:

- Describir los conceptos fundamentales de comunicación óptica, sistemas PON heredados, redes NG-PON2 y los componentes que intervienen en las redes de acceso óptico.
- Describir las arquitecturas de coexistencia de los sistemas NG-PON2 con sus tecnologías predecesoras y los escenarios de migración de redes PON.
- Realizar el estudio de la situación actual y proyección de la demanda para determinados sectores de la parroquia de Sangolquí.
- Realizar el diseño de la red NG-PON2 para los sectores especificados de la parroquia de Sangolquí.
- Elaborar un presupuesto referencial de la red NG-PON2 diseñada.

1.2 ALCANCE

El trabajo de titulación realizará el diseño de una red de acceso con tecnología NG-PON2 para determinadas zonas urbanas de la parroquia de Sangolquí delimitada por los siguientes sectores: Santa Clara, San Sebastián, Santa Rosa, San Nicolas y El Turismo; ubicados en el cantón Rumiñahui para cubrir un área de aproximadamente 3.4 Km^2.

A continuación, en la figura 1.1, se muestra el área de cobertura a considerar para el diseño de la red NG-PON2.

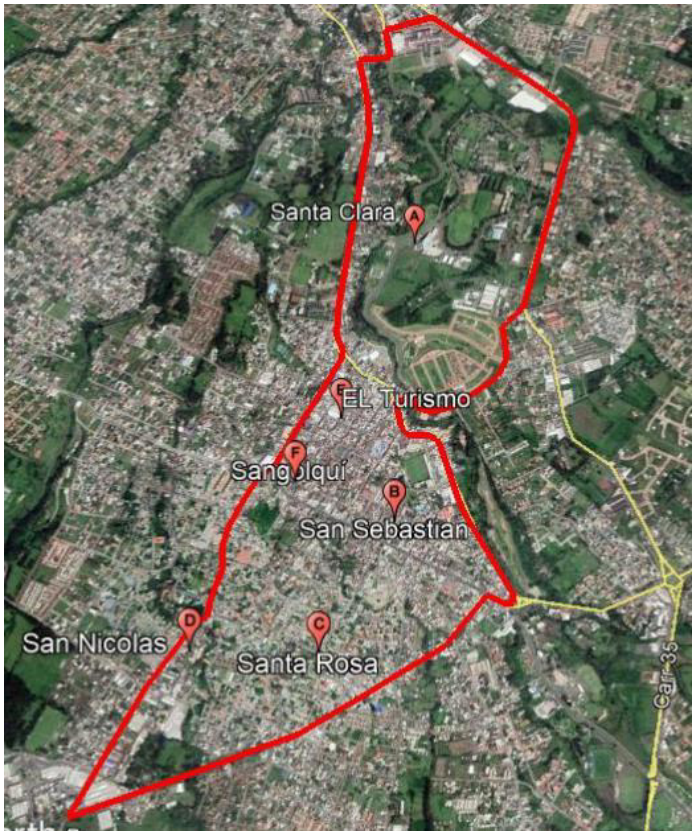

Figura 1.1. Zona de cobertura de la red NG-PON2

Se cumplirá con la fase de replanteo de red, donde se ejecutará un barrido exacto de la zona de cobertura para obtener un número determinado de viviendas mediante un conteo manual de las mismas, de manera que, en base a los datos obtenidos, un estudio de mercado para determinar los usuarios potenciales del servicio y la tasa de crecimiento poblacional especificado por el censo del 2010, se realizará el cálculo de la proyección de la demanda para un lapso de 5 años. Además, se llevará a cabo el estudio adecuado para determinar la topología de la red y el tipo de tarjetas PON de acuerdo con la necesidad del diseño, así como también la distribución de los elementos pasivos de la ODN para entregar el servicio a los usuarios finales.

Cabe señalar que el estudio de mercado se realizará en base a información solicitada a una de las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones a través de fibra óptica, desplegadas en el sector tales como: CNT, Netlife, Punto Net, Fibra Max, etc., con el objetivo de obtener la cantidad de los posibles clientes del servicio lo más precisa y ajustada a la realidad, y así evitar un sobredimensionamiento de la red.

Finalmente, se realizará el cálculo del presupuesto de potencia óptico y se elaborará un presupuesto referencial de los costos generales de los elementos activos y pasivos utilizados en la red diseñada.

Es importante mencionar que este trabajo no presentará producto final demostrable (prototipo o implementación), debido a que realizará específicamente el diseño de la red NG-PON2, donde se detallan los criterios de diseño y los estándares adecuados para la elaboración de redes de acceso a través de fibra óptica.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 FIBRA ÓPTICA

1.3.1.1 Definición [1] [2] [3]

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado construido típicamente de vidrio que utiliza pulsos de luz para transmitir información, que normalmente es usada para la implementación de redes de telecomunicaciones.

El cable de fibra óptica está compuesto de un núcleo por el cual se propaga la señal de luz, un revestimiento típicamente de un material idéntico al núcleo que actúa como reflectante para mantener la luz dentro del mismo, una cubierta plástica que evita que los rayos de luz exteriores ingresen a la fibra y la cubierta exterior que brinda una protección extra contra agentes externos a la fibra, como se muestra en la figura 1.2.

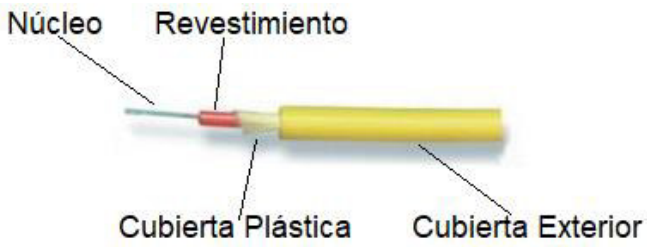

Figura 1.2. Estructura del cable de fibra óptica *[2]*

Además, los cables de fibra contienen diferentes materiales de refuerzo dependiendo de las condiciones en las que vayan a trabajar, los cuales pueden ser: tubos rellenos de gel, fibras con doble revestimiento, material dieléctrico de kevlar[1], entre otros. Todo esto, con el objetivo de brindar protección contra la humedad, excesivas tensiones, curvaturas, roedores, etc.

[1] Kevlar: Material totalmente dieléctrico, flexible y de gran resistencia a las tensiones mecánicas.

Otro punto importante que aborda el concepto de fibra óptica son las ventanas o bandas de transmisión, las cuales se definen como el rango de longitudes de onda donde la fibra presenta un mejor desempeño, debido a los bajos niveles de atenuación que se producen.

La tabla 1.1 muestra las diferentes ventanas y bandas de transmisión que se utilizan en los sistemas de comunicación óptica con su respectivo rango de longitudes de onda, así como el tipo de fibra que utilizan.

Tabla 1.1. Ventanas o Bandas de transmisión óptica *[4]*

Ventana	Banda ITU-T	Longitud de onda (nm)	Tipo de Fibra
Primera		820-880	Multimodo
Segunda	O	1260-1360	Multimodo y Monomodo
Quinta	E	1360-1460	Monomodo
Quinta	S	1460-1530	Monomodo
Tercera	C	1530-1565	Monomodo
Cuarta	L	1565-1625	Monomodo
	U	1525-1675	Monomodo

1.3.1.2 Propagación de la luz en una fibra óptica [3] [5]

1.3.1.2.1 Reflexión y refracción de la luz

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie de separación de dos medios de diferente índice de refracción con un ángulo distinto de 90 grados, una parte del rayo se refleja y otra se refracta, como se indica en la figura 1.3.

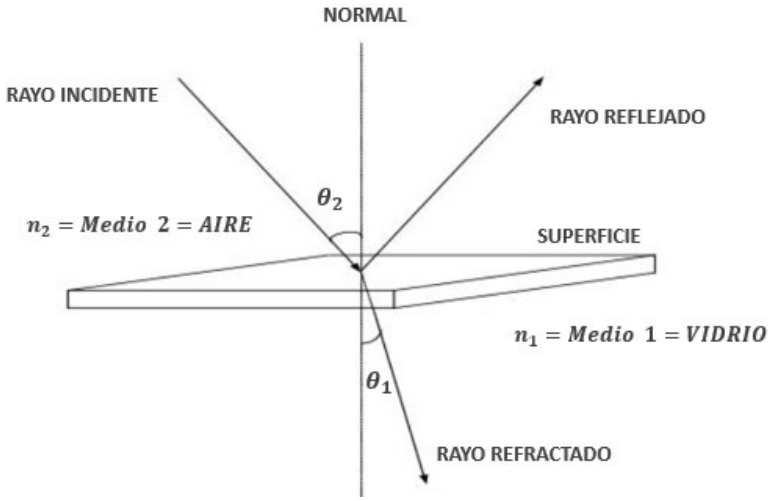

Figura 1.3. Reflexión y refracción sobre una superficie *[5]*

La relación que existe entre el ángulo incidente (θ_2), ángulo refractado (θ_1) y el índice de refracción (n) de cada medio se conoce como la "Ley de Snell" en [5] que viene dada por.

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

1.3.1.2.2 Ángulo crítico

El ángulo crítico se define como el ángulo de luz incidente que produce un ángulo de luz refractado igual a 90 grados con respecto a la normal a la superficie de separación de los dos medios, como se muestra en la figura 1.4; y, que por encima del cual un rayo de luz incidente produce una señal reflejada.

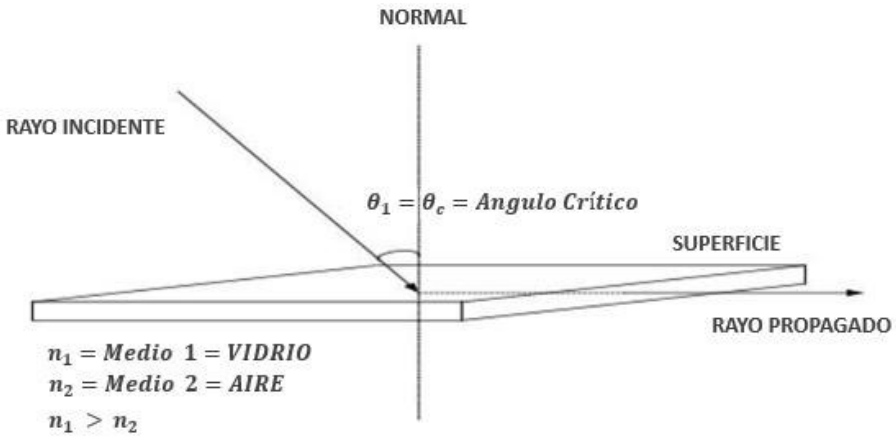

Figura 1.4. Ángulo Crítico *[5]*

Al aplicar la ley de Snell, considerando un índice de refracción del núcleo n_1 y un índice de refracción del revestimiento n_2, el ángulo critico θ_c en [5] viene dado por.

$$\theta_c = sen^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{1.2}$$

1.3.1.2.3 Reflexión total

La reflexión total se produce cuando el ángulo del rayo incidente en la superficie de separación del núcleo y revestimiento de la fibra supera el ángulo crítico θ_c; por lo cual, el rayo de luz es totalmente reflejado al medio donde fue emitido (núcleo). La "Reflexión Total" que se produce en la interfaz núcleo-revestimiento permite guiar un rayo de luz dentro del núcleo, como se muestra en la figura 1.5.

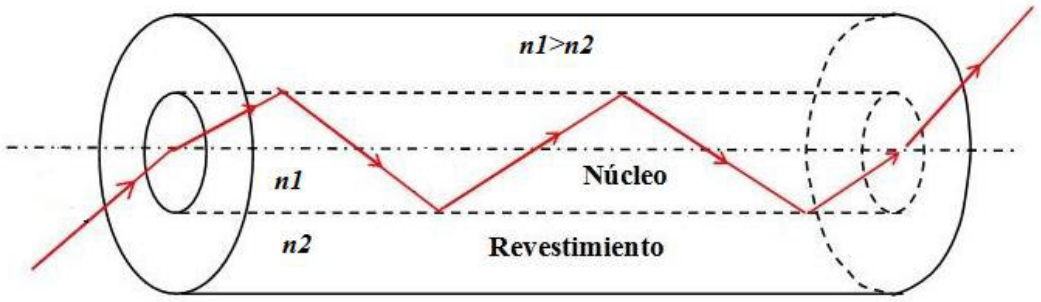

Figura 1.5. Reflexión Total en la interfaz núcleo-revestimiento *[6]*

1.3.1.2.4 Ángulo de aceptación

El ángulo de aceptación es un parámetro que permite determinar el ángulo máximo que puede formar un rayo de luz incidente desde el exterior (proveniente de la fuente de luz) con respecto al eje central en la entrada de la fibra, de tal manera que la señal de luz pueda propagarse a través de esta.

El ángulo de aceptación en [5] viene dado por.

$$\propto = sen^{-1}\left(\sqrt{{n_1}^2 - {n_2}^2}\right) \tag{1.3}$$

1.3.1.2.5 Apertura numérica (AN)

Es la cantidad de energía lumínica que puede aceptar la fibra óptica. Valores típicos de AN para fibras ópticas de vidrio se encuentran en el rango de 0.14 a 0.20.

La apertura numérica en [5] viene dada por.

$$AN = \sqrt{{n_1}^2 - {n_2}^2} \tag{1.4}$$

1.3.1.3 Clasificación de la fibra óptica [2] [7] [8] [9]

La fibra óptica según su perfil de índice de refracción y modo de propagación se puede clasificar en tres tipos, como se muestra en la figura 1.6.

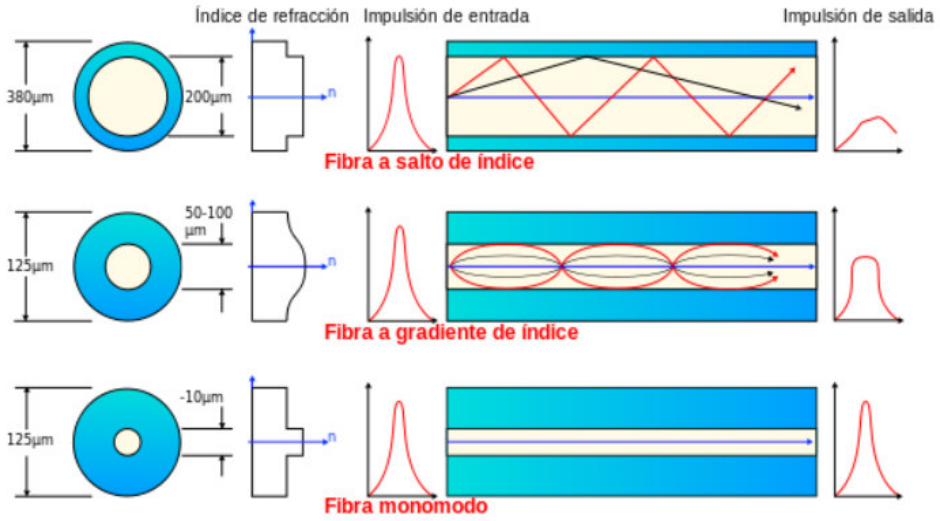

Figura 1.6. Clasificación de la fibra óptica *[10]*

1.3.1.3.1 Fibra óptica monomodo

En las fibras monomodo la luz viaja a través de un solo modo de propagación, lo cual genera ventajas significativas frente a las fibras multimodo, ya que evitan interferencias entre los distintos modos de propagación, tienen mayor ancho de banda y cobertura a grandes distancias. Para lograr estas ventajas se requiere construir un núcleo con un diámetro que varía entre 8 a 10 μm, siendo 8.3 μm el más usual. Generalmente las fibras monomodo utilizan fuentes de luz LASER ya que requieren de un haz de luz muy preciso y confinado.

1.3.1.3.2 Fibra óptica multimodo

Las fibras multimodo propagan simultáneamente múltiples señales de luz a través de diferentes modos de propagación, puesto que el diámetro del núcleo es mucho mayor y usualmente oscila entre 50 y 62,5 μm. Generalmente este tipo de fibras utilizan fuentes de luz LED y son utilizadas para enlaces de cortas distancias.

Según el índice de refracción del núcleo se tiene los siguientes tipos de fibra multimodo:

- *Fibra óptica multimodo de índice escalonado o salto de índice*

En este tipo de fibras, el índice de refracción del núcleo es constante y mayor al del revestimiento, por lo que los diferentes rayos de luz son propagados por una reflexión total en la interfaz núcleo-revestimiento, donde cada modo de propagación recorre diferentes distancias viajando a la misma velocidad de propagación y llegando al otro extremo de la fibra en diferentes tiempos, provocando una alta dispersión modal.

- *Fibra óptica multimodo de índice gradual o gradiente de índice*

En las fibras multimodo de índice gradual, el índice de refracción del núcleo es mayor cerca del eje de la fibra y menor en las cercanías del revestimiento, es decir no es constante, lo que provoca que los haces de luz cerca al eje central de la fibra se propaguen más lento y recorran menos distancias con respecto a los que viajan en las cercanías del revestimiento, presentando menor dispersión modal.

1.3.1.3.3 Fibras normalizadas según la ITU

La ITU (International Telecommunication Union) ha estandarizado una serie de recomendaciones para la fibra óptica. Cabe mencionar que las fibras monomodo estandarizadas en las recomendaciones ITU-T G.652 con sus diferentes categorías e ITU-T G.657 son adecuadas para la implementación de redes de acceso e interiores respectivamente. A continuación, se describe brevemente cada una de ellas.

- *Recomendación ITU-T G.652*

Este tipo de fibra monomodo estándar presenta el mayor despliegue en las redes de acceso y está dividida en 4 categorías A, B, C y D; las cuales se mencionan a continuación.

Las fibras G.652.A y G.652.B fueron las primeras fibras monomodo en ser desplegadas, pero por la alta atenuación que presentan en la zona water peak (iones OH^-) del espectro óptico, correspondiente a la región de 1383 nm fueron rápidamente descartadas. Por otro lado, las fibras G.652.C y G.652.D eliminan la atenuación water peak siendo capaces de operar en un espectro más extendido que comprende entre 1360 nm y 1625 nm, por lo cual, son adecuadas para trabajar con sistemas CDWM (Coarse Division Wavelength Multiplexing). Además, es importante señalar que la fibra G.652.D es la más utilizada actualmente en el despliegue de redes de acceso.

- *Recomendación ITU-T G.657*

Este tipo de fibra monomodo se caracteriza por su insensibilidad a las curvaturas y presenta las siguientes categorías:

Categoría A: Adecuada para la implementación de redes de acceso al igual que la recomendación G.652.D, con la cual comparte ciertas características de transmisión.

Categoría B: Presenta bajas pérdidas por curvaturas, por lo cual, es ampliamente utilizada para instalaciones en ambientes internos tales como: viviendas, edificios, oficinas, etc.,

lugares donde la infraestructura del cableado estructurado genera que la fibra se despliegue a través de múltiples flexiones.

1.3.1.4 Pérdidas en la fibra óptica [11] [12] [13] [14]

Otro factor que compromete el rendimiento de los sistemas de comunicación óptica es la pérdida de potencia de la señal, que se produce por causa de las propiedades e impurezas del material, deformaciones generadas en el proceso de fabricación y las condiciones a la que está expuesta la fibra óptica. A continuación, se mencionan los tipos de pérdidas en la fibra.

1.3.1.4.1 Pérdidas por absorción

Existen dos causas principales que generan absorción de energía al paso de luz por la fibra: el propio material o pérdidas de absorción intrínsecas y las impurezas del material o pérdidas de absorción extrínsecas, al igual que en todo material, las imperfecciones de cualquier tipo presentes en la fibra provocan que la energía que viaja a través misma sea transformada y disipada en calor. En general, hay tres factores que provocan pérdidas por absorción en las fibras ópticas, las mismas que se mencionan a continuación.

- *Absorción ultravioleta*

La absorción ultravioleta es considerada un tipo de pérdida intrínseca, que se produce cuando la luz ioniza los electrones de valencia del núcleo de la fibra (silíceo) y saltan a la banda de conducción. Esta ionización absorbe la energía de la señal luminosa y genera pérdidas de transmisión a través de la fibra. Es de consideración a bajas longitudes de onda.

- *Absorción infrarroja*

La absorción infrarroja es otro tipo de pérdida intrínseca, que se genera por el calor estimulado a partir de las vibraciones mecánicas causadas por la absorción de la luz por parte de las moléculas de vidrio, lo cual normalmente se deriva en pérdidas de transmisión. Es de consideración a altas longitudes de onda.

- *Absorción por resonancia de iones*

Este tipo de absorción se produce por las impurezas presentes en el material (pérdidas extrínsecas), ya que las técnicas usadas en el proceso de fabricación de la fibra no son perfectas. En el material de silíceo con el que está construido típicamente el núcleo de la fibra, la presencia de moléculas de agua causa pérdidas por absorción de iones OH^-,

presentando 3 picos, siendo el de mayor atenuación el cercano a 1383 nm. En la figura 1.7 se muestra la curva de pérdidas causadas por la absorción y scattering en una fibra.

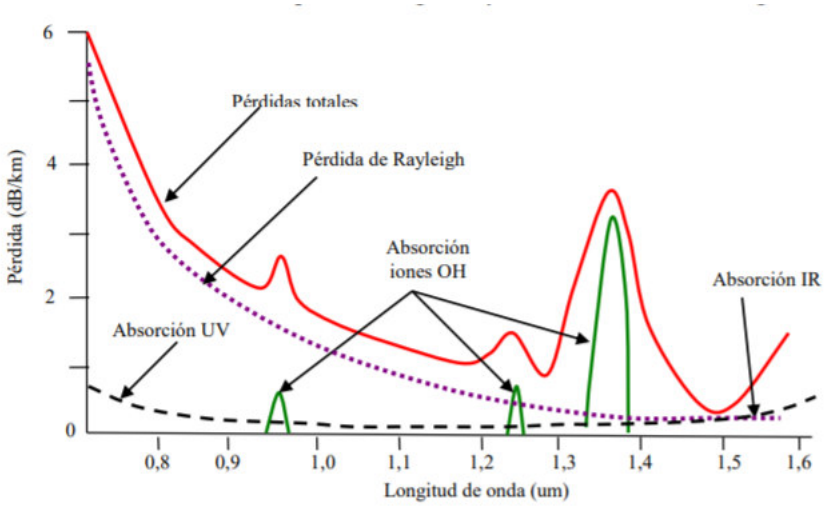

Figura 1.7. Curva de pérdidas causadas por la absorción y scattering en una fibra *[12]*

1.3.1.4.2 Pérdidas por Scattering

Toda irregularidad por más microscópica que sea genera ciertos fenómenos al paso de luz a través de la fibra. Uno de estos fenómenos provoca pérdidas por scattering y se debe generalmente al choque de las señales de luz con dichas irregularidades tales como: espacios huecos, diferencia en la densidad del material y deformaciones estructurales del mismo; lo que provoca que la luz pierda energía y la dirección de propagación cambie. Existen dos casos principales de scattering que pueden ocurrir en las fibras ópticas, los cuales dependen de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la deformación.

- *Scattering de Rayleigh*

Las pérdidas por scattering de Rayleigh son causadas por las inhomogeneidades microscópicas del material, que presentan dimensiones menores a la longitud de onda. Estas variaciones surgen de la densidad y composición del material, lo que da como resultado fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción. Además, es importante mencionar que la dispersión de Rayleigh representa más del 95% de atenuación en una fibra a bajas longitudes de onda, lo cual es difícil eliminarla, ya que depende de las variaciones mencionadas anteriormente provenientes del proceso de fabricación.

- *Scattering de Mie*

El scattering de Mie también se debe a las inhomogeneidades presentes en la fibra, pero con una dimensión similar a la longitud de onda de la luz. Actualmente, este tipo de

scattering ya no es de consideración en las fibras, debido a que pueden ser eliminado bajo un nivel de fabricación extremadamente cuidado.

1.3.1.4.3 Pérdidas por curvaturas

En un caso real, es totalmente ilógico que el tendido de fibra óptica siga una trayectoria totalmente recta; al contrario, debe acoplarse a las condiciones del medio en que se encuentra operando y vencer ciertos obstáculos. Por lo tanto, en cualquier enlace físico la fibra óptica está expuesta a sufrir ciertas curvaturas a lo largo de su trayectoria. Cuando el radio de curvatura supera ampliamente el diámetro de la fibra se produce macro curvaturas, lo que se deriva en pérdidas de potencia de la señal.

De la misma manera, se dará lugar a otro tipo de curvaturas que son propias de la fibra óptica, y se debe a que cada hilo de fibra en el interior de un cable es introducido de manera diferente, lo que provoca ciertas variaciones a pequeña escala en la radio de curvatura de la fibra y producen pérdidas por micro curvaturas.

También, las micro curvaturas son producidas por las irregularidades entre el núcleo y el revestimiento de la fibra óptica, que se derivan de las variaciones en el diámetro de la fibra (error de elipticidad) o por las fuerzas exteriores que provocan tortuosidades en el eje de la fibra (error de concentricidad) [14].

1.3.1.5 Dispersión en la fibra óptica [15] [16] [17] [18] [19] [9]

La dispersión genera que los diferentes pulsos de potencia óptica que viajan a través de la fibra se ensanchen en el tiempo, traslapándose eventualmente entre ellos, lo cual limita la calidad de la señal óptica provocando restricciones en el ancho de banda y la distancia de transmisión. Se tiene los siguientes tipos de dispersión:

1.3.1.5.1 Dispersión modal

La dispersión modal es causada por el tiempo de retardo entre los diferentes modos de propagación que atraviesan la fibra óptica, debido a que recorren diferentes distancias. Por lo tanto, la dispersión modal está presente solo en fibras multimodo las cuales llevan más de un rayo de luz dentro del núcleo simultáneamente, como se muestra en la figura 1.8.

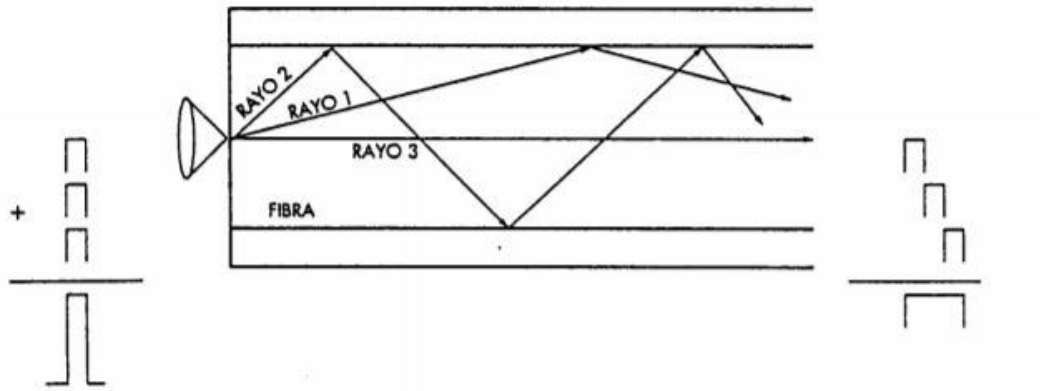

Figura 1.8. Dispersión modal en una fibra multimodo de índice escalonado *[18]*

1.3.1.5.2 Dispersión cromática

Las fuentes de luz utilizadas en los sistemas de comunicación óptica no son completamente monocromáticas debido a que poseen un ancho espectral finito, lo cual genera que cada componente espectral de la señal viaje a velocidades diferentes, provocando ensanchamiento en los pulsos de luz dentro de cada modo de propagación. A esto se lo conoce como dispersión cromática, la cual se divide en dispersión cromática de material y de guía de onda.

- *Dispersión cromática de material*

La dispersión cromática de material surge debido a que el índice de refracción del núcleo de la fibra depende de la longitud de onda de la luz que no es totalmente monocromática, por lo que se produce que las diferentes componentes espectrales se propaguen con distintas velocidades provocando retardos diferentes para cada una de ellas, causando un ensanchamiento en los pulsos de luz, como se observa en la figura 1.9.

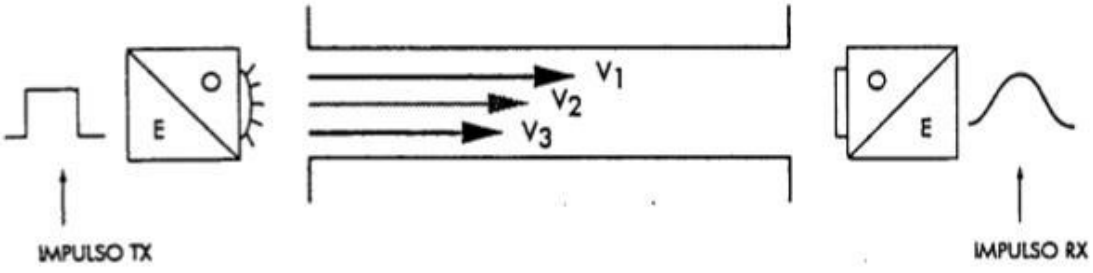

Figura 1.9. Dispersión cromática de material *[18]*

- *Dispersión cromática de guía de onda*

Este tipo de dispersión está presente sólo en fibras monomodo, debido a que la estructura geométrica del núcleo es muy pequeña, lo que produce que la mayor parte de la energía óptica se propague por el núcleo y el resto a través del revestimiento, como se muestra en la figura 1.10. Además, el índice de refracción del núcleo es mayor con respecto al índice de refracción del revestimiento lo que genera que la energía óptica viaje a diferentes velocidades en cada medio, provocando retardos y por consecuencia ensanchamiento del pulso.

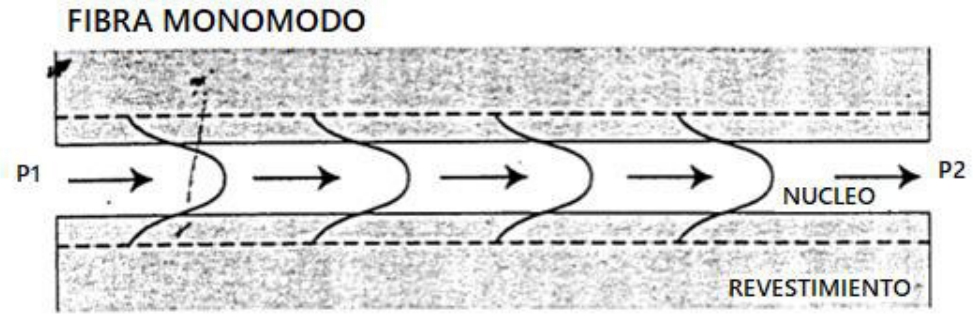

Figura 1.10. Dispersión cromática de guía de onda *[18]*

1.3.1.5.3 Dispersión de modo de polarización

En una situación real, las fibras no son totalmente cilíndricas, sino que presentan pequeñas deformaciones. Por lo cual, los componentes ortogonales de polarización de un modo se desplazan a diferentes velocidades, produciéndose retardos distintos para cada una de ellas, lo que genera dispersión en el pulso de luz, la que recibe el nombre de dispersión por modo de polarización (PMD, Polarization Mode Dispersion). Como se muestra en la figura 1.11.

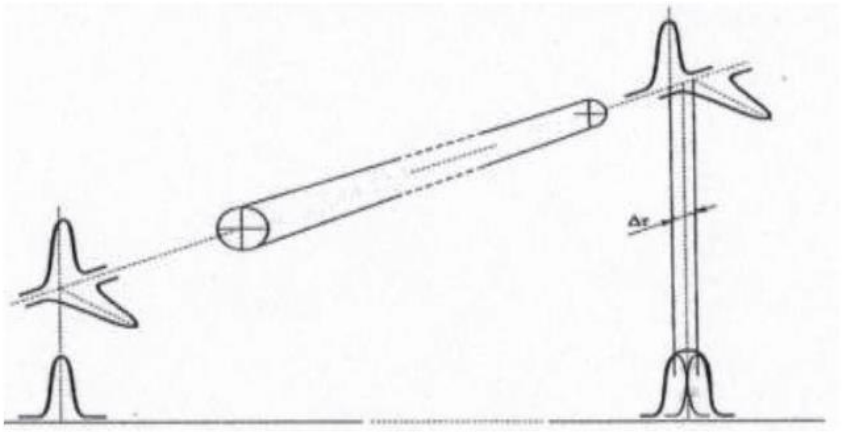

Figura 1.11. Dispersión de modo de polarización *[9]*

1.3.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA [5] [10] [11] [12]

Un sistema de comunicación óptica está constituido fundamentalmente por 3 bloques funcionales que son: transmisor, medio de transmisión de fibra óptica y receptor. Como se muestra en la figura 1.12.

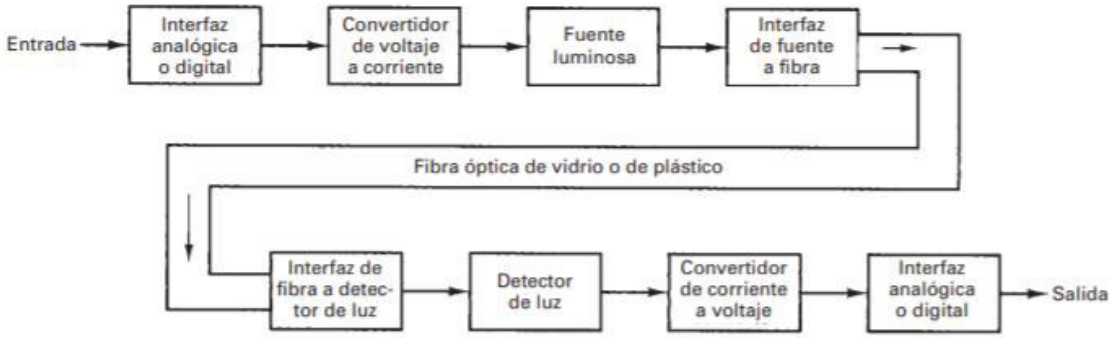

Figura 1.12. Sistema de comunicación óptico *[11]*

1.3.2.1 Transmisor

Un transmisor óptico consta esencialmente de una fuente de luz.

1.3.2.1.1 Fuente de luz

La cantidad de luz emitida por las fuentes depende exclusivamente de la corriente de excitación. Estas fuentes de luz tienen la función principal de convertir las señales eléctricas en señales luminosas y son de dos tipos las cuales se describen a continuación:

- *Fuente LED (Light Emitting Diode)*

Una fuente LED es un diodo semiconductor de juntura P-N que emite luz cuando es polarizado directamente y lo realiza por emisión espontánea; es decir, la luz se emite debido a la recombinación de electrones y huecos. Típicamente las fuentes LED son utilizadas juntamente con fibras multimodo en enlaces ópticos de corta distancia, debido a que presentan una gran dispersión de luz y una extensa distribución espectral de energía, como se muestra en la figura 1.13. Además, estas fuentes por presentar bajas potencias, amplios tiempos de respuesta, reducidas tasas de transmisión y un tiempo de vida de aproximadamente de 10^7 horas; presentan un precio relativamente económico.

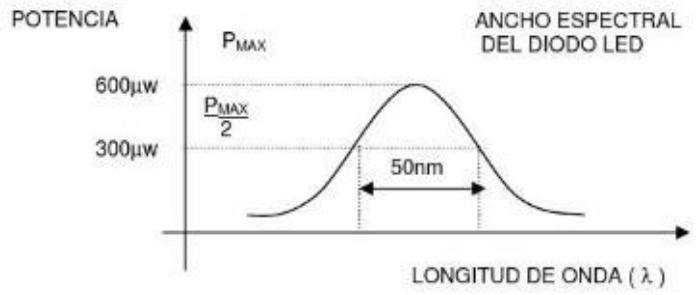

Figura 1.13. Ancho espectral del LED *[5]*

- *Fuente ILD (Injection Laser Diode)*

La fuente ILD es un semiconductor láser, que por debajo de cierto umbral de corriente trabaja de forma similar a un diodo LED y por encima del mismo genera una luz por emisión estimulada, la cual es la base de funcionamiento del LASER. Esta fuente posee un ancho espectral muy estrecho y no genera una dispersión de luz tan amplia, como se muestra en la figura 1.14, por lo cual es óptima para realizar comunicaciones ópticas de larga distancia a través de fibras monomodo. Además, este tipo de fuentes presentan mejores características tales como: mayores potencias de emisión, menor tiempo de respuesta y elevadas tasas de transmisión, pero su costo es superior al del LED.

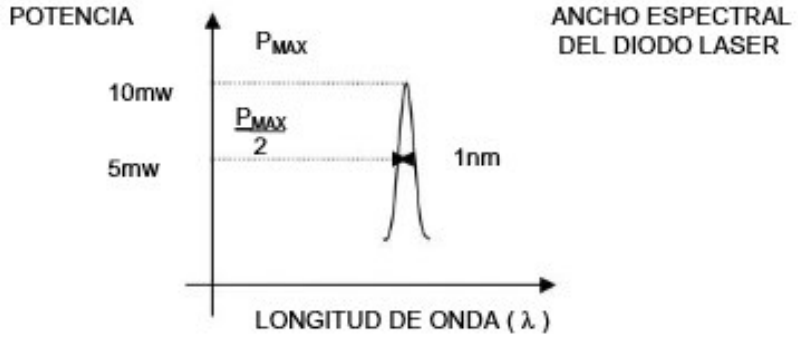

Figura 1.14. Ancho espectral del LÁSER *[5]*

1.3.2.2 Medio de transmisión

Típicamente, en un sistema de comunicación óptica el medio de transmisión más utilizado es la fibra óptica de vidrio, según los requerimientos del enlace óptico. Las fibras son el material por excelencia, ya que son inmunes a las interferencias electromagnéticas y pueden transportar información a largas distancias con velocidades de transmisión muy grandes, sin la necesidad de utilizar muchos repetidores para recuperar la intensidad de la

señal. Por lo cual, son muy utilizadas en redes WAN (Wide Area Network), conexiones transcontinentales y transoceánicas, redes LAN (Local Area Network) y redes de acceso, ya que, permiten un envió rápido y eficaz de información entre los distintos dispositivos conectados en la red reduciendo costos de operación.

1.3.2.3 Receptor

Un receptor óptico está esencialmente formado por un a detector de luz.

1.3.2.3.1 Detector de luz

Los detectores ópticos son los encargados de convertir las señales luminosas en señales eléctricas, existen esencialmente dos tipos de detectores ópticos los cuales se detallan a continuación:

- *Diodo PIN (P-Intrinsic-N)*

El diodo PIN es típicamente el detector de luz más utilizado en los sistemas de comunicación óptica. Este detector está formado por la unión de una capa semiconductora tipo P y otra N extremadamente dopadas, con un material semiconductor intermedio, tipo N, ligeramente dopado o intrínseco. Como se muestra en la figura 1.15.

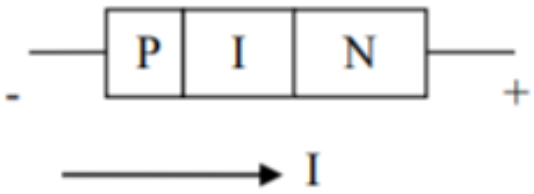

Figura 1.15. Material de un diodo PIN *[12]*

Cuando la luz ingresa al diodo los fotones son absorbidos por el material intrínseco los cuales transmiten la energía necesaria para que los electrones de la banda de valencia salten a la banda de conducción y permitan el paso de corriente a través del diodo. El diodo PIN posee un tiempo de vida muy alto y requiere bajos voltajes de polarización inversa para su funcionamiento, pero necesitan una buena amplificación.

- *Fotodiodo APD (Avalanche Photodiode)*

El diodo APD está formado por materiales semiconductores con una estructura P-I-P-N, como se muestra en la figura 1.16.

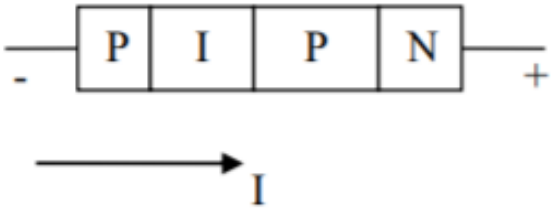

Figura 1.16. Material de un Fotodiodo APD *[12]*

Cuando la luz ingresa al fotodiodo, provoca que los electrones salten a la banda de conducción. La gran intensidad de campo eléctrico que se emite por la polarización inversa origina ionización por impacto, donde ciertos portadores pueden adquirir velocidades extremadamente altas para colisionar e ionizar otros electrones y estos a su vez vuelven a colisionar generando una cadena de ionización, este proceso es conocido como efecto avalancha de corriente fotoeléctrica. De manera que, un fotodiodo APD es más sensible y no necesita una elevada amplificación, pero presenta tiempos de transición altos y genera ruido interno debido al impacto de los electrones.

1.3.3 MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICA [13] [20] [21] [22] [23]

La multiplexación es una técnica que permite enviar varios flujos de información por un mismo medio de transmisión. En los sistemas de comunicación óptica, debido al gran ancho de banda que dispone la fibra; en el orden de los THz, es común referirse a dos técnicas de multiplexación en el dominio óptico como OTDM (Optical Time Division Multiplexing) y WDM (Wavelength Division Multiplexing).

1.3.3.1 Multiplexación óptica por división de tiempo

Al igual que la multiplexación por división de tiempo (TDM, Time Division Multiplexing) en el dominio eléctrico, existe técnicas de multiplexado para señales ópticas que se denomina multiplexación óptica por división de tiempo (OTDM). Técnicamente OTDM trabaja de forma similar al dominio eléctrico, con la diferencia que puede realizar un multiplexado de varias señales luminosas alcanzando velocidades que superan sin dificultades los Tb/s, lo que resulta imposible en los sistemas eléctricos.

Las señales ópticas emitidas por diferentes fuentes se intercalan en el tiempo para formar un solo flujo. Por lo tanto, el intercalado puede ser de bit a bit o paquete a paquete, donde se introducen pulsos de inicio para delimitar la separación entre cada grupo de N bits o entre paquetes respectivamente. Además, estos pulsos son importantes para demultiplexar

la señal en el receptor. En la figura 1.17, se muestra las técnicas de intercalado correspondientes a cada caso.

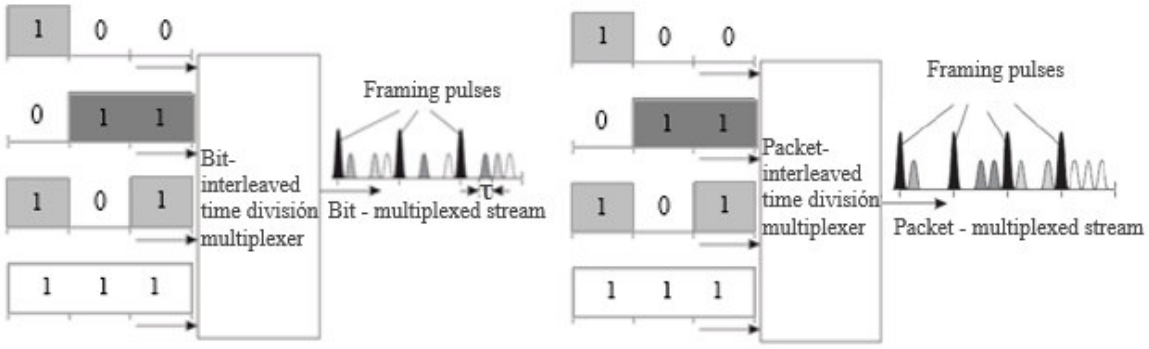

Figura 1.17. Técnicas de Intercalado OTDM *[20]*

En OTDM, se requiere que las señales ópticas sean codificadas con códigos del tipo RZ (Return to Zero), con el objetivo de que los pulsos resultantes tengan presencia de 1s y 0s para evitar problemas en la recuperación del reloj en recepción. Otro punto importante, es lograr velocidades por encima de los Gb/s; por lo que, se requieren fuentes que generen pulsos en el orden los picosegundos.

1.3.3.2 Multiplexación por división de longitud de onda

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM), permite enviar múltiples portadoras ópticas de diferentes longitudes de onda, simultáneamente, a través de una sola fibra. Por lo tanto, WDM permite explotar el gran ancho de banda que ofrece la fibra óptica, ya que la capacidad de transmisión está dada por el número de canales multiplexados. En la figura 1.18, se muestra la estructura básica de WDM, donde cada señal se combina en el multiplexor antes de ingresar a la fibra y luego son separadas por el demultiplexor para conducirlas a receptores individuales.

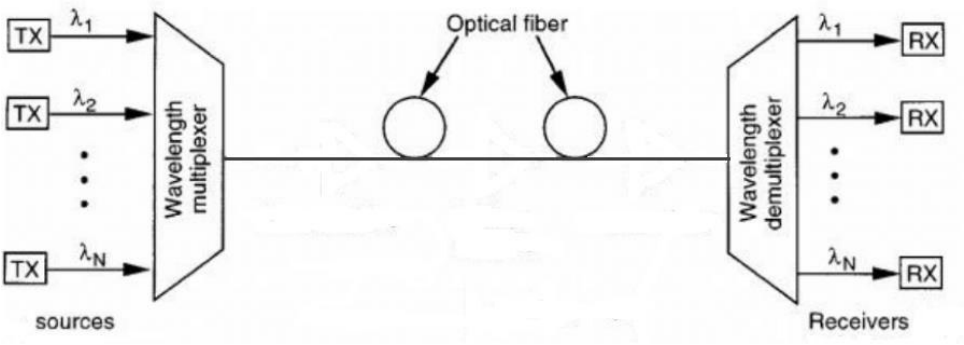

Figura 1.18. Estructura básica sistema WDM *[20]*

A partir de este concepto de WDM se distinguen dos tipos de multiplexación por división onda tales como CWDM (Coarse WDM) y DWDM (Dense WDM), que se detallan a continuación.

1.3.3.2.1 Multiplexación por división de longitud de onda gruesa

La multiplexación por división de longitud de onda gruesa (CWDM), es una técnica de multiplexación WDM que se caracteriza por tener un gran espaciamiento entre canales de aproximadamente 20nm, dentro del rango de longitudes de onda de 1271 nm a 1611 nm, las cuales se encuentran estandarizadas en la recomendación G.694.2 de la ITU-T, como se muestra en la figura 1.19.

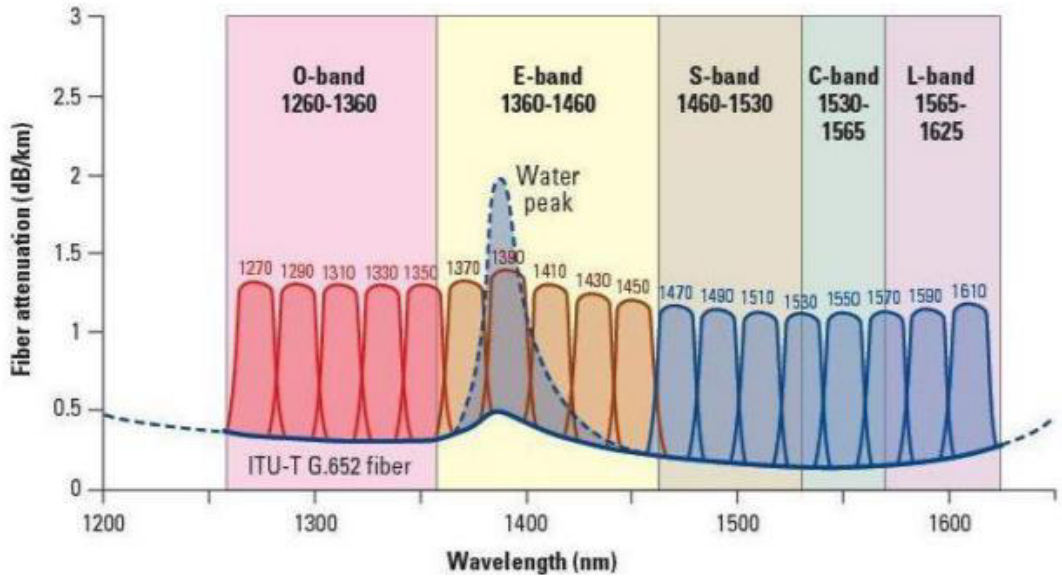

Figura 1.19. Longitudes de onda para CWDM según la recomendación G.694.2 de la UIT-T *[21]*

Habitualmente CWDM utiliza las longitudes de onda comprendidas en las bandas C, L y parte de la S. Pero cuando es necesario se utilizan las longitudes de onda de las bandas E y O alcanzando un total de 18 longitudes de onda, transportadas típicamente sobre fibras ópticas monomodo G.652.C y G.652.D.

Además, estos sistemas CWDM están diseñados para operar en distancias cortas, por lo cual, no es necesario introducir amplificadores ópticos en los enlaces y normalmente son utilizadas en redes de transporte metropolitanas.

1.3.3.2.2 Multiplexación por división de longitud de onda densa

La multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), es una técnica avanzada de WDM, se caracteriza por tener un espaciamiento de canales más estrecho en relación con CWDM, por lo que permite transmitir un mayor número de longitudes de onda multiplexadas sobre una misma fibra. Los sistemas DWDM aprovechan la óptica avanzada, por lo que requiere de dispositivos con propiedades muy precisas; y, por consiguiente, altamente costosos como son: láseres sintonizables y filtros ópticos de banda estrecha.

La grilla de frecuencias para DWDM está estandarizada en la recomendación G.694.1 de la ITU.T, y admite un espaciamiento de canales fijos usualmente de 12.5, 25, 50 y 100 GHz, correspondientes a 0.1, 0.2, 0.4 y 0.8 nm respectivamente, dentro de la banda C, L y S.

Actualmente, existen sistemas UDWDM (Ultra Dense WDM) que pueden multiplexar hasta 1022 lambdas, con velocidades de 2.5, 5 y 10 Gb/s por canal, con lo cual, se puede alcanzar fácilmente una capacidad superior a 1 Tb/s en la misma fibra.

El esquema de un sistema DWDM se muestra en la figura 1.20 y consta de los siguientes elementos.

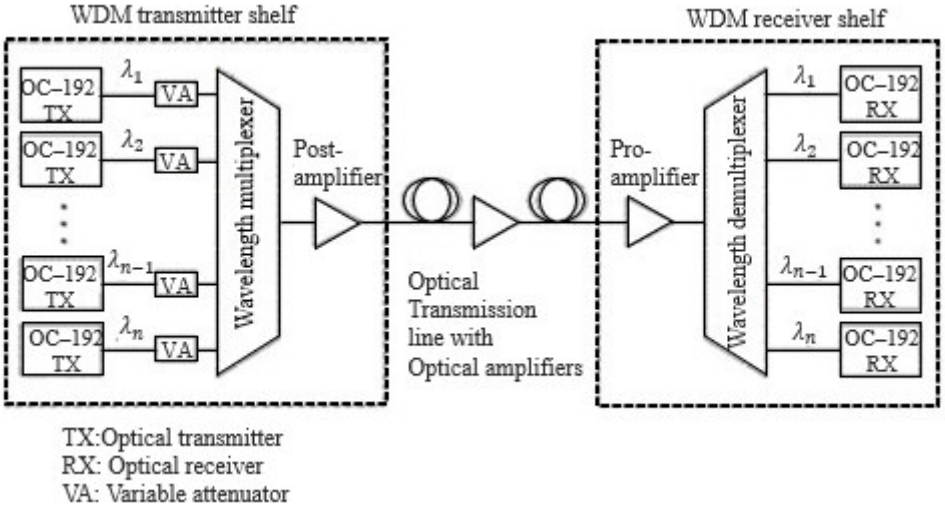

Figura 1.20. Esquema de funcionamiento de un sistema DWDM *[20]*

Transponder: Permite transformar la longitud de onda de la señal entrante en una longitud de onda estándar, adecuada para los sistemas DWDM según la grilla de frecuencias dadas por la ITU-T.

Multiplexor: Las longitudes de onda provenientes de los transponders son multiplexadas y enviadas sobre una misma fibra.

Post amplificador: Este amplificador es del tipo EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), se encuentra a la salida del multiplexor y cumple la función de amplificar la señal óptica multiplexada.

Amplificador de línea: Dado que la luz se propaga por la fibra, sufre atenuaciones o pérdidas de todo tipo, las cuales se compensan utilizando amplificadores ópticos usualmente del tipo EDFA en algún punto de la trayectoria de la fibra.

Pre amplificador: Este amplificador también es del tipo EDFA y se lo utiliza para incrementar el nivel de potencia de la señal óptica antes de ingresar a la etapa de demultiplexación.

Demultiplexor: La función principal de un demultiplexor es separar las longitudes de onda provenientes del medio de transmisión y enviárselas de forma individual a cada receptor.

Los amplificadores EDFA presentan un compartimiento lineal, lo cual permite una amplificación de canales sin introducir crosstalk, también, proporcionan altas ganancias, bajas pérdidas por acoplo de fibra, reflexiones despreciables, etc., lo cual lo hace ideal para comunicaciones de largas distancias característica propia de los sistemas WDM [24].

En cuanto a los amplificadores RAMAN, una de las ventajas que presenta es la reducción al ruido en comparación a los EDFA, aunque tienen menor ganancia, por lo que suelen ser usados conjuntamente con estos últimos al final del trayecto de comunicación formando sistemas híbridos EDFA/RAMAN [24].

De esta manera, los amplificadores comúnmente utilizados para sistemas DWDM son los EDFA, debido a las características mencionadas anteriormente y por su costo más económico en comparación a los amplificadores RAMAN [24].

1.3.4 REDES XPON [8] [25] [26] [27] [28] [29] [30]

Desde hace mucho tiempo la alta demanda de ancho de banda, mayores velocidades de transmisión, y menores costos de instalación y mantenimiento en la red de acceso o última milla, se ha convertido en una prioridad por parte de las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones. Debido a esto, dichas empresas se han visto en la necesidad de realizar una migración hacia líneas de fibra óptica en sus redes de acceso, las cuales conectan las centrales del proveedor de servicios con el cliente final, destacando grandes ventajas de transmisión propias de la fibra. Esto se lo conoce con el nombre de fibra en el bucle de abonado (FITL, Fiber Into The Loop). Bajo esta denominación se ha creado una

serie de tecnologías y topologías en las redes de acceso, siendo las redes ópticas pasivas (PON, Passive Optical Network) y sus diversos estándares los más desplegados en la actualidad.

1.3.4.1 Definición

Las XPON son redes de acceso ópticas que unen la central local con múltiples abonados utilizando la fibra óptica como medio de transmisión y dispositivos intermedios puramente pasivos como los splitters o divisores ópticos, los cuales ramifican la señal desde la OLT (Optical Line Terminal) en el lado del proveedor hasta las ONU (Optical Network Unit) en el lado del cliente final, mediante una topología punto multipunto, donde todas las ONU reciben la misma señal.

Este tipo de arquitecturas presentan grandes ventajas con respecto a las redes tradicionales como las de cobre, ya que permiten alcanzar distancias de cobertura de aproximadamente 20 Km desde la central local hasta los abonados, ofrecen mayores anchos de banda permitiendo alcanzar velocidades sobre los 2.5 Gb/s en el enlace descendente, elevan la calidad de servicio con menor coste de operación y mantenimiento de la red, y son inmunes a interferencias electromagnéticas característica propia de la fibra.

1.3.4.2 Estructura de una red XPON

Las redes XPON son arquitecturas que presenta un despliegue punto-multipunto y constan de las siguientes partes:

OLT (Optical Line Terminal): Es la parte activa de las redes XPON situada en la central local del proveedor y encargada de administrar todos los servicios solicitados por el usuario.

ODN (Optical Distribution Network): Es la parte pasiva de las redes XPON, encargada de transportar las señales ópticas desde la OLT hasta las ONT (Optical Network Terminal) mediante ciertos dispositivos complemente pasivos como: armarios de distribución (FDH, Fiber Distribution Hub), mangas porta splitter, splitters, cajas de distribución (NAP, Network Access Point), rosetas ópticas, etc.

ONU (Optical Network Unit): Elemento ubicado en la infraestructura del cliente final, si se trata de una vivienda se denomina ONT (Optical Network Terminal), son los encargados de transformar la señal óptica a eléctrica en el enlace descendente y de eléctrica a óptica en el enlace ascendente.

En la figura 1.21 se muestra la estructura básica de las redes XPON.

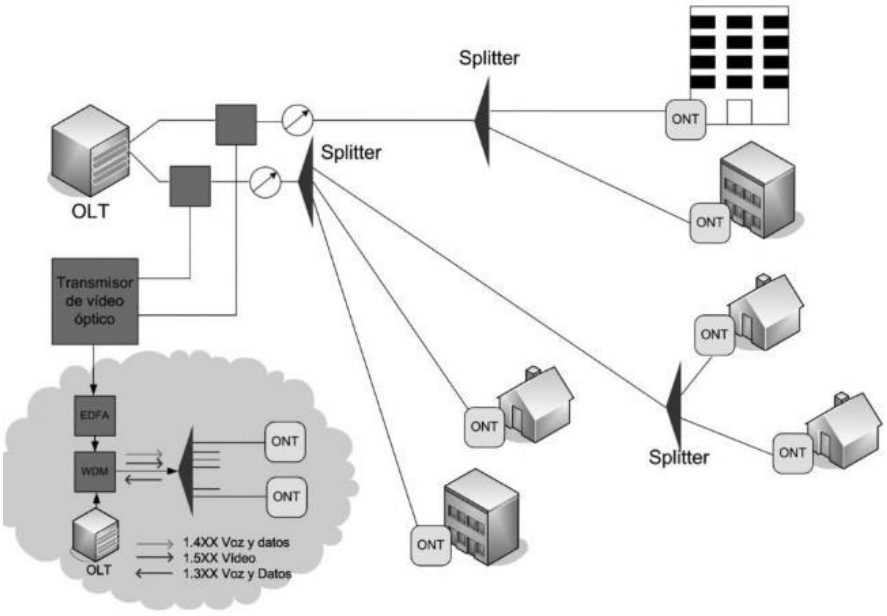

Figura 1.21. Estructura de las redes XPON *[30]*

Además, como parte de la ODN se puede detallar 3 partes fundamentales las cuales de mencionan a continuación.

Red Feeder: Comprende la parte de la ODN que conecta el ODF (Optical Distribution Frame) situado en el nodo central del proveedor con los armarios de distribución (FDH), donde se encuentran los splitters [31].

Red de Distribución: Comprende el tramo que une los splitters con las cajas de distribución (NAP) [31].

Red de Dispersión: Comprende el último tramo de la ODN correspondiente a la unión de las cajas de distribución con el cliente final, donde se encuentran las rosetas ópticas [31].

1.3.4.3 Estándares

Debido a las grandes ventajas que presentan las redes acceso PON, algunas organizaciones tales como la FSAN (Full Service Access Network) conjuntamente con la ITU (International Telecommunication Union) y la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), han impulsado tecnologías cada vez con mejores características que sus predecesoras, a la par que estandarizan normas y recomendaciones adecuadas para el diseño e implementación de las mismas.

De esta manera a lo largo del tiempo se han estandarizado una serie de tecnologías PON las cuales se mencionan a continuación:

1.3.4.3.1 APON

Las primeras especificaciones para redes PON fueron desarrollados por la FSAN y estandarizadas por IUT-T en la recomendación G-983, con el nombre de redes APON (ATM PON), las cuales trabajan bajo el modo de transferencia asincrónica (ATM, Asynchronous Transfer Mode) y otorgan velocidades de transmisión simétricas de 155 Mb/s en downlink y uplink respectivamente, también pueden brindar velocidades asimétricas de 622 Mb/s en el downlink y 122 Mb/s en el uplink. En cuanto a la distancia física entre la OLT y ONT tiene un alcance máximo de 20 km con una relación en los splitters de 1:32.

1.3.4.3.2 BPON

BPON (Broadband PON) aparece como la tecnología sucesora de APON y de igual manera está estandarizada en la recomendación ITU-T G-983. Presenta mejores características de transmisión tales como: mayor ancho de banda y configuración de la tasa de bits en los enlaces uplink y downlink consiguiendo velocidades de 155 y 622 Mb/s para el uplink y velocidades de 155 Mb/s, 622 Mb/s y 1.25 Mb/s para el downlink. Otras especificaciones que se pueden detallar es el alcance físico que existe entre la OLT y ONT de 20 Km y una relación de división máxima para los splitters de 1:32.

1.3.4.3.3 GPON

La tecnología GPON (Gigabit PON) surge como la evolución de BPON y está estandarizada en las recomendaciones ITU-T G.984.1 hasta ITU-T G.984.7. En el 2001 la FSAN inicia los estudios acerca de las especificaciones GPON y en el 2003 la ITU-T aprueba los primeros estándares correspondientes a la arquitectura básica (G.984.1) y los requerimientos de la capa dependiente del medio físico (PMD, Physical Medium Dependent) (G.894.2). En el 2004 se da a conocer las especificaciones de la capa de convergencia de transmisión (TC, Transmission Convergence) (G.894.3) y los requisitos de gestión de GPON (G.984.4). Luego se definen los rangos de longitudes de onda para los servicios adicionales que se superpondrán en la red GPON mediante sistemas WDM, con el propósito de maximizar los recursos de la ODN (G.984.5), la descripción de la arquitectura y los parámetros de interfaz para los sistemas GPON con alcance extendido

(G.984.6), finalizando con los requisitos necesarios para que GPON soporte una distancia de 40 Km (GPON de largo alcance) (G.984.7).

GPON fue estandarizada para brindar una transmisión simétrica de 2.5 Gb/s en el downlink y uplink respectivamente, además, puede brindar una transmisión asimétrica de 2.5 Gb/s en el downlink y 1.25 Gb/s en el uplink, siendo el modo asimétrico el más utilizado. En el enlace de bajada se utiliza una transmisión tipo broadcast, es decir, cada ONT recibe todo el tráfico enviado por un puerto de la OLT perteneciente a 32 o 64 usuarios, de manera que, cada ONT tiene la capacidad de filtrar y aceptar el tráfico correspondiente al mismo, y para el enlace de subida utiliza protocolos de acceso al medio tal como TDMA (Time Division Multiple Access), para evitar colisiones.

En cuanto a características técnicas, GPON consta de una OLT instalada en la central local con puertos que pueden brindar servicios hasta 128 usuarios, una relación de división máxima en los splitters de 1:128 (teórico) y 1:64 (práctico), un alcance máximo de 20 Km desde la OLT hasta la ONT y capacidad para brindar servicios triple play (voz, datos y video) por un mismo hilo de fibra, utilizando una longitud de onda de 1490 nm para la transmisión de voz y datos en el downlink y 1310 nm para el uplink. Además, se reserva una tercera longitud de onda de 1550 nm para la transmisión de video RF.

1.3.4.3.4 EPON/GEPON/10 GEPON

EPON (Ethernet PON), está estandarizada bajo una extensión de ethernet (IEEE 802.3) en la norma IEEE 802.3ah. Su objetivo principal es transportar tráfico IP en lugar de celdas ATM. Presenta una ventaja importante en comparación con otras tecnologías como APON, BPON y GPON, ya que no requiere arquitecturas SDH para la interconexión de los nodos EPON. Además, posee una arquitectura con un alcance máximo de 10Km entre la OLT y ONT, esto lo logra mediante una relación de división máxima de 1:32 en los splitters.

GEPON (Gigabit Ethernet PON), surge como una tecnología de EPON para soportar velocidades de transmisión en el orden de Gigabit por segundo, de igual manera trabaja bajo las especificaciones de la norma IEEE 802.3, y es utilizada para dar soporte a servicios triple play.

10 GEPON (10 Gigabit Ethernet PON), es otro tipo de tecnología EPON con mayor capacidad de ancho de banda que sus predecesoras y se rige en la norma IEEE 802.3av de ethernet. Presenta velocidades de transmisión simétricas de 10 Gb/s en el downlink y uplink respectivamente, también opera en un modo asimétrico con velocidades de 10 Gb/s en el downlink y 1.25 Gb/s en el uplink.

1.3.5 REDES NG-PON [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39]

Las redes ópticas pasivas de nueva generación (NG-PON, Next Generation Passive Optical Network) fueron creadas por la FSAN mediante su grupo de trabajo denominado NG-PON, el cual tiene el propósito de estudiar y desarrollar nuevas especificaciones para las redes de acceso a través de fibra, mejorando las cualidades de los estándares ya existentes. Además, el grupo tiene como prioridad facilitar la coexistencia y migración entre los diferentes sistemas XPON y NG-PON, así como también la reutilización del despliegue de fibra existente propia de las arquitecturas predecesoras a las redes NG-PON, todo esto para evitar nuevas inversiones por parte de los operadores en el traspaso hacia nuevas tecnologías.

Este grupo dividió el proyecto de nueva generación en dos fases XG-PON (10 Gigabit PON) y las NG-PON2 (Next Generation PON2), siendo la última el objeto de estudio de este trabajo de titulación.

1.3.5.1 XG-PON

Las redes XG-PON son redes pasivas de nueva generación desarrolladas por el grupo de trabajo NG-PON de la FSAN y estandarizada en la recomendación ITU-T G.987. Esta recomendación mantiene características de sus tecnologías predecesoras UIT-T G.983.x (APON y BPON) e IUT-T G.984.x (GPON), con el propósito de promover la compatibilidad con las redes de distribución óptica (ODN) de las tecnologías mencionadas. Además, la recomendación permite la coexistencia GPON y XG-PON sobre la misma infraestructura de fibra mediante la incorporación de un elemento de coexistencia denominado WDM1r, que permite combinar las longitudes de onda asignadas a cada estándar, así como también el servicio de video RF.

1.3.5.1.1 Arquitectura de red

XG-PON, al igual que GPON utiliza un enlace punto-multipunto mediante TDM para el canal descendente y un enlace punto a punto TDMA para el canal ascendente con velocidades de transmisión que superan a las de GPON y una variación en el plan de longitudes de onda.

- *Configuración de referencia*

Una configuración de referencia de alto nivel XG-PON es muy similar a las recomendaciones XPON mencionadas anteriormente. Adicionalmente XG-PON puede

incluir el servicio de video RF mediante la inserción de un dispositivo WDM que une la señal XG-PON con la de video RF.

También, se detalla una configuración de referencia genérica para XG-PON que se muestra en la figura 1.22, la cual incluye un segmento de distribución óptico (ODS[2], Optical Distribution Segment) o un grupo de estos interconectados por extensores de alcance (RE[3], Reach Extenders) como parte de la ODN, unidos a la OLT y ONU a través de las interfaces SNI[4] (Service Node Interface) y UNI[5] (User Network Interface) respectivamente.

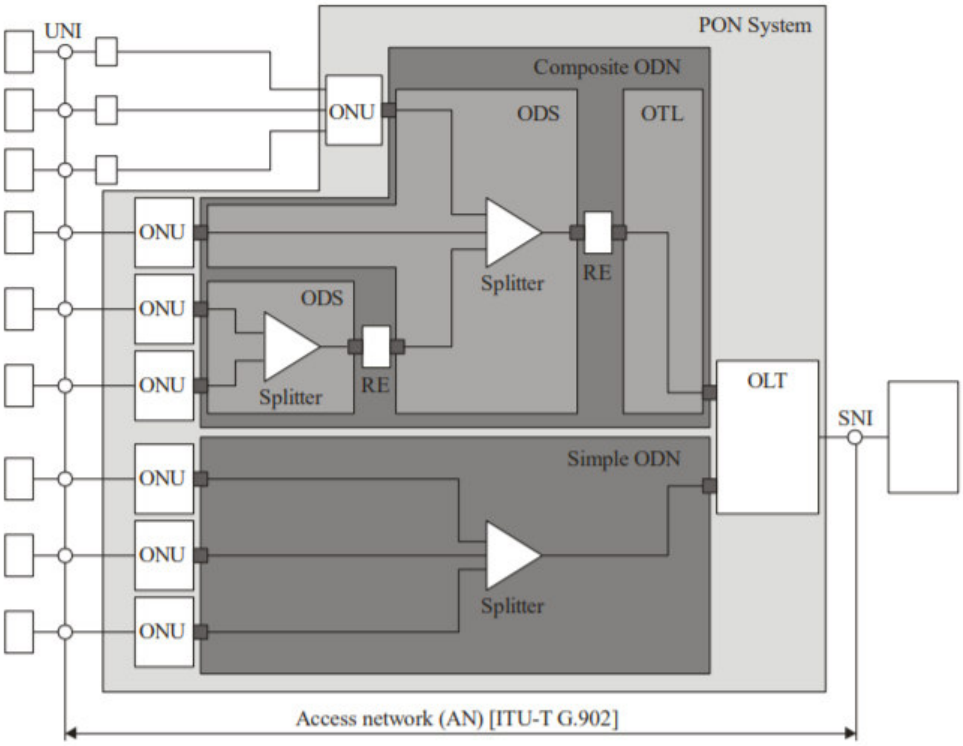

Figura 1.22. Arquitectura de referencia genérica de XG-PON *[33]*

1.3.5.1.2 Requerimientos básicos de la capa física

- *Características de la fibra*

XG-PON utiliza fibras monomodo ITU-T G.652, las cuales también son usadas en tendidos de redes GPON, lo que demuestra características de compatibilidad con otras tecnologías

[2] ODS: Infraestructura de fibra totalmente pasiva idéntica a la ODN.
[3] RE: Dispositivo de capa física que permite aumentar la relación de división en los splitters y el alcance del enlace óptico, debido al incremento del presupuesto óptico que genera.
[4] SNI: Interfaz ubicada en la OLT que proporciona servicios de telecomunicaciones a los clientes.
[5] UNI: Interfaz ubicada en la ONU que entrega el servicio de telecomunicaciones al equipo terminal.

XPON. Además, fibras insensibles a las curvaturas definidas en la ITU-T G.657 también deben ser compatibles con XG-PON, ya que este tipo de fibras son adecuadas para la instalación en interiores.

- *Plan de longitud de onda*

En cuanto al plan de longitudes de onda se utiliza la banda O que comprende longitudes de onda entre 1260 nm y 1280 nm para el enlace de subida; y, la banda C con longitudes de onda entre 1575 nm y 1580 nm para el enlace de bajada.

- *Tasa de transmisión*

Existen dos tipos de XG-PON según su velocidad de transmisión: XG-PON1 con velocidades de transmisión asimétricas de 10 Gb/s en el enlace de bajada y 2.5 Gb/s en el enlace de subida y XG-PON2 con velocidades de transmisión simétricas de 10 Gb/s tanto en el enlace de bajada como en el enlace de subida.

- *Relación de división*

Puesto que la mayoría de las redes XPON han sido implementadas con una relación de división máxima de 1:32 y 1:64, XG-PON toma como requisito mínimo una división en los splitters de 1:64 para ser compatible con GPON, con la opción de escalabilidad a relaciones de 1:128 y 1:256 debido al interés que presentan ciertos operadores por alcanzar una división más amplia de la que ofrece GPON.

- *Alcance máximo*

XG-PON en coexistencia con GPON presenta un presupuesto óptico de clase B+ para alcanzar una distancia máxima de cobertura de 20 Km con una relación de división de 1:128, también permite alcanzar distancias de 30 Km reduciendo la relación de división a 1:64. Además, utiliza un presupuesto de potencia de clase C+ con un aumento de 4 dB al margen óptico para alcanzar una distancia de 60 Km.

En la tabla 1.2, se muestra los parámetros máximos y mínimos de atenuación para las clases de ODN mencionadas.

Tabla 1.2. Parámetros máximos y mínimos de atenuación según la clase de la ODN *[8]*

Clase	Pérdidas mínimas (dB)	Pérdidas máximas (dB)
Clase B+	13	28
Clase C+	17	32

1.3.5.1.3 Servicios

XG-PON fue concebida para brindar servicios a usuarios residenciales, comerciales y backhaul móvil[6] debido a la alta calidad de servicio, ancho de banda y velocidad de transmisión que presenta. En la tabla 1.3 se muestra los servicios más destacados que soporta XG-PON.

Tabla 1.3. Servicios soportados por XG-PON *[34]*

CATEGORIA	SERVICIO	OBSERVACIÓN
Telefonía Fija	VoIP (Voice over IP)	Transmisión de voz por Internet mediante el protocolo IP
	POTS (Plain Old Telephone Service)	Servicio telefónico tradicional
Telefonía en tiempo real	IPTV (Internet Protocol Television)	Servicio de distribución de señales de televisión, a través de conexiones dedicadas de banda ancha sobre protocolo IP
	Radiodifusión de televisión digital	Servicio de televisión digital terrestre donde la señal es transportada por superposición de video RF
Línea privada	T1	Servicio de línea arrendada (leased line) que establece comunicación entre dos puntos distintos
	E1	
Acceso a Internet	Acceso a Internet de alta velocidad	Normalmente mediante aplicación Gigabit Ethernet
Telefonía móvil	Backhaul móvil	Conexiones desde las estaciones base móviles hasta el segmento troncal de la red

[6] Backhaul móvil: Tecnología que transporta voz y datos desde las estaciones bases hacia el centro de conmutación.

CATEGORIA	SERVICIO	OBSERVACIÓN
L2 VPN[7]		Servicios de Ethernet
IP		L3 VPN[8], VoIP[9], etc.

1.3.5.2 TWDM-PON

Los miembros de la FSAN en su esfuerzo por avanzar con el proyecto de nueva generación (NG-PON) para desarrollar nuevas tecnologías con una capacidad que supere los 10 Gb/s se enfocaron en una solución que comprende una red óptica pasiva multiplexada por división de tiempo y longitud de onda (TWDM-PON, Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network), la cual fue la base para implementar la siguiente fase de las redes de nueva generación denominada NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network 2).

TWDM-PON fue adoptada por la organización FSAN como base para el desarrollo de redes NG-PON2, ya que esta tecnología permite transportar 4 longitudes de onda con capacidad XG-PON (10 Gb/s (Downlink) y 2.5 Gb/s (Uplink)); es decir, alcanza velocidades de 40 Gb/s en el enlace descendente y 10 Gb/s en el enlace ascendente, lo cual es requisito fundamental para el funcionamiento de NG-PON2.

1.3.5.2.1 Arquitectura TWDM-PON

TWDM-PON presenta una arquitectura que utiliza 4 pares de longitudes de onda con capacidad XG-PON. Además, como parte de la red se utiliza ONU sintonizables o también denominados colorless; es decir, cada ONU tiene la capacidad de ajustarse a cualquiera de los 4 pares de longitudes de onda que sostiene el sistema.

Otro aspecto notable de esta arquitectura es la utilización de multiplexores/demultiplexores WDM y amplificadores ópticos a la salida de la OLT. En cuanto a la red de distribución óptica (ODN) se mantiene totalmente pasiva al igual que otras tecnologías PON, además, el control de acceso al medio (MAC, Media Access Control) trabaja de forma similar a XG-PON, donde la OLT indica a cada ONU cómo debe enviarse el tráfico ascendente. En la figura 1.23 se muestra la arquitectura básica de TWDM-PON.

[7] L2 VPN (Layer 2 Virtual Private Network): Tecnología que utiliza la infraestructura MPLS para brindar múltiples servicios privados a través de una sola conexión.
[8] L3 VPN (Layer 3 Virtual Private Network): Tecnología que segmenta las tablas de enrutamiento y distribuye las rutas a los sitios remotos de la VPN.
[9] VoIP (Voice Over Internet): Envío de voz sobre Internet.

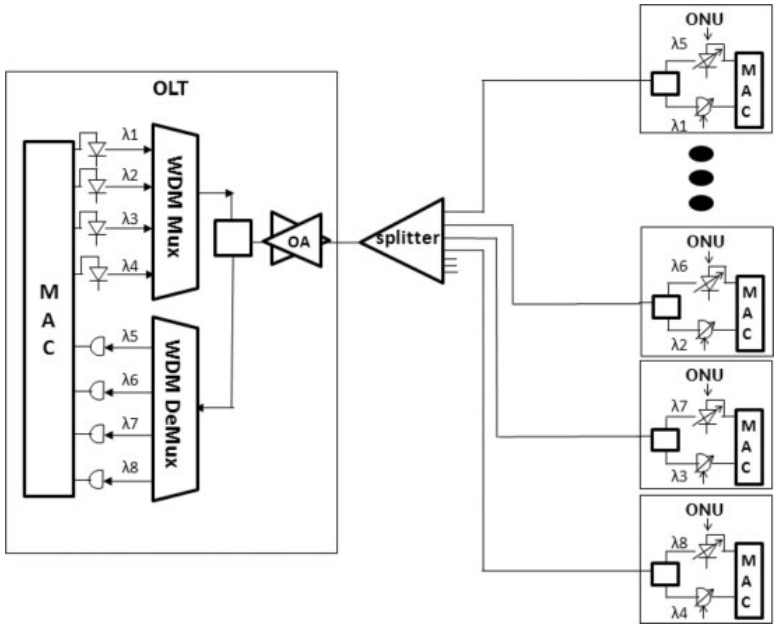

Figura 1.23. Arquitectura básica TWDM-PON *[36]*

Dentro de las especificaciones desarrolladas para TDWM-PON existe una característica atractiva para los operadores que utilizan una red compartida, dado que este sistema puede incluir hasta 8 pares de longitudes de onda, derivando en un aumento de la capacidad del sistema.

1.3.5.2.2 Plan de longitudes de onda

Para llevar a cabo el funcionamiento de TWDM-PON se plantearon 3 alternativas para el plan de longitudes de onda.

La primera alternativa consiste en la reutilización de las longitudes de onda destinadas a sistemas XG-PON, obteniendo una grilla más fina correspondiente a las bandas O y L, con aspectos positivos que permiten compatibilidad con GPON y servicios de video RF, sin embargo, condiciona la existencia de XG-PON. La figura 1.24 muestra el plan de longitudes de onda según esta alternativa.

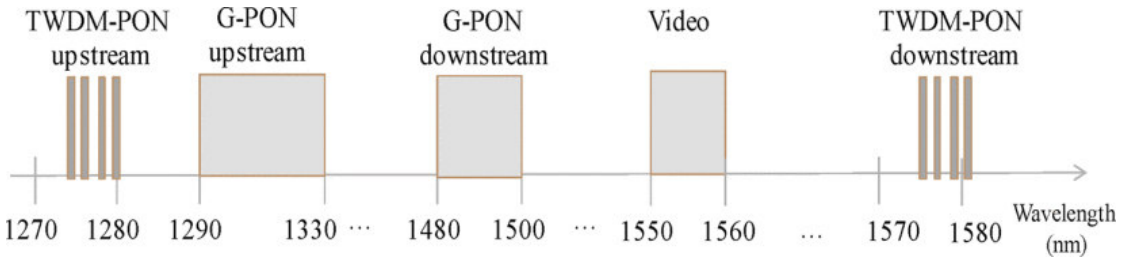

Figura 1.24. Reutilización de longitudes de onda XG-PON para sistemas TWDM-PON *[36]*

La segunda alternativa se basa en la redefinición de la banda C, con el propósito de utilizar amplificadores EDFA en los sistemas TDWM-PON. Estos amplificadores permiten obtener un mayor presupuesto de potencia y alcanzar mayores distancias en el despliegue de fibra, sin la necesidad de realizar una conversión óptico-eléctrica. Además, esta alternativa muestra compatibilidad con sistemas GPON y XG-PON, pero obstruye el servicio de video RF. En la figura 1.25 se muestra el plan de longitudes de onda de banda C para sistemas TWDM-PON.

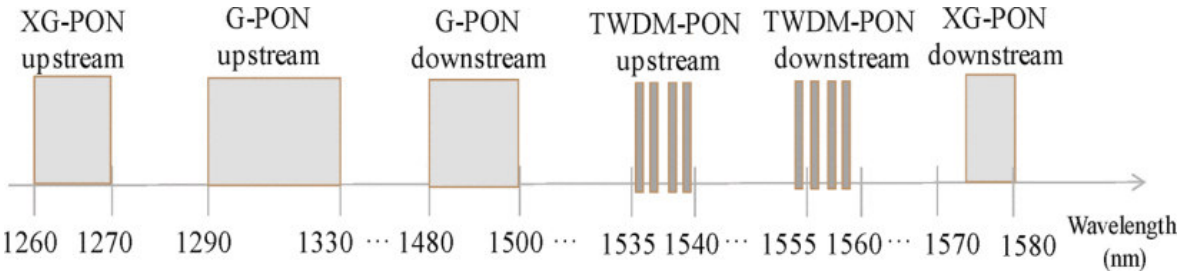

Figura 1.25. Plan de longitudes de onda de banda C para sistemas TDWM-PON *[36]*

Y la última alternativa consiste en la utilización de las longitudes de onda correspondientes a la banda L para los canales en sentido descendente y las correspondientes a la banda C para los canales en sentido ascendente. De manera que, se mantiene compatibilidad con sistemas GPON y servicios de video RF, pero se impide el funcionamiento de los sistemas XG-PON. Cabe señalar que la transmisión en sentido ascendente puede utilizar preamplificadores EDFA y en sentido descendente amplificadores EDFA de banda L con el propósito de elevar los niveles de potencia. En la figura 1.26 se observa el plan de longitudes de onda correspondientes a la banda C y L para sistemas TWDM-PON.

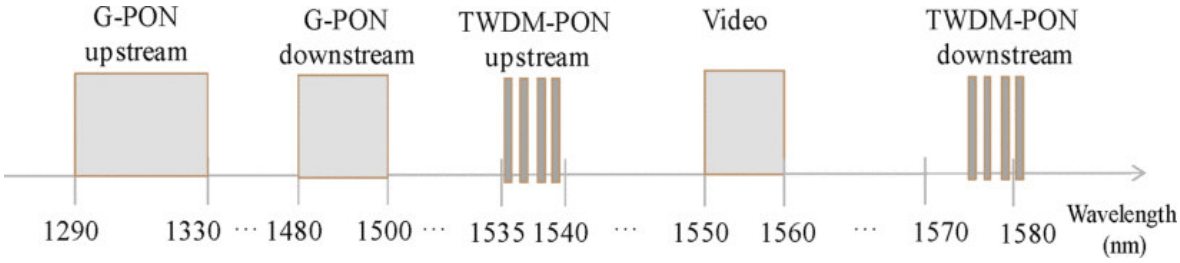

Figura 1.26. Plan de longitudes de onda de banda C y L para sistemas TWDM-PON *[36]*

1.3.5.2.3 Aplicaciones

Los sistemas TWDM-PON presentan ventajas considerables frente a otras tecnologías PON, debido a que transportan múltiples longitudes de onda sobre una misma red de distribución.

Una aplicación de los sistemas TWDM-PON es el incremento de la capacidad de la red bajo demanda, por lo tanto, este sistema puede entrar en funcionamiento a través de un solo par de longitudes de onda e ir incrementado según la necesidad del sistema. Esto facilita a los operadores expandir la capacidad de su red según la demanda de los usuarios finales y generar gastos de manera progresiva.

Otro aspecto importante de los sistemas TWDM-PON es la desagregación del bucle local (LLU, Local Loop Unbundling), ya que permite conectar varias OLT de diferentes operadores a una única red que enlaza con los usuarios finales. Para este fin se utiliza dispositivos selectivos como pueden ser un demultiplexor construido por filtros o un enrutador de guía de onda, los cuales permiten multiplexar los canales de cada operador en un solo hilo de fibra. Además, cada operador puede trabajar sobre una misma OLT bajo la asignación de recursos otorgada por un operador administrativo.

1.3.5.3 NG-PON2

Las redes NG-PON2 (Next Generation Passive Optical Network 2), corresponden a la segunda fase propuesta por el grupo de trabajo NG-PON y están estandarizadas en la recomendación UIT-T G.989. Esta recomendación mantiene características similares a las de sus tecnologías predecesoras con la finalidad de promover la compatibilidad de las ODN existentes y reducir costos de implementación. Además, dos tecnologías se han especificado para NG-PON2, TWDM-PON la cual se mencionó en la sección 1.3.5.2 como solución de un servicio compartido y PtP WDM PON (Point to Point Wavelength Division Multiplexing PON) como solución de un servicio dedicado.

En otro aspecto, esta tecnología fue concebida no solo para dar servicio a usuarios residenciales, sino que va más allá de servicios empresariales que requieren un mayor ancho de banda, y está presente en el backhaul móvil.

1.3.5.3.1 Arquitectura de red

NG-PON2 tal como GPON y XG-PON opera a través de una arquitectura punto-multipunto, incluye soporte para una arquitectura TWDM con 4 u 8 pares de longitudes de onda y capacidad de crecimiento bajo demanda; es decir, cada canal es activado según lo requiera el sistema.

- *Configuración de referencia*

La figura 1.27 muestra la arquitectura de referencia de la red NG-PON2 mediante múltiples longitudes de onda.

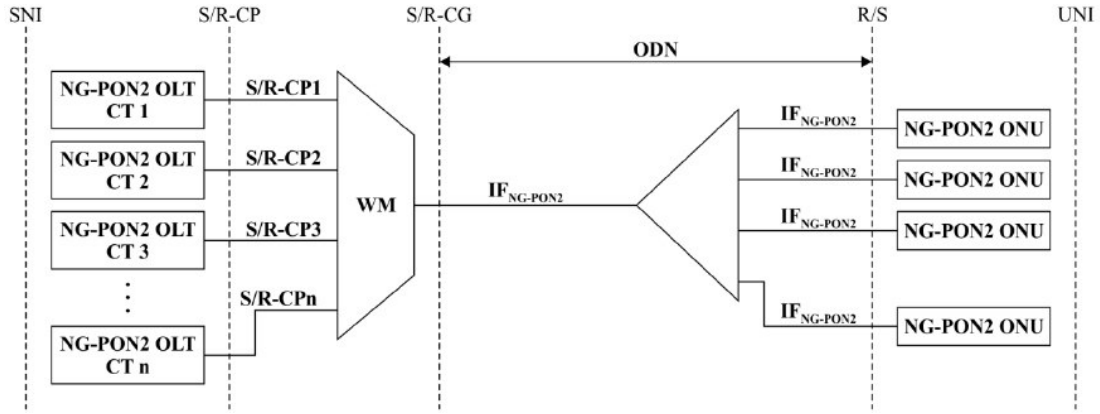

Figura 1. 27 Arquitectura de referencia NG-PON2 *[39]*

De la figura se puede detallar lo siguiente: la OLT conformada por varias terminaciones de canal (CT, Channel Termination) está conectada al multiplexor de longitud de onda (WM, Wavelength Multiplexer) a través de un par de canales denominados S/R-CP (Channel Pair). El punto de referencia S/R-CG (Channel Group) ubicado a la salida del multiplexor permite la convergencia y divergencia del conjunto de longitudes de onda tanto para el enlace descendente como ascendente respectivamente. Por lo tanto, la parte pasiva de la red correspondiente a la ODN comprende el tramo ubicado entre los puntos de referencia S/R-CG y R/S (a la entrada de la ONU). Los puntos denominados S/R y R/S son interfaces de envío y recepción de la red que hacen referencia a la OLT y ONU respectivamente. Las ONU utilizadas en el sistema son del tipo sintonizable o colorless, ya que NG-PON2 trabaja con múltiples longitudes de onda.

1.3.5.3.2 Requerimientos básicos de la capa física

- *Características de la fibra*

Como la mayoría de las redes de acceso, NG-PON2 utiliza fibra monomodo ITU-T G.652, esta fibra depende de la longitud de onda en la que trabaja. Por consiguiente, la figura 1.28 muestra la atenuación de la fibra monomodo sobre el espectro óptico, en especial se distingue que las bandas de interés C y L para sistemas NG-PON2 presentan atenuaciones bajas.

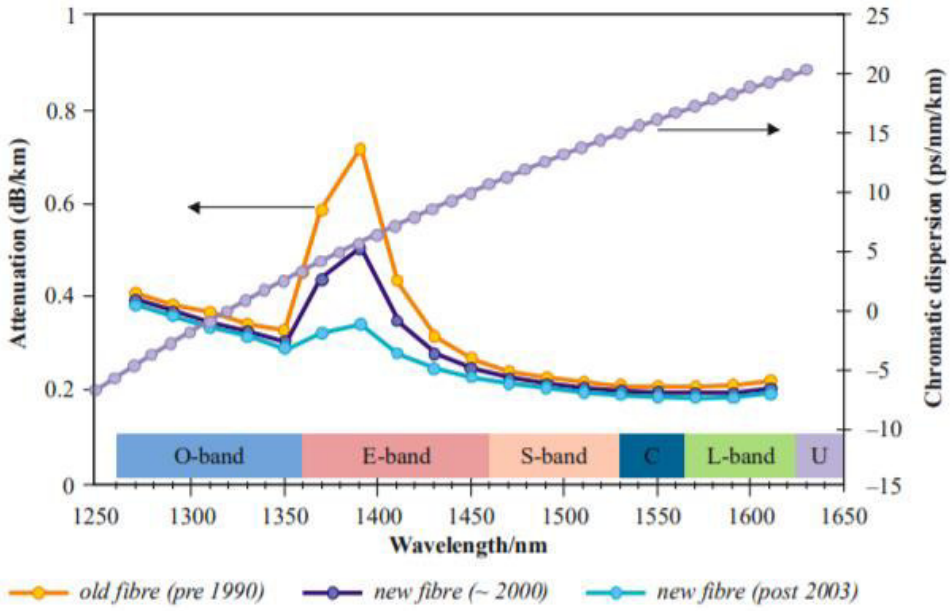

Figura 1.28. Atenuación y dispersión de la fibra monomodo ITU.T G.652 *[37]*

Así mismo, en la figura 1.28 se observa la dispersión cromática (curva en color lila) en la fibra monomodo G.652, la cual también depende de la longitud de onda y afecta a los sistemas NG-PON2 y PON heredados conforme aumenta la velocidad de transmisión sobre la fibra.

- *Capacidad (por red feeder y por usuario)*

La red feeder de los sistemas NG-PON2 soportan una velocidad mínima agregada de 40 Gb/s en el enlace de bajada y 10 Gb/s en el enlace de subida bajo una arquitectura TWDM de 4 longitudes de onda; y, puede alcanzar velocidades máximas de 80 Gb/s en el enlace de bajada y subida respectivamente bajo una arquitectura TWDM de 8 longitudes de onda. Se debe agregar que, teóricamente cada ONU tiene la capacidad de soportar una velocidad máxima de 10 Gb/s, mientras que la capacidad real depende de la relación de división máxima en los splitters y el tipo de servicio adquirido.

En cuanto a las tasas nominales descendentes y ascendentes por canal, la tabla 1.4 detalla las posibles combinaciones que puede soportar NG-PON2.

Tabla 1.4. Tasas nominales por canal de un sistema NG-PON2 *[37]*

	Descendente	**Ascendente**
Tasa nominal 1	10 Gb/s	10 Gb/s
Tasa nominal 2	10 Gb/s	2.5 Gb/s
Tasa nominal 3	2.5 Gb/s	2.5 Gb/s

- *Alcance de la fibra*

Los sistemas NG-PON2 poseen una arquitectura con una distancia de cobertura mínima de 40 Km sin extensores de alcance y una cobertura máxima de 60 Km con extensores de alcance.

- *Relación de división*

NG-PON2 debe soportar como mínimo una relación de división de 1:256, permitiendo alcanzar relaciones más altas para ciertos servicios que así lo requieran. También, se debe admitir las relaciones de división entre 1:16 y 1:128, dado que la ODN implementada para los sistemas PON heredados presenta este tipo de divisiones en los splitters. Esto con el fin de cumplir propósitos de compatibilidad con tecnologías antecesoras.

- *Plan de longitudes de onda*

La tabla 1.5 muestra el plan de longitudes de onda de NG-PON2 para arquitecturas TWDM-PON y PtP WDM PON. Este plan de longitudes de onda permite la coexistencia con sistemas GPON, XG-PON y video RF.

Tabla 1.5. Plan de longitudes de onda NG-PON2 *[39]*

<table>
<tr><th rowspan="2">Sistemas PON heredados</th><th colspan="2">TWDM PON</th><th>PtP WDM PON</th></tr>
<tr><td>Descendente</td><td>Ascendente</td><td>Ascendente/Descendente</td></tr>
<tr><td rowspan="3">XG-PON, GPON y Video RF</td><td rowspan="3">1596 nm - 1603 nm</td><td>Banda ancha: 1524 nm - 1544 nm</td><td rowspan="3">Espectro expandido: 1524 nm - 1625 nm

Espectro compartido: 1603 nm - 1625 nm</td></tr>
<tr><td>Banda reducida: 1528 nm - 1540 nm</td></tr>
<tr><td>Banda estrecha:1532 nm - 1540 nm</td></tr>
</table>

Además, en la tabla 1.6 se muestra el plan de frecuencias centrales del canal descendente asignados a sistemas TWDM-PON, debido a que el funcionamiento de redes NG-PON2 bajo una arquitectura punto-multipunto se lleva a cabo a través de esta tecnología.

Tabla 1.6. Plan de frecuencias centrales del canal descendente TWDM *[39]*

Canal	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)
λ_1	187.8	1596.34
λ_2	187.7	1597.19

Canal	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)
λ_3	187.6	1598.04
λ_4	187.5	1598.89
λ_5	187.4	1599.75
λ_6	187.3	1600.60
λ_7	187.2	1601.46
λ_8	187.1	1602.31

Cabe señalar, que los canales λ_1 a λ_4 son comúnmente asignados para el enlace descendente de sistemas TWDM que operan bajo 4 longitudes de onda, y los canales λ_5 a λ_8 pueden ser utilizados por sistemas PtP WDM o cualquier otro sistema PON, si no están reservados para incrementar la capacidad del sistema TWDM a futuro.

- *Pérdidas en el trayecto óptico según la clase de ODN*

En la tabla 1.7 se muestra las pérdidas máximas y mínimas de potencia óptica que se puede admitir según la clase de ODN, este parámetro es fundamental para superar los niveles de sensibilidad o evitar la saturación de los equipos activos de la red NG-PON2.

Tabla 1.7. Pérdidas máximas y mínimas en el trayecto óptico según la clase de ODN *[39]*

Clase	Pérdidas máximas	Pérdidas mínimas
N1	29 dB	14 dB
N2	31dB	16 dB
E1	33 dB	18 dB
E2	35 dB	20 dB

1.3.5.3.3 Servicios

Los sistemas NG-PON2 deben soportar servicios para usuarios residenciales, empresariales, backhaul móvil y otro tipo de aplicaciones garantizando mayor calidad de servicio y tasa de transmisión; así mismo, deben alcanzar niveles de retardo y fluctuación muy bajos [37].

NG-PON2 debe ofrecer los mismos servicios de sus tecnologías predecesoras como POTS y T1/E1, línea privada de alta velocidad y servicios basados en paquetes [37].

La entrega de tráfico de paquetes se la realiza aplicando técnicas de emulación y simulación. La técnica de emulación permite enviar paquetes a través de la red PON y luego transformarla al formato heredado, mientras que la técnica de simulación permite enviar paquetes mediante una conexión extremo a extremo [37].

Actualmente, los sistemas NG-PON2 son una de las soluciones más tentadoras para sustentar la exigente demanda de los servicios móviles 5G sobre todo a lo que se refiere al backhaul y fronthaul móvil[10], ya que a pesar de que los estándares GPON y XG-PON abarcan los servicios 4G, estos no son capaces de soportar la nueva tecnología celular.

1.3.6 MIGRACIÓN NG-PON2 [34] [37]

Los sistemas tales como GPON, XG-PON y 1G EPON son las tecnologías más desplegadas en el mundo, pero debido a la alta demanda por parte de los usuarios finales y el mayor ancho de banda que día a día requieren los servicios de telecomunicaciones, los sistemas PON heredados han visto comprometida su capacidad, por lo cual, NG-PON2 apareció como una solución de mayor ancho de banda y mayor número de abonados. Sin embargo, NG-PON2 debe garantizar que la infraestructura implementada por los sistemas PON heredados sobre todo en la parte de la ODN continúen operando, permitiendo una migración fluida y sin problemas tanto para operadores del sistema como para los usuarios finales.

Para lograr una migración flexible entre los sistemas PON heredados y NG-PON2 se han descrito algunos escenarios de migración, los cuales se mencionan a continuación:

1.3.6.1 Escenario de migración PON brownfield

Este escenario de migración permite la implementación de sistemas NG-PON2 sobre la infraestructura existente perteneciente a los sistemas PON heredados, debido a que ciertos usuarios que confían sus servicios en tecnologías GPON y XG-PON necesiten de un mayor ancho de banda, lo cual es recomendable trasladarlos a un sistema NG-PON2, mientras que los demás usuarios pueden mantener su sistema actual.

La migración hacia sistemas NG-PON2 se la puede realizar a corto plazo actualizando a los clientes uno a uno al mismo tiempo que los sistemas PON heredados coexisten con NG-PON2.

[10] Fronthaul móvil: Enlace que une los controladores de banda base (BBU, Baseband Unit) y las cabeceras de radio remoto (RRH, Remote Radio Head) de una red LTE (Long Term Evolution), generalmente se lo realiza a través de fibra óptica.

Los requisitos generales para llevar a cabo un escenario de migración brownfield se detalla a continuación.

- La coexistencia entre sistemas PON heredados y NG-PON2 sobre el mismo despliegue de fibra debe ser compatible incluso en la situación en la que el recurso de fibra no es abundante [37].
- Debe garantizarse un tiempo de interrupción mínimo al cliente durante el proceso de migración de sistemas PON heredados hacia NG-PON2 [37].
- NG-PON2 debe admitir la emulación de todos servicios para realizar una migración completa [37].
- Como parte de la compatibilidad con sistemas PON heredados se debe incluir: G-PON, XG-PON, GEPON y 10G EPON [37].

1.3.6.2 Escenario de migración PON greenfield

Las áreas donde no se han implementado redes PON adquieren el nombre de PON greenfield. Este escenario permite desplazar una infraestructura totalmente nueva con el propósito de obtener mayor ancho banda, mayor número de abonados, etc. Pero también facilita el reemplazo total de las redes de cobre existentes por sistemas NG-PON2. Además, este escenario ayuda a incrementar los ingresos de los proveedores, debido a que ofrece servicios con mayor capacidad sin la necesidad de requerir la coexistencia con sistemas PON heredados.

1.3.6.3 Coexistencia de sistemas PON heredados y NG-PON2

Como ya se mencionó anteriormente, la migración hacia tecnologías PON de mayor capacidad sobre la misma ODN debe garantizar al cliente una interrupción mínima del servicio. Para lo cual, la coexistencia entre sistemas PON heredados y NG-PON2 ayuda a los clientes a no percibir cortes del servicio por un largo tiempo debido a los cambios y reconfiguraciones a las que se ve sometido el sistema. Para garantizar una migración fluida, NG-PON2 deben ser compatible con sus tecnologías predecesoras, además, debe permitir la coexistencia del estándar de superposición video RF, dado que, el servicio de video es implementado conjuntamente con los sistemas PON heredados para brindar servicios triple play.

Para lograr la coexistencia entre los sistemas PON heredados y NG-PON2 se debe cumplir con dos requisitos: reutilizar las ODN existentes y operar sobre el espectro óptico no

utilizado por otros estándares. Aunque, NG-PON2 puede trabajar sobre el espectro perteneciente a otras tecnologías PON si no comparte con ellos la misma infraestructura.

Una arquitectura de referencia para la coexistencia entre sistemas PON heredados y NG-PON2 se muestra en la figura 1.29. Donde los puntos de referencia S/R y R/S son los que delimitan la extensión de la ODN y son similares para los sistemas GPON y XG-PON [37].

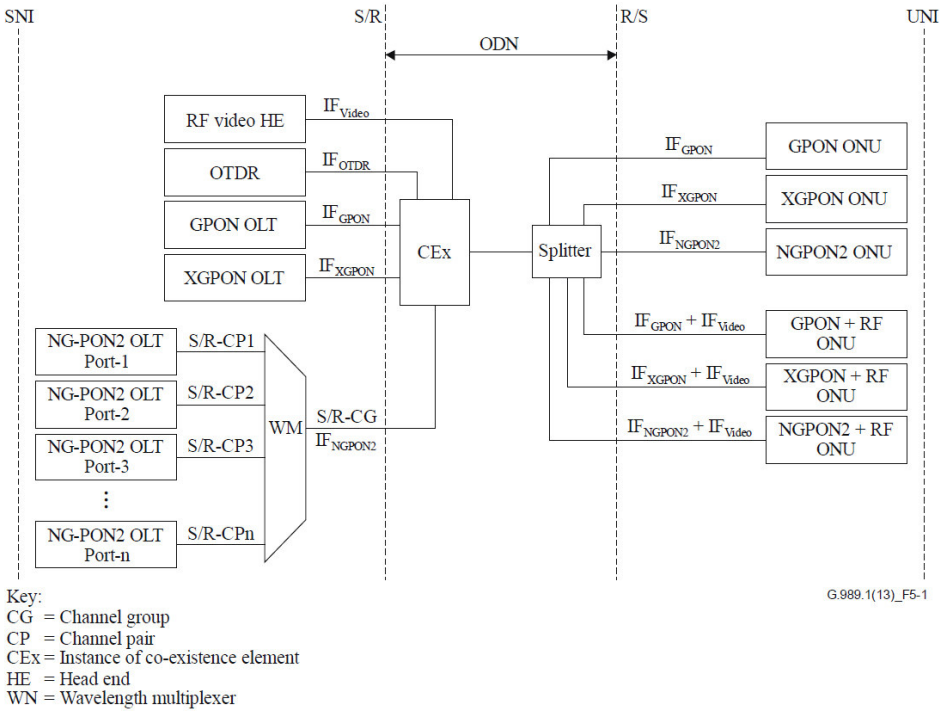

Figura 1.29. Arquitectura de referencia para la coexistencia de sistemas PON heredados y NG-PON2 *[37]*

Para que los sistemas de nueva generación mantengan compatibilidad con sus versiones anteriores, el escenario más tentativo sería mediante la reutilización de divisores ópticos de las ODN existentes y la utilización de un elemento de coexistencia (CE, Coexistence Element), el cual es un elemento bidireccional utilizado para conectar los diferentes sistemas PON sobre una ODN compartida. Este elemento de coexistencia puede ser un WDM1r o un splitter adicional. El WDM1r multiplexa las longitudes de onda de las diferentes tecnologías sobre la ODN compartida, otorgando un mayor rendimiento al sistema debido a las reducidas pérdidas por inserción que este elemento genera. Por otro lado, cuando se utiliza el splitter se requieren filtros a la salida de la OLT para multiplexar las longitudes de onda. Por lo cual, la arquitectura más utilizada para la coexistencia de NG-PON2 con PON heredados es mediante el WDM1r, el cual constituye una red hibrida al trabajar con los divisores ópticos de las ODN existentes [34].

Como parte de la coexistencia entre sistemas PON heredados y NG-PON2 se debe considerar la porción del espectro óptico asignada a cada tecnología con el fin de evitar la superposición de longitudes de onda sobre la misma ODN. Para esto, la ITU-T ha estandarizado el plan de longitudes de onda compartida, que se muestra en la figura 1.30, para la coexistencia y migración hacia redes de mayor capacidad.

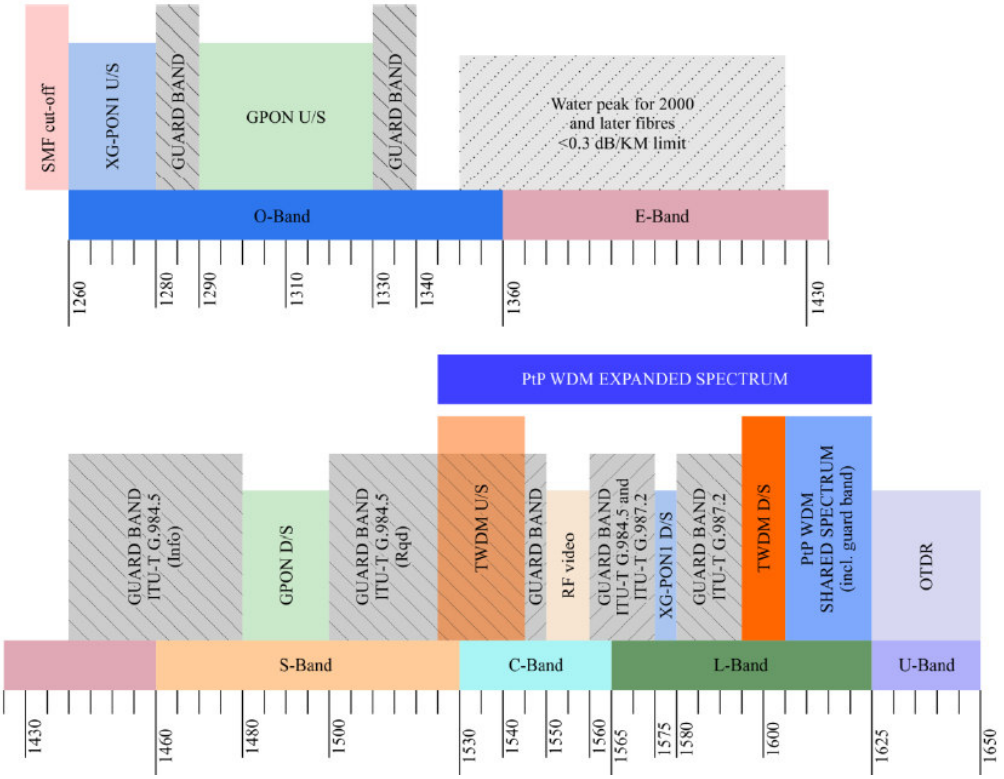

Figura 1.30. Plan de longitudes de onda para la coexistencia entre sistemas PON heredados y NG-PON2 *[39]*

1.3.6.4 Rutas de migración

Con el propósito de no interrumpir el servicio adquirido por los suscriptores pertenecientes a las distintas tecnologías PON, los sistemas NG-PON2 deben permitir a los proveedores de servicios realizar una migración bajo demanda a cada cliente. Para esto se debe ofrecer una ruta de migración de GPON a NG-PON2 y de XG-PON a NG-PON2 [34].

Para conseguir estas rutas de migración se ha especificado tres criterios que se mencionan a continuación.

- *Migración Directa*

Este tipo de migración se basa en el orden de generación PON, implementando de esta manera una migración escalonada; es decir, empieza en el estándar GPON pasa por XG-

PON y termina en NG-PON2. Cabe señalar que para migrar hacia NG-PON2 el paso de GPON a XG-PON debe estar finalizado [37].

- *Migración Flexible*

Consiste en una migración directa desde GPON hasta NG-PON2. Este tipo de migración debe garantizar la coexistencia con GPON [37].

- *Migración Integral*

La migración integral permite que los estándares GPON y XG-PON puedan actualizarse hacia sistemas NG-PON2 de manera directa y escalonada a corto plazo, como se mencionó anteriormente. Por lo cual, este tipo de migración demuestra un alto nivel de flexibilidad. Sin embargo, es la más compleja debido a las múltiples longitudes de onda que debe abarcar [37].

1.3.7 SERVICIO TRIPLE PLAY [40] [26] [41] [42] [43]

Durante varios años los proveedores de servicio de cable se han relacionado directamente con el servicio de televisión hacia al hogar y también ha servido como interfaz para los servicios de voz y datos. Pero, dado los desarrollos que han surgido en el mundo de las telecomunicaciones, cada vez es más común ofrecer múltiples servicios a través de una misma red con un mayor ancho de banda. Por lo que, los proveedores de servicios de telecomunicaciones se han enfocado en servicios triple play (voz, datos y video), lo cual explota el ancho de banda que pueden ofrecer las redes de acceso de nueva generación. Se debe agregar que, con el desarrollo de las redes de acceso de banda ancha, la aparición de IP y Ethernet simultáneamente se ha perfeccionado la entrega de voz, datos y video incluyendo IPTV, video bajo demanda, etc.

1.3.7.1 Definición

En telecomunicaciones, el término triple play hace referencia a la integración de tres servicios: voz, datos y video. A diferencia de los servicios que se entrega por enlaces separados, el triple play se lo realiza a través un solo enlace físico. Este tipo de servicio se ha convertido en una de las ofertas principales por parte de proveedores debido a los grandes ingresos que pueden proporcionar los paquetes triple play; así como también la reducción de costos y la facilidad de facturación que otorga a los clientes.

Dentro de las redes de acceso a través de fibra, los servicios triple play se han llevado a cabo a través de arquitecturas FTTx (Fiber To The X) y las pertenecientes a los estándares

XPON y NG-PON. En la figura 1.31, se muestra una arquitectura de referencia para brindar servicio triple play sobre una red óptica pasiva.

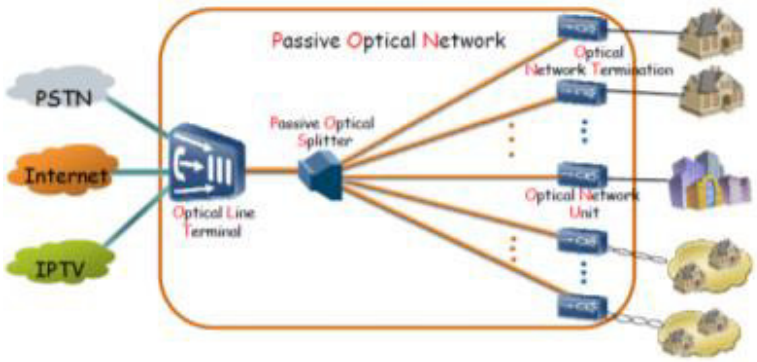

Figura 1.31. Arquitectura de referencia para brindar servicios triple play sobre PON *[44]*

1.3.7.2 Servicios Triple Play

1.3.7.2.1 VoIP

El servicio de voz que ofrece triple play opera bajo el protocolo VoIP (Voice Over Internet Protocol), el cual es un protocolo de comunicación para envío de voz sobre Internet. VoIP se diferencia de la PSTN, debido a que el audio se empaqueta con el protocolo IP y se envía a través de un sistema basado en conmutación de paquetes y no crea un canal dedicado como la red telefónica tradicional que se basa en la conmutación de circuitos.

1.3.7.2.2 Internet de alta velocidad

El envío de datos a través de una arquitectura triple play presenta la menor prioridad de transferencia en comparación con los servicios de voz y video. Sin embargo, el servicio de Internet se ha convertido en una necesidad para los planes de trabajo, comercial, académico, entre otros. Por lo que, el acceso a Internet de alta velocidad (HSI, High Speed Internet), permite a los proveedores ofrecer planes con mayor capacidad, así mismo los clientes pueden acceder a una navegación, visualización de video y descarga a altas velocidades de manera simultánea y sin problemas.

1.3.7.2.3 IPTV

Generalmente, el servicio de televisión a través de fibra se lo realiza mediante la superposición de video RF reservando la longitud de onda de 1550 nm, pero debido a ciertos problemas que ha presentado este tipo de servicio; IPTV surge como una solución

para transportar la señal de TV en paquetes IP utilizando la misma longitud de onda junto al servicio de voz y datos que también se envían sobre IP.

Uno de los parámetros más importantes que exige IPTV para su adecuado funcionamiento es el incremento de la velocidad de transmisión hacia el cliente final, la cual es fácilmente cubierta por las grandes características que ofrecen las redes de acceso ópticas [42].

2 METODOLOGÍA

2.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA PARROQUIA DE SANGOLQUÍ

Para efectuar el diseño de una red de fibra óptica se debe realizar un estudio previo de ciertas características del sector tales como: situación geográfica, aspectos demográficos, requerimientos tecnológicos, estudio de mercado, estudio de la demanda, entre otros. Los cuales nos permiten determinar el estado actual de la zona y las necesidades más importantes de la población.

2.1.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA [45] [46]

La parroquia de Sangolquí también considerada cabecera cantonal de Rumiñahui, presenta la mayor actividad comercial, económica y prestación de servicios dentro del cantón; y, está ubicada al sureste de la provincia de Pichincha cerca del cantón Quito, en las en las coordenadas geográficas 0°20′04″S 78°26′51″O.

Dentro del sector urbano de la parroquia de Sangolquí se encuentra el área de interés para el diseño de la red NG-PON2 correspondientes a las zonas de: Santa Clara, San Sebastián, Santa Rosa, San Nicolas y El Turismo, con un área de aproximada de 3.4 Km^2, como se muestra en la figura 2.1.

Figura 2.1. Área de interés para el diseño de la red NG-PON2. Fuente: Google Earth

2.1.2 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS [46] [47]

Según la última actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Rumiñahui para el período 2012 – 2025 se tiene los siguientes datos demográficos más importantes a ser considerados para el presente trabajo de titulación. Se debe agregar que, los datos que se muestra a continuación se han tomado de referencia de acuerdo con las proyecciones para el año 2020 realizadas por el último censo de población y vivienda INEC 2010, debido a que no se dispone de datos actualizados.

2.1.2.1 Población

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en el año 2010, la parroquia de Sangolquí abarca la mayor concentración poblacional dentro del cantón Rumiñahui con un total de 81140 habitantes, de los cuales 6060 habitantes pertenecen al sector rural y 75080 habitantes pertenecen al sector urbano, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Distribución poblacional del cantón Rumiñahui por parroquias *[46]*

Nombre de parroquia	Área Urbana	Área Rural	Total
Sangolquí	75080	6060	81140
Cotogchoa	0	3937	3937
Rumipamba	0	775	775
Total	75080	10772	85852

2.1.2.2 Proyección poblacional

Debido a que no se dispone de datos actuales sobre el número de habitantes en la parroquia de Sangolquí, se ha tomado como referencia las proyecciones poblacionales realizadas por el INEC en el 2010, donde se muestra que el sector urbano de la parroquia de Sangolquí cuenta con una población aproximada de 102355 habitantes para el año 2020, como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Proyección Poblacional de la parroquia de Sangolquí según INEC 2010 *[46]*

Sector	2010	2014	2020	2024
Urbano	75080	87237	102355	128166
Rural	10772	11706	13078	1726
Total	85852	98943	115433	142992

2.1.2.3 Densidad poblacional

De acuerdo con la proyección poblacional para el año 2020 (102355 habitantes) y la superficie sobre la que está asentada la parroquia de Sangolquí que corresponde a 57.3 Km^2, se puede concluir que la densidad poblacional para la zona es de 1787 habitantes por kilómetro cuadrado.

2.1.2.4 Tasa de crecimiento poblacional

Con respecto a la tasa de crecimiento poblacional, tampoco se dispone de una tasa actual, por lo tanto, se ha tomado como referencia la especificada por el Censo Nacional de Población y Vivienda INEC 2010, donde la parroquia de Sangolquí presenta una tasa de crecimiento poblacional de 2.89% anual. Este dato es importante ya que permitirá realizar la proyección de la demanda para un lapso de 5 años [47].

2.1.3 ACCESO A SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES [46]

Dentro del cantón Rumiñahui se ha comprobado que existe una amplia extensión de líneas telefónicas fijas y servicio de Internet a gran escala. En la tabla 2.3 se muestra el porcentaje de acceso a Internet y líneas telefónicas fijas dentro del cantón Rumiñahui, siendo el área urbana correspondiente a la parroquia de Sangolquí, la que presenta el mayor porcentaje de servicios de telecomunicaciones.

Tabla 2.3. Porcentaje de acceso a servicios de telecomunicaciones de la parroquia de Sangolquí *[46]*

Servicio de Telecomunicaciones	Porcentaje de acceso según servicio	Observaciones
Telefonía Fija	51.6%	Concentrado en el área urbana
Acceso a Internet	90%	Disperso y no corresponde al 100% de la población

2.2 PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LA RED NG-PON2

El despliegue de una red de fibra óptica consta de tres fases para garantizar su correcto funcionamiento: planificación y diseño, construcción y certificación de la red [48].

Como parte de este Trabajo de Titulación se hace hincapié únicamente en la fase de planificación y diseño de la red, mediante el siguiente proceso: replanteo de red, estudio de mercado, proyección de la demanda y criterios de diseño.

2.2.1 REPLANTEO DE RED [48]

El replanteo de red es una de las fases más importantes dentro de la planificación y diseño de una red de fibra óptica, ya que consta de un trabajo de campo donde se recopila información acerca del número de viviendas pertenecientes a la zona, la posible trayectoria de la fibra óptica, los escenarios donde se instalarán los equipos pasivos, así como también la infraestructura desplegada por otros proveedores de telecomunicaciones, entre otros aspectos de interés.

2.2.1.1 Número de viviendas

Como parte del replanteo de red, se realiza un barrido exacto de la zona de cobertura para constatar el número de viviendas existentes mediante un conteo manual de las mismas. Luego de realizar el conteo de viviendas se comprobó que se tiene un aproximado de 3245 viviendas y 2015 establecimientos comerciales y de servicios tales como: oficinas, consultorios médicos, consultorios jurídicos, farmacias, locales de electrodomésticos, repuestos vehiculares, ferreterías, tiendas de ropa, víveres, entre otros, como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Número de viviendas y establecimientos comerciales. Fuente: El autor

Número de viviendas y establecimientos comerciales en la parroquia de Sangolquí		
Sector	**Viviendas**	**Establecimientos Comerciales**
Santa Clara	203	173
El Turismo	793	753
San Sebastián	924	771
Santa Rosa	1179	272
San Nicolás	146	46
Total	3245	2015

Es importante mencionar, que al multiplicar la densidad poblacional (1787 habitantes) por el área de cobertura de la red NG-PON2 (3.4 Km^2), se tiene aproximadamente un total de 6076 habitantes.

También, se debe destacar que según los datos estadísticos del censo del 2010 en cada hogar de la parroquia de Sangolquí se tiene una cantidad de 3.64 personas en promedio.

Por lo tanto, al dividir el total de habitantes (6076) para la cantidad de personas por hogar (3.64), se tiene un aproximado de 1670 viviendas u hogares, lo cual presenta una inconsistencia con el número de viviendas que se obtuvo en el replanteo de red. Esto sucede debido a que los datos demográficos son tomados de las proyecciones realizadas por el INEC en el año 2010 y no de datos actualizados, por lo tanto, para el presente trabajo de titulación se trabajará con los datos del replanteo de red, ya que son datos verdaderos obtenidos en el trabajo de campo.

Además, dentro de la parroquia de Sangolquí converge la zona turística y comercial más grande del cantón Rumiñahui, por lo tanto, cuenta con entidades educativas, turísticas, comerciales, financieras, etc., las cuales exigen una alta demanda fundamentalmente del servicio de Internet para el cumplimiento de sus actividades diarias.

En la tabla 2.5, se detalla los sitios de interés más sobresalientes dentro del área de cobertura de la red NG-PON2.

Tabla 2.5. Sitios de interés de la parroquia de Sangolquí. Fuente: El autor

SITIOS DE INTERÉS EN SANGOLQUÍ	
ENTIDADES FINANCIERAS	Cooperativa Ilaló Banco Solidario Cooperativa Rumiñahui Cooperativa De Ahorro Y Crédito Sac Alianza Del Valle Cooperativa Tulcán Banco Pichincha Cooperativa Salinas Luz Del Valle Cooperativa De Ahorro Y Crédito Servipagos
INSTITUCIONES EDUCATIVAS	Universidad De Las Fuerzas Armadas | Espe Unidad Educativa Henry Dunant Colegio Santana Unidad Educativa Carlos Larco Hidalgo Unidad Educativa Juan Montalvo Unidad Educativa Rumiñahui Unidad Educativa Darío Figueroa

SITIOS DE INTERÉS EN SANGOLQUÍ	
	Escuela Mixta Dr. Carlos Cadena Instituto Técnico Del Valle
CENTROS DE SALUD	Hospital Básico Sangolquí Centro de Salud de Sangolquí Clínica San Francisco Nova Clínica
CENTROS COMERCIALES	San Luis Shopping Hipermarket River Mall C.C Tinara
LOCALES COMERCIALES	Gran Akí Akí Tía Espinosa Autos Multimaderas Maxitec Martinizing KFC Picantería Dieguito
FÁBRICAS	FabrilFame S.A. Securit S.A Oxidilumin in Vidrio Disensa Aserradero San Jorge Sicomelec Metal Cast Hispanamur Muebleart
OTRAS INSTITUCIONES	Academia de Guerra del Ejercito GADM Rumiñahui Unidad Policial San Sebastián Unidad policial Santa Rosa CNT Gasolinera Terpel

SITIOS DE INTERÉS EN SANGOLQUÍ	
	Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social | IESS Sangolquí

Pero, se debe tener en cuenta que, dentro de la parroquia de Sangolquí conviven varias empresas de telecomunicaciones, las cuales comparten clientes dentro de la misma zona ofreciendo los mismos servicios; por lo cual, es necesario realizar un estudio de mercado para determinar el número exacto de clientes potenciales y evitar un sobredimensionamiento en el diseño de la red.

2.2.1.2 Zonificación

La zonificación es la división en subáreas de las viviendas donde se desplegará la red de fibra, la etapa de zonificación no sigue ningún proceso específico; por lo cual, se ha realizado este proceso de acuerdo con el criterio del autor. De esta manera, el área de cobertura total se ha dividido en 3 zonas en función de la concentración poblacional y comercial. En la figura 2.2 se muestra la zonificación del área de cobertura de la red NG-PON2.

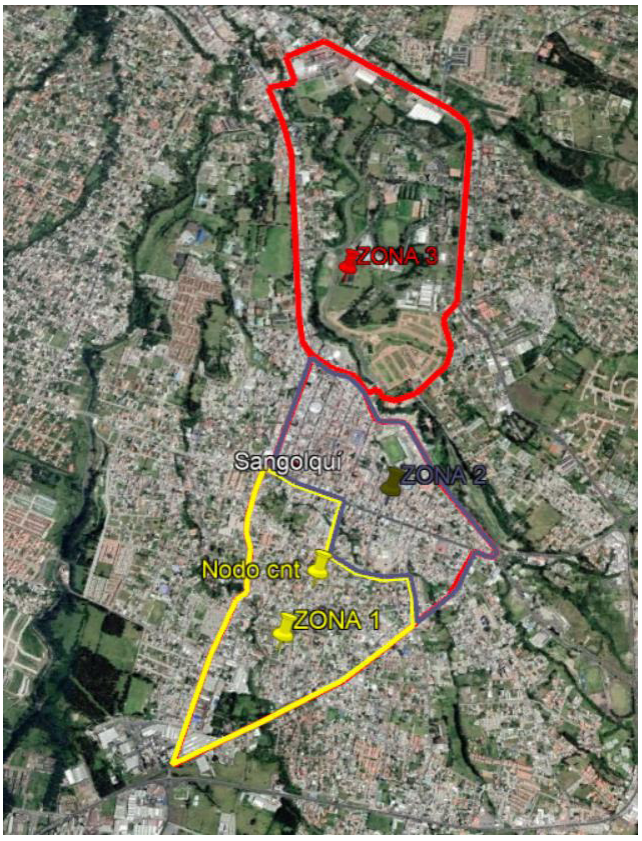

Figura 2.2. Zonificación del área de cobertura de la red NG-PON2. Fuente: El autor

La zona 1 corresponde a los sectores de Santa Rosa y San Nicolás, lugares en los cuales se asienta una zona ampliamente residencial, además, el sector de San Nicolás acoge el parque industrial más grande del cantón Rumiñahui, ya que, en esta zona están las principales industrias dedicadas específicamente a elaborar materias primas y productos alimenticios, las mismas que se mencionó en la tabla 2.5.

La zona 2 corresponde a los sectores de San Sebastián y el Turismo, donde se asienta la zona comercial más grande del cantón Rumiñahui; así como también, se concentra un nivel poblacional muy alto.

Por último, la zona 3 está delimitada por el sector de Santa Clara, lugar que actualmente presenta un nivel poblacional y comercial más pequeño con respecto a las dos zonas mencionadas anteriormente, ya que dentro del sector se lleva a cabo la construcción de recientes y modernos proyectos residenciales, los mismos que a futuro cubrirán una gran parte del área de interés del diseño de la red NG-PON2.

Después de realizar la zonificación del área de cobertura se identificó que para la zona 1 se tiene un total de 1325 viviendas y 318 locales comerciales, para la zona 2 un total de 1717 viviendas y 1524 locales comerciales; y, para la zona 3 un total de 203 viviendas y 173 locales comerciales, como se muestra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Zonificación del área de cobertura de la red NG-PON2. Fuente: El autor

Zonificación del área de cobertura (Sangolquí)		
Zonas	**Número de viviendas**	**Número de Locales Comerciales**
Zona 1	1325	318
Zona 2	1717	1524
Zona 3	203	173
Total	3245	2015

2.2.1.3 Proveedores de telecomunicaciones en el sector

Parte del replanteo de red, es observar la infraestructura desplegada por los distintos proveedores de telecomunicaciones dentro del sector mediante un estudio fotográfico de los equipos pasivos y el recorrido de cable óptico perteneciente a cada proveedor. Además, esto permite identificar las zonas que se encuentran totalmente saturadas por los equipos pasivos de los distintos proveedores y de esta manera evitar colapsar la infraestructura perteneciente al sector público, ya que normalmente los postes de alumbrado público son los más afectados por el despliegue de redes de telecomunicaciones guiadas. En la tabla

2.7 se muestra la infraestructura de fibra desplegada por algunos de los proveedores del sector tales como: CNT EP, Netlife y Claro, los cuales se evidenciaron durante el proceso de conteo de viviendas.

Tabla 2.7. Infraestructura de los diferentes proveedores de Telecomunicaciones en Sangolquí. Fuente: El autor

Proveedores de Servicios Telecomunicaciones en Sangolquí		
CNT EP		
Netlife		
Claro		

2.2.2 ESTUDIO DE MERCADO [49] [50] [51] [52]

2.2.2.1 Participación del mercado de telecomunicaciones según el servicio prestado

La información que se presenta a continuación hace hincapié a la participación de mercado de las diferentes empresas proveedoras de telecomunicaciones, la misma que ha sido actualizada para el tercer trimestre del año 2020 según el ARCOTEL. Esto con el objetivo de identificar las empresas que predominan en el sector de telecomunicaciones según el tipo de servicio prestado. Para el interés de este trabajo de titulación se ha filtrado la información correspondiente a los servicios que forman parte del paquete triple play: telefonía fija, acceso a Internet y televisión por suscripción.

2.2.2.1.1 Telefonía fija

La telefonía fija presenta un índice de penetración del 12.02 % a nivel nacional y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT EP) es la que domina ampliamente el mercado, proporcionando el 83.05 % de líneas activas, como se muestra en la figura 2.3 [49].

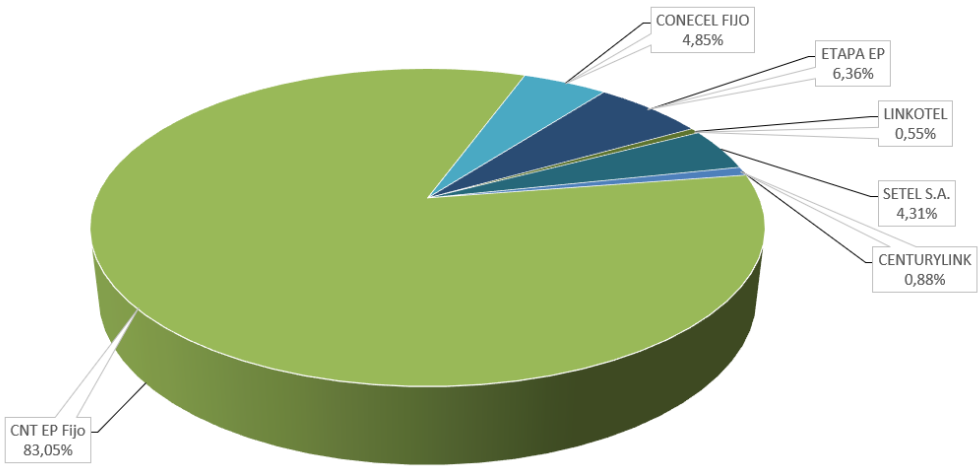

Figura 2.3. Participación de Mercado del servicio de telefonía fija *[49]*

2.2.2.1.2 Acceso a Internet

El servicio de acceso a Internet presenta la mayor demanda por parte de los usuarios finales, ya que la población en general puede acceder a educación, trabajo, salud, etc., a través de este servicio. Para el tercer trimestre del año 2020 el 12.85% de la población total del país cuenta con el servicio de Internet y nuevamente la empresa CNT EP es la que

presenta la mayor participación de mercado con un 39.46 % de cuentas, seguido de Megadatos (Netlife) con un 18.60 % de cuentas, Setel S.A. (Grupo TV Cable) con un 11.25 % de cuentas y Conecel S.A. (Claro) con un 11.19 % de cuentas; siendo esto lo más relevante, como se muestra en la figura 2.4 [52].

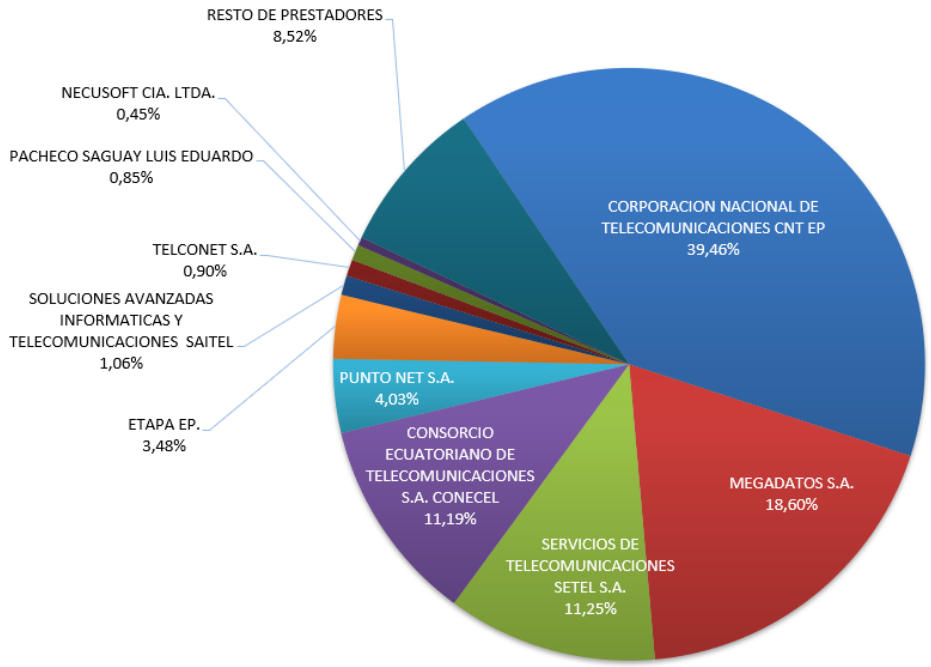

Figura 2.4. Participación de Mercado del servicio de acceso a Internet *[50]*

Además, es importante mencionar que según los datos de la última actualización del boletín estadístico N° 2020-01 del ARCOTEL, el servicio de acceso a Internet fijo a través de fibra óptica se ha incrementado considerablemente, de tal manera que el 37.03% de abonados de Internet fijo reciben el servicio a través de fibra óptica, seguido de las tecnologías de par trenzado, cable coaxial y medios inalámbricos con el 33.65%, 21.89 % y 7.43 % respectivamente, como se muestra en la figura 2.5. Así que las conexiones a través de fibra óptica comienzan a liderar el mercado de las telecomunicaciones, debido a las grandes ventajas que presentan frente a otras tecnologías [52].

Figura 2.5. Participación de mercado del servicio de Internet fijo por tecnologías *[52]*

2.2.2.1.3 Televisión por suscripción

Con respecto a la televisión por suscripción, el índice de penetración a nivel nacional es del 20.62 %; siendo DIRECTV la empresa que presenta la mayor participación de mercado con el 38.83 % de suscriptores, también la empresa estatal CNT EP compite ampliamente por este mercado con el 26.49 % de suscriptores, los sistemas locales[11] con un 16.93 % de suscriptores y el resto de los proveedores comparten el 17.75 % de suscriptores, como se muestra en la figura 2.6. Cabe señalar que las tecnologías de acceso más utilizadas para este servicio son satelitales y por cable [52].

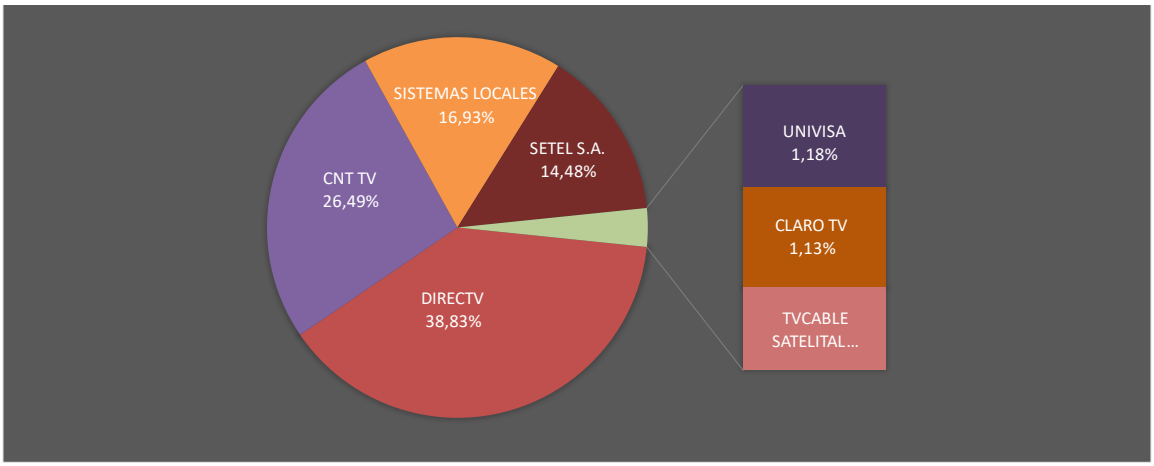

Figura 2.6. Participación de Mercado del servicio de televisión por suscripción *[51]*

2.2.2.2 Planes de servicios de telecomunicaciones

Los planes de telecomunicaciones que se describen a continuación corresponden a las empresas que lideran el mercado según el tipo de servicio prestado que se mencionó en la sección 2.2.2.1.

2.2.2.2.1 CNT EP

La empresa estatal CNT EP brinda servicios de telefonía fija, acceso a Internet y televisión por suscripción por separado, ofreciendo los siguientes planes:

En la tabla 2.8 se muestra los planes correspondientes al servicio de telefonía fija

[11] Sistemas locales: Proveedores de servicios de audio y video a nivel de parroquia, ciudad o cantón.

Tabla 2.8. Planes de telefonía fija del proveedor CNT EP *[53]*

Plan	Tarifa Mensual (precio Final)	Costo de Inscripción (Precio Final)	Beneficios
Hogar Total CNT (Cobre/VDSL/Fibra óptica)	$8.95	$67.20	Llamadas ilimitadas a fijos y móviles CNT
Telefonía Hogar (Cobre/GPON)	$6.94	$67,20	150 minutos CNT
Telefonía Hogar (Línea GPON only)	$17.92	$67.20	200 minutos CNT fijos y 50 minutos cualquier operadora fijos.
Plan Discapacidades (Cobre/GPON)	$3.36	$0.00	Tarifas especiales para personas con discapacidad, incluye 375 minutos CNT
Llamadas Locales y Nacionales (Cobre)	$6.94	$67.20	150 minutos a fijos CNT
Centrex Residencial (Cobre y GPON)	$1.68	$67.20	Permite asociar líneas de conjuntos o edificios para hablar ilimitadamente sin costo entre extensiones

En la tabla 2.9 se muestra los planes correspondientes al servicio de Internet.

Tabla 2.9. Planes del servicio de acceso a Internet del proveedor CNT EP *[54]*

Plan	Tarifa mensual (Precio Final)	Costo de instalación (Precio Final)	Beneficios
Banda Ancha Hogar (Cobre)	$23.41	$60.00	Uplink: 1 Mb/s Downlink: 5Mb/s
	$27.89	$60.00	Uplink: 1 Mb/s Downlink:10 Mb/s
	$33.49	$60.00	Uplink: 1 Mb/s Downlink:15 Mb/s
	$27.89	$0.00	20 Mb/s simétricos

Plan	Tarifa mensual (Precio Final)	Costo de instalación (Precio Final)	Beneficios
Fibra Óptica Hogares	$39.90	$0.00	40 Mb/s simétricos
	$64.90	$0.00	100 Mb/s simétricos

En la tabla 2.10 se muestra los planes correspondientes al servicio de televisión por suscripción.

Tabla 2.10. Planes del servicio de televisión por suscripción del proveedor CNT EP *[55]*

Plan	Tarifa Mensual (Precio Final)	Beneficios
Paquete SD	$26.40	71 canales (61 SD + 10 audio)
Paquete HD	$36.71	101 canales (30 HD + 61 SD + 10 audio)
Paquete Premium (Premium Fox / Premium HBO)	$12.88	9 canales Premium Fox (8 SD +1 HD) o 8 canales Premium HBO
Paquete Total Plus	$12.88	29 canales internacionales de variedad y entretenimiento

2.2.2.2.2 Megadatos (Netlife)

Megadatos conocida de forma comercial como Netlife, es una empresa proveedora del servicio de Internet a través de fibra óptica, que ofrece planes para el hogar y empresariales que se describen en la tabla 2.11 y 2.12 respectivamente.

Tabla 2.11. Planes del servicio de Internet para el hogar del proveedor Netlife *[56]*

Plan	Tarifa Mensual (no incluye IVA)	Costo de instalación (no incluye IVA)	Beneficios
Starter Defense	$29.20	$100	60 Mb/s
Geek Defense	$31.99	$100	75 Mb/s
Fusion Defense	$38.00	$100	100 Mb/s
Xtreme Defense	$79.99	$100	200 Mb/s
Ultra Xtreme Defense	$200.00	$100	1 Gb/s

Tabla 2.12. Planes del servicio de Internet para empresas del proveedor Netlife *[57]*

Plan	Tarifa Mensual (no incluye IVA)	Costo de instalación (no incluye IVA)	Beneficios
Pyme Emprendedor Defense	$39.99	$100	20 Mb/s
Pyme Productivo Defense	$65.00	$100	50 Mb/s
Pyme Digital Defense	$99.00	$100	75 Mb/s
Pyme Exponencial Defense	$130.00	$100	100 Mb/s

2.2.2.2.3 Directv

DIRECTV es una empresa que ofrece el servicio de audio y video por suscripción a través del sistema de televisión satelital, ofreciendo los planes que se describen en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Planes del servicio de audio y video por suscripción del proveedor Directv *[58]*

Plan	Tarifa Mensual	Beneficios
Bronce HD	$29.00	157 canales (73 SD, 51 HD y 33 audio)
Plata HD	$34.00	188 canales (95 SD, 60 HD y 33 audio)
Oro HD	$39.00	230 canales (119 SD, 78 HD y 33 audio)
Oro HD Grabador	$49.00	229 canales (119 SD, 78 HD y 33 audio) graba, pausa y retrocede en vivo.
Platino Plus 4K	$85.00	259 canales (1 4K, 135 SD, 90 HD y 33 audio)

2.2.2.2.4 Conecel S.A.

Conecel S.A. conocida como Claro es una empresa dedicada específicamente a brindar servicios para dispositivos móviles, pero en la actualidad ofrece planes de servicio de acceso a Internet para el hogar y negocios a través de fibra óptica con tecnología GPON, los cuales se describen en la tabla 2.14 y 2,15 respectivamente.

Tabla 2.14. Planes del servicio de acceso a Internet para el hogar del proveedor CONECEL S.A. *[59]*

Plan	Tarifa Mensual (Precio Final)	Beneficios
Mi Claro 25 Megas GPON	$22.40	25 Mb/s simétricos
Mi Claro 50 Megas GPON	$29.12	50 Mb/s simétricos
Mi Claro 100 Megas GPON	$56.00	100 Mb/s simétricos
Mi Claro 200 Megas GPON	$78.40	200 Mb/s simétricos
3 play	$65.00	**Telefonía** Llamadas ilimitadas a todas operadoras fijas y móviles **Internet** Downlink: 50Mb/s Uplink: 10 Mb/s **Televisión** 50 canales de audio, 79 HD y 115 SD.

Tabla 2.15. Planes del servicio de acceso a Internet para negocios del proveedor CONECEL S.A. *[60]*

Plan	Tarifa Mensual (Precio Final)	Beneficios
Internet 25 Megas Negocio GPON	$20.00	25 Mb/s simétricos
Internet 60 Megas Negocio GPON	$28.00	60 Mb/s simétricos
Internet 100 Megas Negocio GPON	$50.00	100 Mb/s simétricos
Internet 200 Megas Negocio GPON	$75.00	200 Mb/s simétricos

2.2.2.2.5 Fibramax

La empresa Fibramax provee servicios de Internet a través de fibra óptica y a pesar de no formar parte de las empresas que lideran el mercado a nivel nacional, debido a que su participación en el mercado no es tan antigua, presenta un considerable despliegue de fibra óptica dentro de la parroquia de Sangolquí, lugar en el cual se desarrolla el diseño de la red NG-PON2 correspondiente al presente trabajo de titulación. Por tal motivo, es importante detallar los planes correspondientes a esta empresa, los cuales se mencionan en la tabla 2.16.

Tabla 2.16. Planes del servicio de acceso a Internet para el hogar del proveedor Fibramax *[61]*

Plan	Tarifa Mensual (Precio Final)	Beneficio
Plan Standard	$25.00	60 Mb/s simétricos
Plan Professional	$35.00	80 Mb/s simétricos
Plan Expert	$45.00	100 Mb/s simétricos

2.2.3 ESTUDIO DE LA DEMANDA

Para realizar el estudio de la demanda se tomará como referencia datos correspondientes a la empresa pública CNT EP, ya que es la empresa que presenta la mayor prestación de servicios de telecomunicaciones a nivel nacional.

2.2.3.1 Clientes potenciales

Según los datos estadísticos mencionados en la sección 2.1.3, la parroquia de Sangolquí específicamente en el sector urbano presenta un gran número de usuarios que poseen servicios de telecomunicaciones tales como: telefonía fija y servicio de Internet de banda ancha. De lo cual, se concluye que puede existir una gran aceptación por parte de los usuarios finales en adquirir el servicio Triple Play que se considera en el presente trabajo de titulación de cara al futuro.

Por lo tanto, de acuerdo con el número de viviendas (3245) y establecimientos comerciales (2015) que se obtuvo en la fase de replanteo de red, se procede a realizar el cálculo del posible número de clientes potenciales de la red NG-PON2. Para lo cual, se ha dividido a los clientes en residenciales y comerciales, debido a los índices de penetración que rige a cada uno. Además, con fines de diseño se ha tomado en cuenta únicamente los índices de penetración del servicio de Internet, ya que en la actualidad es el servicio más demandado.

Para el sector residencial se ha determinado que existe un total de 3245 viviendas, por lo tanto, al multiplicar esta cifra por el porcentaje de acceso a Internet del Cantón Rumiñahui que es del 90 % como se muestra en la tabla 2.3, se estima que aproximadamente 2921 clientes residenciales poseen el servicio de acceso a Internet, como se muestra en la tabla 2.17.

Tabla 2.17. Número estimado de clientes residenciales con acceso a Internet. Fuente: El autor

CLIENTES RESIDENCIALES CON ACCESO A INTERNET			
Zonas	**Número de viviendas**	**Porcentaje acceso a Internet**	**Clientes que acceden al servicio de Internet**
Zona 1	1325	90%	**1193**
Zona 2	1717	90%	**1545**
Zona 3	203	90%	**183**
Total	3245	90%	**2921**

Pero, se debe tener en cuenta que dentro del área de cobertura existe el despliegue de infraestructura de varias empresas de telecomunicaciones dedicadas a brindar el mismo servicio, por lo que, para evitar un sobredimensionamiento de la red se ha tomado en cuenta el índice de penetración del servicio de Internet de la empresa CNT EP, que según el ARCOTEL es del 39.46%. Por lo tanto, al multiplicar este índice por los 2921 clientes con acceso a Internet, se tiene un total estimado de 1153 clientes residenciales potenciales para el diseño de la red NG-PON2, como se muestra en la tabla 2.18.

Tabla 2.18. Número de clientes potenciales para el diseño de la red NG-PON2. Fuente: El autor

CLIENTES RESIDENCIALES PARA EL DISEÑO DE LA RED NG-PON2			
Zonas	**Número de viviendas**	**Porcentaje acceso a Internet**	**Clientes residenciales potenciales**
Zona 1	1193	39.46%	**471**
Zona 2	1545	39.46%	**610**
Zona 3	183	39.46%	**72**
Total	2921	39.46%	**1153**

Es importante señalar, que dentro de los clientes potenciales no se ha considerado aquellos que tienen contratado el mismo servicio con otros proveedores de telecomunicaciones pero que no están satisfechos, así como tampoco se ha considerado aquellos que aún no tienen contratado este tipo de servicio, ya que el estudio de demanda se llevó a cabo en base al índice de penetración de acceso a Internet de la CNT EP y no en base a encuestas, razón por la cual no es posible comprobar la insatisfacción de los clientes finales con otros proveedores o el interés de querer contratar los servicios que se consideran en el presente trabajo de titulación por parte de los clientes que aún no cuentan con este tipo de servicio.

Además, dentro del cantón Rumiñahui, la mayor parte de la población está dedica a actividades de comercio y servicios, por lo que, del total de establecimientos el 46.86% está relacionada con el comercio, el 41.19% con servicios y el resto se dedica a actividades de manufactura y artesanías. Por lo tanto, aplicando estos porcentajes a los 2015 establecimientos que se obtuvo en el replanteo de red, se tiene que aproximadamente 945 establecimientos son de comercio y 830 establecimientos de servicios.

En la tabla 2.19 se muestra el número de establecimientos dedicados al comercio dentro del área de cobertura.

Tabla 2.19. Número de establecimientos dedicados al comercio dentro del área de cobertura. Fuente: El autor

ESTABLECIMIENTOS DEDICADOS AL COMERCIO			
Zonas	**Número de establecimientos**	**Porcentaje de establecimientos dedicados al comercio**	**Establecimientos de comercio**
Zona 1	318	46.86%	**149**
Zona 2	1524	46.86%	**714**
Zona 3	173	46.86%	**82**
Total	2015	46.86%	**945**

En la tabla 2.20 se muestra el número de establecimientos dedicados a servicios dentro del área de cobertura.

T**abla 2.20.** Número de establecimientos dedicados a servicios dentro del área de cobertura. Fuente: El autor

ESTABLECIMIENTOS DEDICADOS A SERVICIOS			
Zonas	**Número de establecimientos**	**Porcentaje de establecimientos dedicados a servicios**	**Establecimientos de servicios**
Zona 1	318	41.19%	**131**
Zona 2	1524	41.19%	**628**
Zona 3	173	41.19%	**71**
Total	2015	41.19%	**830**

De lo cual, se concluye que se tiene un total de 1775 establecimientos dentro del área de cobertura, los cuales forman parte de la actividad formal que se desarrolla dentro de oficinas, consultorios, locales comerciales, etc.

En la tabla 2.21 se muestra el número total de establecimientos de tipo formal dentro del área de cobertura.

Tabla 2.21. Número de establecimientos formales dentro del área de cobertura. Fuente: El autor

ESTABLECIMIENTOS DE TIPO FORMAL			
Zonas	**Número de establecimientos de comercio**	**Número de establecimientos de servicios**	**Número total de establecimientos de tipo formal**
Zona 1	149	131	**280**
Zona 2	714	628	**1342**
Zona 3	82	71	**153**
Total	945	830	**1775**

De igual manera que para el sector residencial, el cálculo de clientes potenciales para el sector comercial se ha basado en los índices de penetración de la CNT EP. Por lo que, al aplicar el 39.46% a los 1775 establecimientos, se tiene 700 establecimientos a ser considerados dentro del diseño de la red NG-PON2, como se muestra en la tabla 2.22.

Tabla 2.22. Número de establecimientos para el diseño de la red NG-PON2. Fuente: El autor

ESTABLECIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE LA RED NG-PON2			
Zonas	**Número de establecimientos formales**	**Índice de penetración del servicio de Internet CNT EP**	**Número total de establecimientos formales**
Zona 1	280	39.46%	**110**
Zona 2	1342	39.46%	**530**
Zona 3	153	39.46%	**60**
Total	1775	39.46%	**700**

De esta manera, se puede concluir que el número de clientes tanto residenciales como comerciales es considerable, lo cual pone a prueba la gran capacidad que tienen las redes de nueva generación específicamente la tecnología NG-PON2 de la cual trata este trabajo de titulación.

2.2.3.2 Proyección de la demanda

Para calcular la proyección de la demanda se ha considerado la tasa de crecimiento poblacional anual de la parroquia de Sangolquí, la cual es de 2.89% anual según el censo de población y vivienda INEC 2010. Este porcentaje es adoptado para el presente trabajo de titulación debido a que es impredecible considerar una tasa de crecimiento exacta del número clientes que se suscriben a los diferentes servicios de telecomunicaciones dentro del sector, ya que depende de la aceptación o rechazo del servicio para parte de los clientes finales [47].

Cabe señalar que el cálculo de la proyección de la demanda se realizará para un lapso de 5 años a partir del año 2020, ya que el trabajo de campo donde se determinó el número de viviendas y establecimientos comerciales se realizó a finales del año mencionado, por lo tanto, se considera este dato como punto de partida para determinar la proyección de la demanda, la cual se lleva a cabo mediante la fórmula de la tasa de crecimiento anual acumulativa, es decir que el crecimiento se basa en el tamaño poblacional al empezar cada año. La fórmula de la tasa de crecimiento anual acumulativa en [62] es la siguiente.

$$P_t = P_o * (1 + r)^t$$

Donde:

P_t= Proyección de clientes para el lapso de 5 años (2025)

P_o= Clientes potenciales para el año 2020

r= tasa de crecimiento poblacional anual

t= tiempo estimado para la proyección de la demanda

Por lo tanto, al aplicar esta fórmula tanto a clientes residenciales (1153) como comerciales (700), se tiene:

CLIENTES RESIDENCIALES

$$P_t = 1153 * (1 + 0.0289)^5$$

$P_t =$ 1330 clientes residenciales

CLIENTES COMERCIALES

$$P_t = 700 * (1 + 0.0289)^5$$

$P_t =$ 808 clientes comerciales

Con lo que se concluye que se tendrá un total de 1330 clientes para el sector residencial y 808 clientes para el sector comercial, distribuidos por zonas como se muestra en la tabla 2.23.

Tabla 2.23. Proyección de la demanda para el diseño de la red NG-PON2. Fuente: El autor

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA						
ZONAS	**SECTOR RESIDENCIAL**			**SECTOR COMERCIAL**		
	Clientes para el año 2020	**Posibles clientes que adquieran el servicio**	**Total de clientes para el año 2025**	**Clientes para el año 2020**	**Posibles clientes que adquieran el servicio**	**Total de clientes para el año 2025**
ZONA 1	471	72	543	110	17	127
ZONA 2	610	94	704	530	82	612
ZONA 3	72	11	83	60	9	69
TOTAL	1153	177	**1330**	700	108	**808**

2.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO A CONSIDERAR [63] [64] [65]

NG-PON2 al ser un estándar nuevo que no se ha afianzado todavía de forma relevante dentro del mercado de redes PON, se le considera como una tecnología de cara al futuro para brindar soluciones a los grandes anchos de banda que día a día requieren los servicios de telecomunicaciones debido a los avances tecnológicos que estos presentan.

Además, como se mencionó en el plan de trabajo de titulación, el propósito para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo era mediante una petición de apoyo a una de las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones a través de fibra óptica, desplegadas en el sector de Sangolquí tales como: CNT, Netlife, Punto Net, Fibra Max, etc., con el fin de obtener información acerca del estudio de mercado, estudio de demanda y los criterios de diseño que manejan. Pero, dada las circunstancias que generó la pandemia del covid-19, este punto estuvo limitado, por lo que, se decidió realizar el diseño de la red NG-PON2 bajo las normativas técnicas de diseño de redes de fibra óptica establecidas por la empresa estatal CNT EP, la cual pone a disposición la documentación pertinente en su página corporativa y es utilizada como fuente de sustentación e investigación para el presente trabajo de titulación.

Dentro del área de cobertura, los clientes tanto residenciales como comerciales se encuentran agrupados, debido a que se trata de una zona totalmente urbana. Por esta razón, se ha optado por tomar una sola demanda de usuarios por zona sumando los correspondientes al sector residencial y comercial, lo que facilita en gran medida el dimensionamiento de los elementos pasivos de la ODN, este criterio es llevado a detalle en la sección 2.2.4.2.2. En la tabla 2.24 se muestra la demanda final de usuarios por zona.

Tabla 2.24. Número de usuarios finales por zona considerando el sector residencial y comercial. Fuente: El autor

DEMANDA FINAL POR ZONA			
Zonas	**Sector residencial**	**Sector Comercial**	**Demanda Final**
Zona 1	543	127	**670**
Zona 2	704	612	**1316**
Zona 3	83	69	**152**
Total	1330	808	**2138**

Se debe agregar que, dentro de la zona 3 se encuentra en constante crecimiento el proyecto residencial más grande de la parroquia de Sangolquí, la cual lleva el nombre de urbanización Santa Clara, con alrededor de 180 viviendas. Esta demanda no ha sido

considerada anteriormente en el replanteo de red, por tratarse de un proyecto a futuro, pero se considerará las reservas necesarias dentro del cálculo de los elementos pasivos de la ODN para una posible activación del servicio a futuro en esta zona. De esta manera, con el fin de evitar el sobredimensionamiento de la red, ya que existen otros proveedores de telecomunicaciones en el sector y asumiendo que las 180 viviendas requieran del servicio, se aplica el índice de penetración de acceso a Internet de la CNT EP correspondiente al 39.46%, con lo que se obtiene una posible demanda adicional de 72 clientes potenciales.

Además, como parte del funcionamiento de la red NG-PON2 se considera un sistema TWDM PON con 4 pares de longitudes de onda. Para el enlace de bajada se considera las longitudes de onda comprendidas entre 1596 nm y 1603 nm pertenecientes a la banda L, las mimas que son destinadas para la transmisión del servicio de voz y datos. Así mismo, para el enlace de subida se especifican las longitudes de onda comprendidas entre 1524 nm y 1544 nm pertenecientes a las bandas S y C para la recepción del servicio de voz y datos. Además, los sistemas NG-PON2 permiten la coexistencia con otros servicios al igual que sus tecnologías predecesoras, por lo que, se designa la longitud de onda de 1550 nm para la transmisión de video RF.

Este sistema opera bajo el tradicional enlace punto-multipunto a través de una topología en árbol como la mayoría de las redes FTTH (Fiber To The Home) implementadas por la CNT EP.

2.2.4.1 Ancho de banda requerido por los servicios triple play

La mayor ventaja que presentan las redes PON es la capacidad de ofrecer un gran ancho de banda a múltiples abonados. Esta cualidad ha sido optimizada por las redes de nueva generación, las cuales permiten albergar una mayor cantidad de abonados ofreciendo el mismo o mayor ancho de banda. Por esta razón, las redes NG-PON2 son adecuadas para brindar múltiples servicios de telecomunicaciones que requieren de un gran ancho de banda, admitiendo relaciones de división en los splitters de 32, 64, 128 y hasta 256 abonados con distancias que superan fácilmente los 20 Km de los estándares GPON y XG-PON.

La capacidad que ofrece el estándar NG-PON2 para el downlink y uplink son de 40 Gb/s y 10 Gb/s respectivamente mediante la utilización de un sistema TWDM de 4 longitudes de onda. Cada longitud de onda multiplexada transporta la capacidad equivalente al estándar XG-PON (10 Gb/s (downlink) y 2.5 Gb/s (uplink)).

Además, NG-PON2 permite incrementar la capacidad de la red bajo demanda, es decir que la red puede funcionar con un solo par de longitudes de onda e ir incrementando su capacidad según el aumento y requerimiento de los usuarios finales, lo que le atribuye grandes características de escalabilidad y flexibilidad.

En la tabla 2.25, se muestra el ancho de banda compartido hacia cada uno de los clientes finales pertenecientes a una red NG-PON2 según la relación de división de los splitters de la ODN.

Tabla 2.25. Capacidad de ancho de banda por cliente. Fuente: El autor

Sentido del enlace	**Capacidad NG-PON2 (Gb/s)**	**Capacidad por cliente (Mb/s)**			
		1:32	1:64	1:128	1:256
Enlace descendente	40	1250	625	312.5	156.25
Enlace ascendente	10	312.5	156.25	78	39

Como se puede observar en la tabla 2.25, los sistemas NG-PON2 presentan una mayor relación de división de los splitter y un ancho de banda por cliente superior en comparación con sus tecnologías predecesoras, lo cual permite abastecer sin ningún tipo de inconvenientes los servicios pertenecientes al paquete triple play (telefonía fija, Internet de alta velocidad y televisión de alta definición), los mismos que requieren una capacidad de ancho de banda específica tanto para el sector residencial como comercial.

Según, los reportes de la herramienta de análisis de velocidad de banda ancha “Speedtest Global Index”, de Ookla, la velocidad de descarga para Internet fijo en Ecuador durante los meses que se mantuvo el confinamiento producto de la pandemia del covid-19 fluctuó entre 23 y 27 Mb/s. De lo cual, se puede concluir que el servicio de acceso a Internet requiere una capacidad de ancho de banda de 30 Mb/s, para enfrentar este tipo de eventos inesperados donde la capacidad de las redes de acceso se vieron comprometidas, ya que los miembros de cada hogar (4 usuarios en promedio según el INEC) adoptaron el servicio de Internet como medio de trabajo, estudio y entretenimiento para acceder a redes sociales, reproducir videos, navegar por la web, videollamadas, videoconferencias, juegos en línea, entre otros [64].

Por lo tanto, al agregar el ancho de banda requerido por los servicios de telefonía fija y los diversos formatos de televisión digital (SDTV, HDTV, 4K), los cuales hacen parte del paquete triple play, el sector residencial requiere una capacidad total por cliente de 73.064 Mb/s como se muestra en la tabla 2.26. Este escenario es adecuado para redes de nueva

generación, ya que tiene la capacidad de brindar anchos de banda que superan los 100 Mb/s por cliente, como se muestra en la tabla 2.25.

Tabla 2.26. Capacidad de ancho de banda por servicio para el sector residencial. Fuente: El autor

Servicio	Ancho de banda requerido para el Downlink	Ancho de banda requerido para el Uplink
Telefonía digital	64 Kb/s	64 Kb/s
Internet	30 Mb/s	3 Mb/s
SDTV	3 Mb/s	----------
HDTV	15 Mb/s	----------
Televisión 4K	25 Mb/s	----------
Capacidad Total	73.064 Mb/s	3.164 Mb/s

Por otra parte, el servicio de acceso a Internet para el sector comercial requiere mayor ancho de banda, debido a que el número de usuarios dentro de un establecimiento comercial o empresarial es notablemente superior con respecto a un hogar. De esta manera, el ancho de banda que requiere un negocio o empresa se calcula en base al número de usuarios con conectividad simultánea y el tipo de tareas que realizan.

Por tanto, considerando un uso moderado del servicio de Internet para la descarga de archivos grandes, música, video en streaming, servicios en la nube, conferencias interactivas, entre otras, se requiere una capacidad de 100 Mb/s para establecimientos que cuentan con aproximadamente entre 10 y 20 empleados que hacen uso de 15 a 25 dispositivos, cabe señalar que la conexión de forma simultánea por parte de los usuarios normalmente es de un 80% y que cada uno utiliza el servicio para tareas diferentes, lo cual permite que la red esté siempre funcional y evite ralentizar la velocidad en los usuarios finales [65].

De igual manera, al agregar el ancho de banda correspondiente a los servicios de telefonía y televisión se requiere una capacidad total de 143.064 Mb/s, como se muestra en la tabla 2.27, lo cual puede ser suministrado adecuadamente por la red NG-PON2.

Tabla 2.27. Capacidad de ancho de banda por servicio para el sector comercial. Fuente: El autor

Servicio	Ancho de banda requerido para el Downlink	Ancho de banda requerido para el Uplink
Telefonía digital	64 Kb/s	64 Kb/s

Servicio	Ancho de banda requerido para el Downlink	Ancho de banda requerido para el Uplink
Internet	100 Mb/s	10 Mb/s
SDTV	3 Mb/s	----------
HDTV	15 Mb/s	----------
Televisión 4K	25 Mb/s	----------
Capacidad Total	143.064 Mb/s	10.064 Mb/s

Además, es importante mencionar que los anchos de banda establecidos anteriormente son utilizados para fines del diseño de la red NG-PON2, pero se debe tener en cuenta que la red es capaz de suministrar mayores anchos de banda dependiendo de las necesidades del cliente final.

2.2.4.2 Arquitectura de la red NG-PON2

Como se mencionó anteriormente, el diseño de la red NG-PON2 se realizará en base a las normativas técnicas de diseño de la CNT EP, por lo tanto, se puede mencionar que la empresa trabaja con dos tipos de arquitecturas que se mencionan a continuación:

2.2.4.2.1 Arquitectura centralizada

Esta arquitectura conecta los puertos del ODF de planta externa con los splitters de relación 1xn o 2xn ubicados en los armarios FDH o mangas porta splitters a través del cable de alimentación, luego las salidas de los splitters son conectadas a las cajas de distribución (NAP) a través del cable de distribución y por último los cables de dispersión unen las salidas de los NAP con las ONT en el domicilio del cliente final.

2.2.4.2.2 Arquitectura en cascada

Esta arquitectura a diferencia de la anterior utiliza dos niveles de splitter, el primer nivel de relación 1xn o 2xn ubicado dentro del armario FDH o manga porta splitter y el segundo nivel de relación 1xn dentro de las NAP. Los cables de alimentación, distribución y dispersión tienen la función de conectar la ODF de planta externa con la ONT del cliente final a través de los respectivos elementos pasivos como se mencionó en la arquitectura centralizada.

Por consiguiente, para el diseño de la red NG-PON2 se adoptará una arquitectura en cascada con 2 niveles de splitter, tal como lo especifica la CNT EP en su normativa de

diseño para las ODN que supera la relación de división de 1:32, por lo tanto, se optó por las relación de 1:8 para el primer nivel de splitter y de 1:16 para el segundo nivel de splitter, con lo que se consigue una relación total de 1:128 adecuada para brindar a cada cliente anchos de banda que superan fácilmente los 200 Mb/s, como se muestra en la tabla 2.25, ya que según los planes de servicios de telecomunicaciones analizados en la sección 2.2.2.2, se comprobó que las empresas que actualmente lideran el mercado de las telecomunicaciones en el sector ya ofrecen este tipo de ancho de banda tanto para clientes residenciales como comerciales.

Los modelos que se mencionan a continuación están estructurados bajo una arquitectura en cascada, la cual es ideal para realizar migraciones e implementarla en áreas donde se tiene un gran número de usuarios, además, brinda características de escalabilidad y gran cobertura, debido a que permite dejar puertos de reserva para una futura ampliación de la red y genera varias ramificaciones de fibra que salen de los splitters de primer y segundo nivel, permitiendo desplegar la misma distancias más largas en comparación con la arquitectura centralizada.

En la figura 2.7 se muestra el modelo masivo/ casas/ corporativo, con dos niveles de splitter, el cual es adoptado para dar servicio a los clientes tanto residenciales como comerciales de la red NG-PON2.

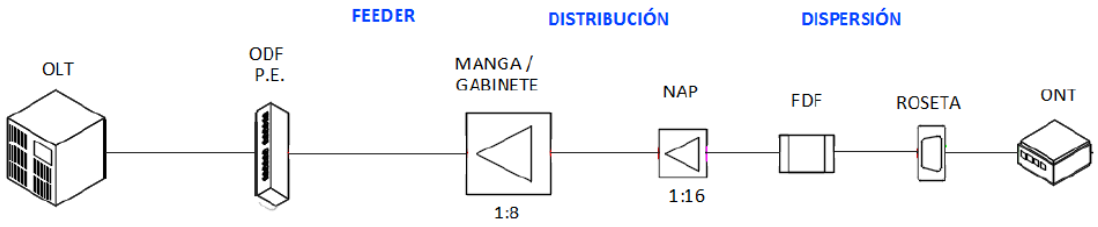

Figura 2.7. Modelo masivo / casas / corporativo con segundo nivel de splitter en la caja NAP *[63]*

También, se debe considerar el modelo masivo / casas / corporativo, con un segundo nivel de splitter en la caja de distribución principal (FDB), como se muestra en la figura 2.8. Este modelo es utilizado para dar servicio a urbanizaciones o edificios, ya que generalmente el elemento pasivo FDB es utilizado para conectar la red de distribución externa con la red de distribución interna de aquellos sitios donde se concentra una gran cantidad de usuarios finales, además, este elemento posee una mayor cantidad de puertos (24 o 48), en comparación a las cajas NAP, lo que permite administrar de mejor manera los cables de fibra que llegan a las inmediaciones de las urbanizaciones o edificios, por lo tanto, es

considerado para el posible diseño de la ODN correspondiente a la urbanización residencial Santa Clara.

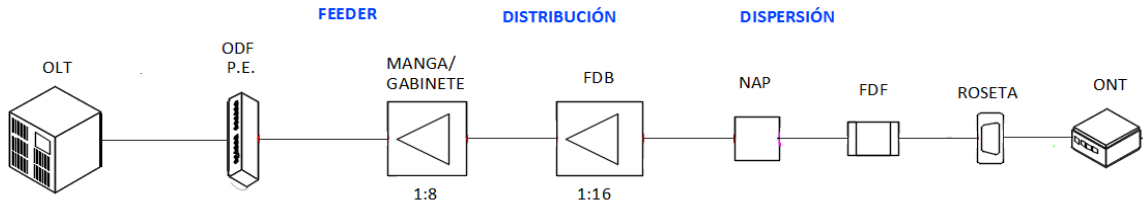

Figura 2.8. Modelo masivo / casas/ corporativo con segundo nivel de splitter en la caja FDB *[63]*

Es importante mencionar, que como parte de la OLT se debe incluir el dispositivo WM (Wavelength Multiplexer) para multiplexar las 4 longitudes de onda correspondientes a un sistema NG-PON2 y que los splitters elegidos para el diseño de la red son especificados por la CNT EP en su normativa de diseño para generar relaciones de división de 1:32 y 1:64, las cuales son utilizadas actualmente para brindar conexiones a través de fibra óptica con tecnología GPON, esta característica indica que los escenarios de compatibilidad, coexistencia y migración son aceptables entre NG-PON2 y las redes heredadas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DISEÑO DE LA RED NG-PON2

Para llevar a cabo el diseño de la red NG-PON2, se considerará el cálculo de los elementos pasivos que interconectan la OLT ubicada en la oficina central con los equipos terminales (ONU) ubicados en el domicilio del cliente final, análisis de las características generales de los equipos activos, así como también, la ubicación de los elementos pasivos dentro del área de cobertura. Además, como parte del diseño de la nueva red fibra óptica se debe garantizar que el nivel de potencia que llega a las ONU de los clientes finales sea la adecuada, por lo tanto, se elaborará el presupuesto de potencia de los casos más críticos del enlace, y finalmente se detalla el costo referencial de los elementos activos y pasivos que intervienen en el diseño de la red.

3.1.1 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PASIVOS DE LA ODN

El cálculo de los elementos pasivos de la ODN (Optical Distribution Network) se realiza en base al número de clientes proyectados para el año 2025 y se considerarán las especificaciones técnicas de las redes de fibra óptica, utilizadas por la CNT EP para la selección de los elementos pasivos que utilizan en las diferentes arquitecturas de sus redes FTTH/GPON, las cuales se adaptarán a las necesidades de la red NG-PON2.

Es necesario recalcar que, el cálculo de los elementos pasivos para las tres zonas de la red NG-PON2 se llevará a cabo mediante dos niveles de splitter, el primer nivel con una relación de 1:8 y el segundo nivel con una relación de 1:16, concluyendo en una relación de división total de 1:128 para toda la ODN.

3.1.1.1 Cajas de distribución y splitters de segundo nivel

La CNT EP especifica cajas de distribución aéreas o canalizadas con 8, 12 o 16 puertos. De modo que, para el presente diseño se utilizará cajas de distribución con capacidad de 16 puertos donde se alojará el segundo nivel de splitters con relación 1:16. En la zona 1 se cuenta con un total de 670 clientes finales, por lo que al dividir este número para las 16 salidas que tiene cada splitter se requiere un promedio de 42 cajas de distribución (NAP). En la zona 2 se tiene un total de 1316 clientes finales, lo cual se considera una cantidad de clientes muy elevada, por lo tanto, se ha decidido dividirlos en dos distritos[12] con igual

[12] Distritos: Son las zonas en que se divide una ciudad o población en función de los armarios FDH o mangas porta splitter.

cantidad de clientes, es decir 658 para cada uno, al dividir este número de clientes para las 16 salidas de cada splitter se requiere 42 cajas de distribución (NAP) por distrito. Igualmente, en la zona 3 se tiene un total de 152 clientes para lo cual se requiere 10 cajas de distribución (NAP). De esta manera, se requiere un total de 136 cajas de distribución (NAP) de 16 puertos cada una. En la tabla 3.1 se muestra el número de cajas de distribución (NAP) y splitters de segundo nivel necesarios para atender la demanda de cada zona.

Tabla 3.1. Número de cajas de distribución (NAP) y splitters de segundo nivel por zona. Fuente: El autor

Zonas	Distritos	Número de cajas de distribución (NAP)	Número de puertos por (NAP)	Número de splitters	Relación de división en los splitters
Zona 1	Distrito 1	42	16	42	1:16
Zona 2	Distrito 2	42	16	42	1:16
	Distrito 3	42	16	42	1:16
Zona 3	Distrito 4	10	16	10	1:16
Total		136	16	136	1:16

Además, la CNT EP detalla cajas FDB de 24 o 48 puertos. Por la tanto, para atender la posible demanda de los 72 clientes potenciales correspondientes a la urbanización Santa Clara se ha elegido 2 cajas FDB de 48 puertos donde se albergarán 3 splitters de segundo nivel con relación de 1:16 por caja.

Así mismo, para llevar el servicio hacia los clientes finales se requiere de cajas de distribución NAP dentro de la urbanización para realizar el sangrado de los 96 hilos de fibra que salen de las cajas FDB. Por lo tanto, se utilizarán 8 cajas NAP de 12 puertos, de lo cual se utilizará la capacidad de 72 puertos y los demás quedarán de reserva. En la tabla 3.2, se muestra el número de cajas FDB y NAP necesarios para atender la posible demanda de la urbanización Santa Clara.

Tabla 3.2. Número de cajas FDB y NAP de la urbanización Santa Clara. Fuente: El autor.

Zonas	Distritos	Número de cajas FDB de 48 puertos	Número de splitters	Relación de división en los splitters	Numero de NAP de 12 puertos
Zona 3	Distrito 4	2	6	1:16	8

3.1.1.2 Mangas porta splitter y splitters de primer nivel

La CNT EP detalla mangas de fusión porta splitter de 12, 24, 48, 96, 144 o 288 fusiones, las cuales permiten albergar un determinado número de splitters con relación 1:4 y 1:8, según se indica en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Número de splitters según la capacidad de la manga porta splitter *[63]*

	Splitter	
Manga	**Tipo**	**Cantidad**
12	1:4	1
	1:8	1
24	1:4	3
	1:8	2
48	1:4	6
	1:8	4
96	1:4	12
	1:8	10
144	1:4	18
	1:8	15
288	1:4	18
	1:8	15

Para la zona 1 se tiene un total de 42 NAP a los que debe abastecer el primer nivel de splitters, por lo tanto, al dividir la cantidad de NAP para las 8 salidas que dispone cada splitter se requiere una manga porta splitters de 96 fusiones, la cual tiene la capacidad de alojar 10 splitters con relación de 1:8, de los cuales solo se utilizará la capacidad de 6 splitters, los demás pueden ser reservado para una expansión futura de la red NG-PON2.

Para la zona 2, se especificó la existencia de dos distritos con 42 NAP cada uno, este criterio ayuda a la administración de la red, ya que se cuenta con una cantidad moderada de cajas de distribución por distrito. Por el contrario, al disponer de un solo distrito para satisfacer una gran cantidad de clientes los equipos pasivos pueden llegar a saturarse y comprometer la capacidad de todo el sistema, debido a que puede estar ocupado al 100% y no tener la capacidad suficiente para solucionar las averías de los hilos de fibra de clientes activos, incluso puede limitar las capacidades de escalabilidad propias de las redes PON al no disponer de hilos de fibra de reserva. Por lo tanto, para cada distrito se asigna una

manga porta splitters de 96 fusiones la cual albergará un total de 10 splitters con relación de división de 1:8, utilizando únicamente la capacidad para 6 splitters, y lo restante es considerado como reserva.

En la zona 3 se cuenta con una cantidad de 10 NAP, por lo tanto, al dividir esta cantidad de NAP para las 8 salidas de cada splitter se requiere una manga porta splitter de 48 fusiones, la cual tiene la capacidad de alojar 4 splitters con relación de 1:8, de los cuales se necesita únicamente la capacidad de 2 splitters, lo demás es reservado para la expansión futura de la red. Cabe señalar, que la zona 3 presenta la demanda de clientes más baja en comparación a la zona 1 y 2, incluso puede ser atendida con una manga porta splitter de 24 fusiones la cual admite incorporar 2 splitters de relación 1:8.

Así que para albergar el primer nivel de splitter de la red NG-PON2 se elige mangas de fusión porta splitters de 48 y 96 fusiones con capacidad para 4 y 10 splitters respectivamente.

En la tabla 3.4, se muestra la cantidad de mangas porta splitter y splitters de primer nivel que requiere cada zona de cobertura de la red NG-PON2.

Tabla 3.4. Número de mangas porta splitter y splitters de primer nivel por zona. Fuente: El autor

Zonas	Distritos	Número de mangas porta splitters	Número de fusiones por manga	Número de splitters	Relación de división en los splitters
Zona 1	Distrito 1	1	96	6	1:8
Zona 2	Distrito 2	1	96	6	1:8
	Distrito 3	1	96	6	1:8
Zona 3	Distrito 4	1	24	2	1:8
Total		4		20	1:8

Además, dentro de la zona 3 se tiene la posible demanda de la urbanización Santa Clara, la cual cuenta con 2 cajas FDB con capacidad para 6 splitters de segundo nivel, los cuales son totalmente atendidos por las 6 salidas de reserva de los 2 splitters calculados anteriormente.

3.1.1.3 Fibra óptica y cables de fibra óptica [66] [67] [68]

Los sistemas NG-PON2 al igual que sus tecnologías predecesoras utilizan fibra óptica monomodo del estándar ITU-T G.652 e ITU-T G.657. La fibra G.652 es utilizada comúnmente para el despliegue de redes de acceso específicamente para las redes de alimentación y distribución, dentro de este estándar se distingue 4 categorías de fibras, siendo la categoría G.652.A y G.652.B no muy utilizada debido a la atenuación que presenta en el rango de 1360 nm – 1460 nm correspondiente a la banda E, es decir en la zona water peak. Por otra parte, la categoría G.652.C y G.652.D permiten operar en un espectro más expandido acotado entre 1310 nm y 1625 nm, debido a que reducen la atenuación en la zona water peak posibilitando trabajar a mayores velocidades e incluso soportan transmisiones CWDM.

Por esto, se ha decidido elegir a la fibra G.652.D para la red alimentación y distribución, ya que además de los beneficios mencionados anteriormente este tipo de fibra presenta una baja dispersión cromática en las bandas C y L, como se muestra en la figura 1.28, las cuales son usadas por sistemas NG-PON2 para los enlaces ascendentes y descendentes respectivamente.

Con respecto a la red de dispersión comúnmente se utiliza la fibra monomodo ITU-T G.657, debido a su insensibilidad a las pérdidas por flexión, es decir, presenta bajas atenuaciones ante torsiones que sufre la fibra durante su trayecto. Esta característica permite que este tipo de fibra pueda ser utilizado en ambientes internos tales como: edificios, urbanizaciones, hogares, etc., escenarios propios de la red de dispersión. La fibra G.657 presenta dos categorías tipo A y B, siendo la de categoría A la óptima para trabajar en un rango de longitudes de onda que comprende desde 1260 nm hasta 1625 nm, lo que demuestra gran compatibilidad con la fibra G.652.D utilizada para la red de alimentación y distribución. Este tipo de fibra también presenta subcategorías correspondientes al tipo A1 y A2, siendo la subcategoría G.657.A1 elaborada para soportar un radio de curvatura mínimo de 10 mm y la subcategoría G.657.A2 para soportar un radio de curvatura mínimo de 7.5 mm, de modo que, G.657.A2 es mejor que G.657.A1 en términos de flexibilidad.

Por consiguiente, es factible considerar ambos tipos de fibra G.657.A1 y G.657.A2 como parte del diseño de la red de dispersión, ya que la elección de cada una dependerá del radio de curvatura al que esté sometida la fibra óptica al momento de realizar las correspondientes instalaciones en el domicilio del cliente final.

En la tabla 3.5, se muestra los tipos de fibra óptica asignados a cada segmento de la ODN.

Tabla 3.5. Elección de fibra óptica según los segmentos de la ODN. Fuente: El autor

Segmento de la ODN	Tipo de fibra óptica
Red de Alimentación	ITU-T G.652.D
Red de Distribución	ITU-T G.652.D
Red de Dispersión	ITU-T G.657.A1/ ITU-T G.657.A2

Ahora bien, para conocer el número de los hilos de fibra necesarios en la red alimentación se toma en cuenta el número de splitters de primer nivel ubicado en las mangas porta splitters pertenecientes a cada uno de los 4 distritos. Así que para el distrito uno, dos y tres se tiene una cantidad de 6 splitters por distrito, por lo que se requiere 18 hilos de fibra óptica para cubrir estos tres distritos. Para el distrito cuatro se tiene una cantidad de 2 splitters, por lo que se requiere únicamente la cantidad de 2 hilos de fibra, obteniendo así un total de 20 hilos de fibra óptica para abastecer la red de alimentación.

Para la red de distribución se toma en consideración el número de cajas de distribución (NAP) o el número de splitter de segundo nivel (1:16), ya que a cada NAP le corresponde albergar un único splitter. Para el distrito uno, dos y tres se cuenta con una cantidad de 42 NAP por distrito, por lo que se necesita 42 hilos de fibra para cada distrito. Para el distrito cuatro se tiene una cantidad de 10 NAP, por lo que se requiere 10 hilos de fibra para este distrito. De esta manera, se requiere una cantidad total de 136 hilos de fibra óptica para cubrir la red de distribución.

El número de hilos de la red dispersión depende del número de clientes a los que se vaya otorgando el servicio progresivamente, ya que una red fibra óptica nunca entra en funcionamiento con su capacidad máxima, sino que se va agregando clientes bajo demanda.

En la tabla 3.6, se muestra el número de hilos de fibra óptica necesarios para cubrir el diseño de la ODN.

Tabla 3.6. Número de hilos de fibra óptica según los segmentos de la ODN. Fuente: El autor

Segmento de la ODN	Número de hilos de fibra óptica
Red de alimentación	20 hilos de fibra
Red de distribución	136 hilos de fibra
Red de dispersión	Depende de la demanda de clientes

Además, si se considera la posible demanda de la urbanización Santa Clara, la red de distribución requerirá de 6 hilos de fibra adicionales para cubrir los 6 splitters de segundo nivel ubicados en las cajas FDB. También, se debe considerar la red de distribución interna, por lo que, se hace necesario una cantidad de 96 hilos para conectar los FDB con las cajas de distribución NAP. En la tabla 3.7, se muestra el número de hilos de fibra adicionales para atender a la urbanización Santa Clara.

Tabla 3.7. Número de hilos de fibra óptica para la urbanización Santa Clara. Fuente: El autor

Segmento de la ODN	Número de hilos de fibra óptica
Red de distribución externa	6 hilos de fibra
Red de distribución interna	96 hilos de fibra
Red de dispersión	Depende de la demanda de clientes

Por otra parte, la elección del cable de fibra óptica para el diseño de la red se ha basado en la normativa impuesta por la CNT EP, donde la empresa utiliza cables de fibra de 288, 144 o 96 hilos de fibra del tipo ADSS[13] o canalizados para las redes de alimentación. Para las redes de distribución utiliza cables de fibra de 96, 48, 24, 12 o 6 hilos de fibra del tipo ADSS o canalizado, por último, para la red de dispersión utiliza cables de fibra con capacidad para 1 o 2 hilos del tipo ADSS, canalizado o figura 8[14], tal como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Capacidad de los cables de Fibra óptica *[63]*

Segmento de la ODN	Capacidad	Tipo
Red de alimentación	288, 144, 96 hilos	ADSS (solo 96 y 144 hilos) o canalizado (G.652)
Red de distribución	96, 72, 48, 24, 12, 6 hilos	ADSS o canalizado (G.652.D)
Red de dispersión	1 o 2 hilos	ADSS, canalizado o Figura 8 (G.657.A1 o G.657.A2)

[13] ADSS (All Dielectric Self Supported): Cable de fibra óptica totalmente dieléctrico con un material de refuerzo central que sirve de auto soporte para instalaciones aéreas.

[14] Figura 8: Cable de fibra óptica que posee un elemento de sustentación externa unido al cable por la misma cubierta exterior o chaqueta formando una sección transversal en forma de 8, utilizado en instalaciones aéreas.

Según el cálculo realizado para el número de hilos de fibra que se requieren en cada parte de la ODN, la red de alimentación utilizará un único cable de fibra óptica de 96 hilos del tipo ITU-T G.652.D a través de ductos, de los cuales se utilizará únicamente la capacidad de 20 hilos de fibra óptica requeridos por el diseño de red como se muestra en la tabla 3.6, los hilos de fibra sobrantes servirán de reserva para una posible expansión futura de la red.

Para la red de distribución se utilizará cables aéreos ADSS con fibra G.652.D con una capacidad de 12 hilos para el distrito uno, dos y tres; por lo tanto, se requiere 4 cables de 12 hilos para cubrir las 42 NAP de cada distrito. Para el distrito cuatro se utilizará cables ADSS con una capacidad de 6 hilos, por lo tanto, se requiere dos cables para cubrir las 10 NAP de este distrito. Cabe señalar, que la capacidad del cable elegida para cada distrito permite distribuir de una manera más eficiente las cajas NAP, ya que se logra obtener más de una ramificación del cable óptico de distribución que salen de las mangas porta splitter, en lugar de una sola que se consigue con un cable de mayor capacidad.

Para la red de dispersión se utiliza cable drop para exterior de 2 hilos del tipo ITU-T G.657.A1/ITU-T G.657.A2, con la particularidad que el cable ITU-T G.657.A2 permite un menor radio de curvatura en relación con ITU-T G.657.A1.

En la tabla 3.9, se muestra el tipo de cable óptico utilizado para cada segmento de la ODN de la red NG-PON2.

Tabla 3.9. Elección de los cables de fibra óptica para el diseño de la red NG-PON2.
Fuente: El autor

Segmento de la ODN	**Tipo de cable óptico**	**Tipo de fibra óptica**
Red de alimentación	Cable óptico canalizado de 96 hilos	ITU-T G.652.D
Red de distribución	Cable óptico aéreo ADSS de 12 y 6 hilos	ITU-T G.652.D
Red de dispersión	Cable drop para exterior de 2 hilos	ITU-T G.657.A1/ ITU-T G.657.A2

Además, si se considera la posibilidad de llegar con el cable de distribución hasta las cajas FDB se requiere de un cable adicional ADSS de 6 hilos y 2 cables de distribución interna de 48 hilos para conectar los puertos de los FDB con las cajas de distribución (NAP) en el interior de la urbanización. En la tabla 3.10, se muestra el tipo de cable óptico utilizado para la urbanización Santa Clara.

Tabla 3.10. Cable de fibra óptica para la urbanización Santa Clara. Fuente: El autor

Parte de la ODN	Tipo de cable óptico	Tipo de fibra óptica
Red de distribución externa	Cable óptico aéreo ADSS de 6 hilos	ITU-T G.652.D
Red de distribución interna	Cable óptico aéreo ADSS de 48 hilos	ITU-T G.652.D
Red de dispersión	Cable drop de 2 hilos	ITU-T G.657.A1/ ITU-T G.657.A2

3.1.2 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS ACTIVOS DE LA RED NG-PON2

Como se mencionó anteriormente, NG-PON2 al ser la segunda fase de los sistemas PON de nueva generación estandarizada recientemente, no tiene un gran despliegue dentro de las redes de acceso. Por lo tanto, las empresas dedicadas al desarrollo y fabricación de equipos de telecomunicaciones todavía no han introducido en el mercado los suficientes equipos que cumplan con las todas especificaciones del estándar NG-PON2. De modo que, los equipos que se describen a continuación se han acoplado de acuerdo con las necesidades del diseño de la red NG-PON2 y pertenecen a diferentes marcas y proveedores de equipos de telecomunicaciones. También, se debe mencionar que NG-PON2 al ser una tecnología de nueva generación requiere de equipos activos más sofisticados que sus tecnologías predecesoras y por ende más costosos.

3.1.2.1 Optical Line Terminal (OLT) [69] [70] [71]

Con el propósito de cumplir con el diseño de la red NG-PON2 se ha decidido analizar 2 series de OLT de la marca Huawei correspondientes a la serie MA-5800 y la serie SmartAX EA-5800. Pero, se debe señalar que existen otras series y marcas de OLT adecuadas para llevar a cabo el funcionamiento de NG-PON2, las cuales se describen de manera resumida en el anexo A mediante sus respectivas hojas de datos.

La OLT de la serie MA-5800 es un dispositivo multiservicio considerada como la primera OLT de nueva generación, admite tecnologías GPON, 10 GPON (XG-PON y XGS-PON), TDWM-PON, GE y 10 GE. Permite a los operadores construir redes de acceso con una mayor área de cobertura, mayor ancho de banda y conectividad inteligente a través de una

infraestructura de red FTTH[15], FTTC[16], FTTB[17], entre otras. Proporciona servicio de video 4K y 8K, servicios para el hogar, empresariales, backhaul móvil. Esta serie dispone de 4 modelos, los cuales se describen de manera resumida en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Modelos de OLT de la serie SmartAX 5800 *[70]*

Modelo	**MA-5800 X 17**	**MA-5800 X 15**	**MA-5800 X 7**	**MA-5800 X 2**
Dimensiones (ancho x profundidad x altura)	493 mm x 287 mm x 486 mm	442 mm x 287 mm x 486 mm	442 mm x 268.7 mm x 263.9 mm	442 mm x 268.7 mm x 88.1 mm
Número máximo de puertos	272 GPON/EPON	240 GPON/EPON	112 GPON/EPON	32 GPON/EPON
	816 puertos GE/FE	720 GE/FE	336 GE/FE	96 GE/FE
	136 10G-GPON/ 10G EPON	120 10G-GPON/ 10G EPON	56 10G-GPON/ 10G EPON	16 10G-GPON/ 10G EPON
	136 10G GE	120 10G GE	56 10G GE	16 10G GE
	544 E1	480 E1	244 E1	64 E1
Capacidad de conmutación del sistema	7 Tb/s			480 Gb/s
Temperatura	-40 °C a 65 °C			
Rango de voltaje de funcionamiento	-38.4 VCC a -72 VCC			Fuente de alimentación DC: -38,4 V a -72 V Fuente de alimentación de CA: 100 V a 240 V

[15] FTTH (Fiber to the Home): Tecnología que despliega fibra desde la central hasta el hogar del cliente final.
[16] FTTC (Fiber to the Curb): Tecnología que despliega fibra óptica hasta la vereda donde se ubica un armario de servicio de telecomunicaciones, a partir de este punto el servicio se distribuye por cobre.
[17] FTTB (Fiber to the Building): Tecnología que despliega fibra óptica hasta el cuarto de telecomunicaciones de un edificio, a partir de este punto el servicio se distribuye por cobre.

La OLT de la serie SmartAX EA-5800 es un equipo de agregación inteligente para redes de acceso de mayor cobertura y mayor ancho de banda, adecuadas para redes de nueva generación. Proporciona una plataforma de transmisión unificada para servicios de banda ancha, inalámbricos y video. Permite a los operadores ofrecer servicios con tecnologías GPON, XG-PON, XGS-PON, GE y 10 GE a través de una infraestructura de red FTTH, FTTB, FTTC, entre otras. Esta serie de OLT dispone de 4 modelos, para que los distintos operadores de servicios tengan la capacidad de implementar sus redes de acceso de acuerdo con la demanda de los clientes finales. Estos modelos se describen de manera resumida en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Modelos de OLT de la serie SmartAX EA-5800 *[71]*

Modelo	**EA-5800 X 17**	**EA-5800 X 15**	**EA-5800 X 7**	**EA-5800 X 2**
Dimensiones (ancho x profundidad x altura)	493 mm x 287 mm x 486 mm	42 mm x 287 mm x 486 mm	442 mm x 268.7 mm x 263.9 mm	42 mm x 268.7 mm x 88.1 mm
Número máximo de puertos	272 GPON / XG(S) PON	240 GPON / XG(S) PON	112 GPON / XG(S) PON	32 GPON / XG(S) PON
	816 GE/ FE	720 GE/ FE	112 GE/ FE	32 GE/ FE
	408 10GE	360 10GE	168 10GE	16 10 GE
Capacidad de conmutación del sistema	3.6 Tb/s – 8 Tb/s			480 Gb/s
Temperatura	−40 °C a 65 °C			
Rango de voltaje de funcionamiento	-38.4 V CC A -72 V CC			Fuente de alimentación CC: −38,4 V a −72 V Fuente de alimentación CA: 100 V a 240 V

Como se puede observar en las tablas 3.11 y 3.12, las OLT de las series MA-5800 y SmartAX EA-5800 presentan características similares, pero difieren en la capacidad de conmutación del sistema. Por lo tanto, para interés del diseño de la red NG-PON2 se ha

decidido utilizar la serie MA-5800, ya que admite servicios 10 GPON (XG-PON y XGS-PON) y TWDM-PON, la cuales son las tecnologías base para habilitar una red NG-PON2.

3.1.2.2 Wavelength Multiplexer (WM) [72] [73]

El multiplexor de longitud de onda (WM) requerido en las redes NG-PON2 sirve para combinar las 4 longitudes de onda utilizadas en el diseño de la red del presente trabajo de titulación, este dispositivo es usualmente considerado como parte de la OLT, por lo que, las pérdidas que incorpora no se las incluye como pérdidas del trayecto óptico de la ODN. Actualmente, dentro del mercado de las telecomunicaciones no existen dispositivos WM específicos para NG-PON2, por lo que, se ha optado por elegir algunos dispositivos que presenten ciertas características que permitan llevar a cabo el funcionamiento de este tipo de sistemas.

Considerando que los multiplexores para sistemas CWDM operan dentro del rango de longitudes de onda de 1271 nm a 1611 nm y presentan un espaciamiento entre canales de 20 nm, multiplexando un máximo de 18 longitudes de onda; y, que los multiplexores para sistemas DWDM operan dentro de las bandas C, L y S con espaciamientos de canal típicos de 0.1, 0.2, 0.4 y 0.8 nm, llegando a multiplexar una cantidad superior a 360 longitudes de onda.

En consecuencia, como parte del diseño de la red NG-PON2 se analizarán multiplexores para sistemas CWDM, a pesar de que, el espaciamiento entre canales de 20 nm es muy ancho con respecto a los 0.85 nm propios de los sistemas NG-PON2, como se muestra en la tabla 1.16, el diseño de la red del presente trabajo de titulación solo requiere combinar un máximo de 4 longitudes de onda dentro de las bandas C, L y S, lo cual se consigue con un multiplexor CWDM. La descripción de estos dispositivos sirve para entender las características del multiplexor que se requiere a futuro para llevar a cabo el correcto funcionamiento de sistemas NG-PON2, por lo tanto, lo óptimo sería disponer de catálogos de multiplexores que operen en el espectro óptico asignado a NG-PON2, correspondiente a las bandas C, L y S; y, permitan combinar un máximo de 8 canales como lo describen el estándar.

En la tabla 3.13, se muestra una descripción comparativa de las características más sobresalientes de algunos módulos MUX/DEMUX WDM disponibles en el mercado, los cuales pertenecen a distintas marcas.

Tabla 3.13. Módulos MUX/DEMUX disponibles en el mercado de telecomunicaciones *[72] [73]*

Módulo	**CWDM Mux/Demux**	**CWDM Mux/Demux**	**CWDM Mux/Demux**	**CWDM Mux/Demux**
Marca	Hilink	Hilink	FS	FS
Tecnología WDM	TFF[18] (Thin Film Filter)	TFF (Thin Film Filter)	TFF (Thin Film Filter)	TFF (Thin Film Filter)
Número de canales	4/ 8 /16/ 18	8/ 16/ 18	8	18
Espaciado de canal	20 nm	20 nm	20 nm	20 nm
Rango de operación	1270 nm – 1610 nm	1260 nm – 1620 nm	1470 nm – 1610 nm	1270 nm – 1610 nm

Para conocer el número de módulos Mux/Demux WDM que requiere el diseño de la red, se ha asumido que el módulo debe permitir multiplexar únicamente las 4 longitudes de onda del sistema NG-PON2. Por lo tanto, según la tabla 3.6 donde se especifica el número de hilos de fibra que requiere cada parte de la ODN se concluye que se necesita 20 módulos Mux/Demux, ya que la red de alimentación requiere de 20 hilos de fibra para abastecer los splitters de primer nivel ubicados en las mangas porta splitters.

3.1.2.3 Tarjetas de servicio [74]

El número de tarjetas de servicio que necesita el diseño de la red NG-PON2, se debe calcular en base al número de puertos requeridos para conectar la OLT con los 4 canales de cada módulo Mux/ Demux WDM, por lo cual se debe multiplicar el número de multiplexores (20) por el número de canales que multiplexa cada uno (4), lo que resulta un total de 80 puertos. Así que se ha decidido utilizar la OLT de la serie MA-5800 X 15, la cual según la tabla 3.11 cuenta con 120 puertos de capacidad 10 GPON distribuidas en 15 tarjetas de servicio, es decir cada tarjeta dispone de 8 puertos. Por lo tanto, se utilizarán 10 tarjetas de servicio con capacidad 10 GPON, obteniendo un total de 80 puertos, los cuales son los requeridos por el diseño de la red NG-PON2. En la tabla 3.14, se muestra

[18] TFF (Thin Film Filter): Filtro óptico de película delgada, utilizado comúnmente para el filtrado de longitudes de onda en sistemas CWDM.

el número de puertos y tarjetas de servicio requeridos para cubrir la demanda de cada distrito.

Tabla 3.14. Número de puertos y tarjetas de servicio requeridos por distrito para el diseño de la red NG-PON2. Fuente: El autor

Zonas	Distritos	Número de splitters de primer nivel	Número de módulos Mux/Demux	Número de puertos con capacidad 10GPON	Número de tarjetas de servicio
Zona 1	Distrito 1	6	6	24	3
Zona 2	Distrito 2	6	6	24	3
	Distrito 3	6	6	24	3
Zona 3	Distrito 4	2	2	8	1
Total		20	20	80	10

Como parte de las tarjetas de servicio se debe especificar las características de los transceptores ópticos conectables de pequeño factor de forma (SFP, small form-factor pluggable), los cuales se conectan en la OLT para transformar las señales eléctricas en señales ópticas y suministran la potencia de transmisión hacia la ODN. En la tabla 3.15, se muestra las especificaciones de algunos módulos SFP de la marca Hisense para dar servicio a redes NG-PON2, ya que estos módulos presentas características propias de estos sistemas. Sin embargo, existen otras tarjetas de servicio que incorporan sus correspondientes módulos SFP pertenecientes a diferentes fabricantes, que presentan características similares a la de los sistemas NG-PON2, las cuales se describen en el anexo B, mediante sus hojas de datos.

Tabla 3.15. Módulos SFP para redes NG-PON2 *[74]*

Modelo	Hisense LTF62XX	Hisense LTW62XX	Hisense LTW63XX
Paquete	SFP+	XFP	XFP
Longitud de onda de transmisión	1596.34 nm/ 1597.19 nm / 1598.04 nm/ 1598.89 nm	1596.34 nm/ 1597.19 nm/ 1598.04 nm/ 1598.89 nm	1596.34 nm/ 1597.19 nm/ 1598.04 nm/ 1598.89 nm
Longitud de onda de recepción	1524 ~ 1544 nm	1524 ~ 1544 nm	1524 ~ 1544 nm

Modelo	Hisense LTF62XX	Hisense LTW62XX	Hisense LTW63XX
Tasa de transmisión	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s
Tasa de recepción	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s	2.488 Gb/s
Clase	N1/N2	N1 / N2	N1 / N2
Potencia de transmisión	5.2 dBm 7.2 ~ 10.2 dBm	5.5 dBm 7.2 ~ 10.2 dBm	5.5 dBm 7.2 ~ 10.2 dBm
Sensibilidad	-29.2 dBm -30.6 dBm	-28.5 dBm	-28.5 dBm
Distancia	20 Km	20 Km	20 Km

3.1.2.4 Optical Network Unit (ONU) [74] [75]

Actualmente, se comercializan varias alternativas de ONU que cumplen únicamente con los requerimientos de los sistemas PON heredados (GPON, EPON, XG-PON, etc.). Pero, el estándar NG-PON2 requiere de ONU sintonizables (colorless) para su funcionamiento, es decir dispositivos terminales que filtren o sintonicen las diferentes longitudes de onda con las que trabaja el sistema. Por lo tanto, para llevar a cabo el diseño de la red se analizarán algunos equipos terminales que pueden adaptarse a las necesidades de NG-PON2, ya que al igual que los equipos anteriores aún no se detallan ONU específicas para NG-PON2. Así que en la tabla 3.16 se realiza una comparación de equipos terminales de la marca Huawei que presentan las mejores características para adaptarse a este sistema. También, en el anexo C se detalla las características de otros equipos terminales que pueden ayudar al funcionamiento de NG-PON2.

Tabla 3.16. Modelos de ONU de la marca Huawei *[75]*

Modelo	Huawei OptiXstar S892E	Huawei OptiXstar P802E	Huawei OptiXstar P812E
Puertos NNI	1 o 2 = XGS-PON	1= XGS-PON	1= XGS-PON
Puertos UNI	4 = 10 GE	4 = GE	4 = GE 1= 2.5 GE
Tasa de transmisión	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s
Tasa de recepción	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s
Clase	N1 / N2	N1 / N2	N1 / N2
Nivel de saturación del receptor	-9 dBm	-9 dBm	-9 dBm

Modelo	Huawei OptiXstar S892E	Huawei OptiXstar P802E	Huawei OptiXstar P812E
Sensibilidad del receptor	-28 dBm	-28 dBm	-28 dBm
Servicios	Voz Datos Video de alta definición (HD)	Banda ancha de alta velocidad Línea privada empresarial Vigilancia por video	Voz Datos Video de alta definición (HD)

También, se debe detallar algunos transceptores ópticos adaptables a las ONU de redes NG-PON2, los cuales pertenecen a diferentes marcas y se muestran en la tabla 3.17, mediante una descripción comparativa.

Tabla 3.17. Módulos SFP adaptables a ONU de redes NG-PON2 *[74]*

Modelo	Huawei OptiXstar S800E	Hisense LTW2601
Paquete	SFP+	SFP+
Longitud de onda de transmisión	1260 nm – 1280 nm	1532.68 nm / 1533.47 nm 1534.25 nm / 1535.04 nm
Longitud de onda de recepción	1575 nm – 1580 nm	1596.34 nm / 1597.19 nm 1598.04 nm / 1598.89 nm
Tasa de transmisión	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s
Tasa de recepción	9.953 Gb/s	9.953 Gb/s
Potencia de transmisión	4 – 9 dBm	4 – 9 dBm
Nivel de saturación	-9 dBm	-9 dBm
Sensibilidad	- 28 dBm	-28 dBm
Distancia	20 Km	20 Km

Como se puede observar en la tabla 3.16, los modelos ONU que se describen presentan características aptas para la tecnología XGS-PON, es decir una transmisión simétrica de 10 Gb/s. Estos modelos pueden adaptarse a los requerimientos de NG-PON2, ya que esta

tecnología abarca 4 canales con capacidad XG-PON. Además, en la tabla 3.17 se muestra que el módulo Hisense LTW2601 presenta características propias de NG-PON2 y es considerado como un módulo en miniatura que se puede insertar en cualquier puerto SFP de un punto de acceso (AP, Access Point) u ONU y dar funcionamiento al estándar NG-PON2.

3.1.3 DISEÑO DE LA ODN [63]

La ODN (Optical Distribution Network), es la parte pasiva de todas las redes PON comprendía entre el ODF de planta externa en el lado de la OLT y el equipo terminal ONT en el domicilio del cliente final, la cual depende de tres etapas: red de alimentación, red de distribución y red dispersión.

3.1.3.1 Red de dispersión

La red de dispersión se define como la zona a la que brinda servicio una caja de distribución (NAP) y se la conoce también como área de dispersión, está formada por los cables drop que salen de las cajas de distribución (NAP), pasan por las rosetas ópticas y conectan en el equipo terminal (ONT) en el domicilio del cliente. En la figura 3.1 se muestra un esquema de las áreas de dispersión.

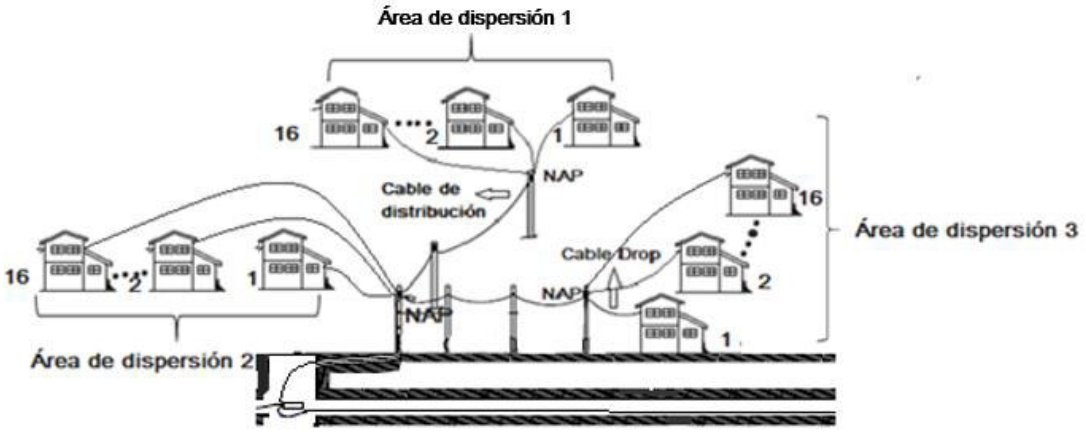

Figura 3.1. Esquema de las áreas de dispersión. Fuente: El autor

A las cajas de distribución (NAP) se las agrupa a través de una manga porta splitter centralizada, lo cual se lo conoce como distrito. Por lo tanto, dentro del diseño de la red NG-PON2 se requiere una cantidad de 42 NAP para el distrito uno, dos y tres; y, 10 NAP para el distrito cuatro, con lo que se concluye que cada distrito tiene 42 o 10 áreas de dispersión respectivamente. Además, si se tiene en cuenta las 8 cajas NAP utilizadas para

conectar a los clientes finales de la urbanización Santa Clara se tendría 8 áreas de dispersión adicionales.

Para el despliegue de la red de dispersión se debe cumplir con algunos parámetros establecidos en las normativas de diseño de la CNT EP, los cuales se mencionan a continuación.

Se debe considerar que dentro del área dispersión el porcentaje de ocupación de cada caja de distribución es del 80 % y el 20 % restante es reservado para reparar daños de las líneas de clientes activos o para una ampliación futura de la red mediante la ocupación total de los puertos de las NAP. De esta manera, como se detalló en la sección 3.1.1 se utilizarán NAP de 16 puertos, por lo que, se usarán únicamente 13 puertos para dar servicio y 3 quedarán libres para reserva.

También, de la sección 3.1.1 se tiene que el número de puertos NAP calculados para dar servicio a los clientes finales es de 2176 puertos, lo cual cubre ampliamente los 2138 clientes proyectados para el año 2025, aplicando el criterio de la CNT EP de dejar el 20 % de puertos libres para reserva, se tiene un total de 435 puertos que pueden ir agregando clientes en el transcurso de 5 años (tiempo de la proyección de la demanda). Este número de puertos de reserva superan ampliamente el número de clientes proyectados, los cuales corresponden tan solo a 285 clientes, lo que indica que el diseño de red NG-PON2 presenta características de escalabilidad, garantizando la agregación de los nuevos clientes de la proyección de la demanda hasta el año 2025, sin afectar el rendimiento de la red.

Este mismo criterio se aplica a los 96 puertos de las NAP utilizadas en red de distribución interna de la urbanización Santa Clara, por lo tanto, al aplicar el 20 % a este número de puertos se tiene una cantidad de 19 puertos de reserva y 77 puertos para brindar el servicio, lo cual es suficiente para cubrir la demanda de los 72 clientes potenciales calculados anteriormente.

El cable drop de la red de dispersión no debe sobrepasar una distancia comprendida entre 100 y 200 metros, pero ante las circunstancias de la ubicación del cliente final con respecto a las cajas de distribución (NAP), la distancia del cable drop puede sobrepasar lo establecido, teniendo en cuenta que las pérdidas adicionales se encuentren dentro del presupuesto óptico.

Otro aspecto importante del despliegue de la red de dispersión es que no se puede cruzar el cable drop por carreteras de alto tráfico vehicular, para evitar este escenario se debe ubicar otra NAP en el lado opuesto de la carretera.

3.1.3.2 Red de distribución

La red de distribución se define como el tramo que va desde los armarios FDH o mangas porta splitter hasta las cajas de distribución (NAP) conectadas a través de cables ópticos aéreos, canalizados o puestos en murales. En la figura 3.2 se muestra un esquema de la red de distribución.

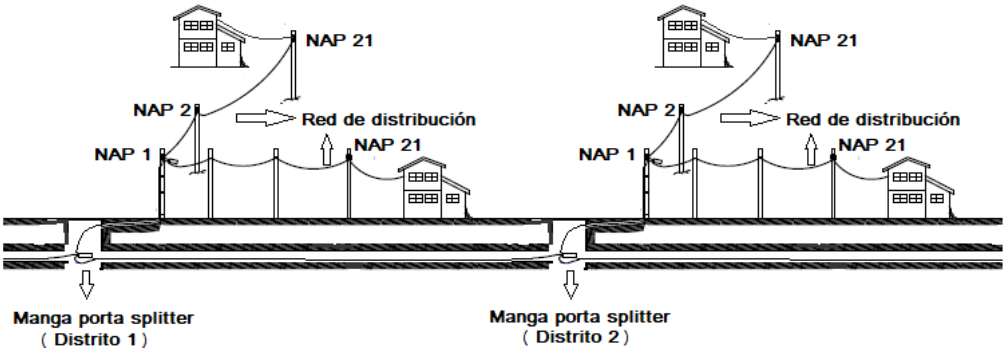

Figura 3.2. Esquema de la red de distribución. Fuente: El autor

De igual manera para el despliegue de la red de distribución se debe cumplir con ciertos parámetros establecidos por la CNT EP, los cuales se mencionan a continuación.

Para determinar la longitud total del cable óptico aéreo ADSS que conecta la red de distribución se debe tomar en cuenta distancias específicas y reservas de cable para realizar sangrados, empalmes, conectorizaciones, entre otros. Así que para elevar el cable ADSS desde la manga porta splitter ubicada en el pozo hasta el poste, se debe sumar la distancia que existe entre el centro del pozo y la base del poste más la altura establecida del poste que se especifica en 8 metros. También, se debe considerar una longitud de 6.5 metros de cable para el sangrado de fibra y 3.5 metros para NAP terminales y por último se considera la longitud total del cable óptico para llegar hasta la última NAP que puede suministrar la red de distribución.

Otro aspecto que se debe considerar es la reserva de 30 metros de cable por cada 500 metros de cable óptico desplegado libremente en la red distribución, es decir que no exista ningún elemento pasivo durante el trayecto de los 500 metros.

Con respecto a la ubicación de las mangas porta splitter de primer nivel se las coloca en el punto más centralizado del área de cobertura y después de que se haya ubicado las cajas de distribución (NAP).

Estos criterios son válidos para el modelo masivo casas/ corporativo a través de dos niveles de splitter especificado por la CNT EP y adoptado por el diseño de la red NG-PON2.

3.1.3.3 Red de alimentación

La red de alimentación o Feeder es la encargada de interconectar los puertos de la ODF de planta externa con los armarios FDH o mangas porta splitter a través de cables ópticos comúnmente canalizados. En la figura 3.3 se muestra un esquema de la red de alimentación.

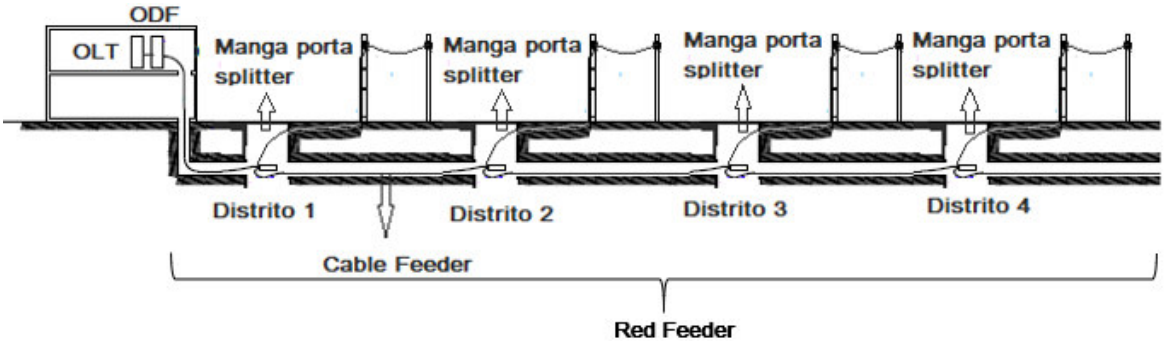

Figura 3.3. Esquema de la red Feeder. Fuente: El autor

Las consideraciones que se deben tener en cuenta para el despliegue de la red de alimentación son las siguientes:

Se debe considerar una longitud de 15 metros de cable óptico canalizado para realizar empalmes y 30 metros para el sagrado de fibras en cables con una capacidad igual o inferior a 96 hilos. Para el caso de cables de 144 o 288 hilos de fibra se debe considera 15 metros de cable óptico para empalmes y 20 metros para el sagrado.

Con respecto a la longitud total del cable canalizado se debe dejar una reserva de 20 metros por cada 400 metros de cable óptico.

3.1.3.4 Ubicación de las cajas de distribución y trayecto de la red de distribución

Según la tabla 3.1, el distrito uno, dos y tres necesitan una cantidad de 42 NAP con 16 puertos y la red de distribución utilizará 4 cables ADSS de 12 hilos para cada distrito, por lo que cada cable abarca una cantidad de 12 NAP, obteniendo una capacidad total para 48 NAP, de los cuales se tiene una reserva de 6 hilos de fibra, lo que permitirá a futuro conectar un total de 6 NAP adicionales para atender un posible crecimiento de la demanda.

Para el distrito cuatro se tiene una cantidad de 10 NAP con 16 puertos y la red de distribución utilizará 2 cables ADSS de 6 hilos, permitiendo conectar 12 NAP, de los cuales

se tiene una reserva de 2 hilos de fibra, de igual manera esta reserva permitirá conectar un total de 2 NAP adicionales para atender la demanda futura.

De esta manera, se concluye que se utilizarán 136 NAP con derivación y ninguno sin derivación, debido a que no se utilizará la totalidad de los hilos de fibra de cada cable óptico de distribución. Cabe señalar que las NAP sin derivación son los que terminan la capacidad de los hilos de fibra del cable de distribución.

Con respecto a la urbanización Santa Clara se tiene una cantidad de 8 NAP con 12 puertos y la red de distribución interna posiblemente utilizará 2 cables ADSS de 48 hilos, por lo que a cada cable le corresponde una cantidad de 3 NAP con derivación y una sin derivación.

Ahora bien, siguiendo la normativa que establece la CNT EP para el despliegue de la red de dispersión y la cantidad de NAP necesarios para atender la demanda de la red, se procede a ubicar las cajas NAP dentro de cada distrito. Luego de realizar la ubicación de las cajas NAP se diseña el trayecto del cable de distribución. En la figura 3.4 se muestra la ubicación de las cajas NAP y el trayecto de la red de distribución perteneciente al distrito uno. Los diseños correspondientes a los distritos dos, tres y cuatro se muestran en el anexo D y E respectivamente.

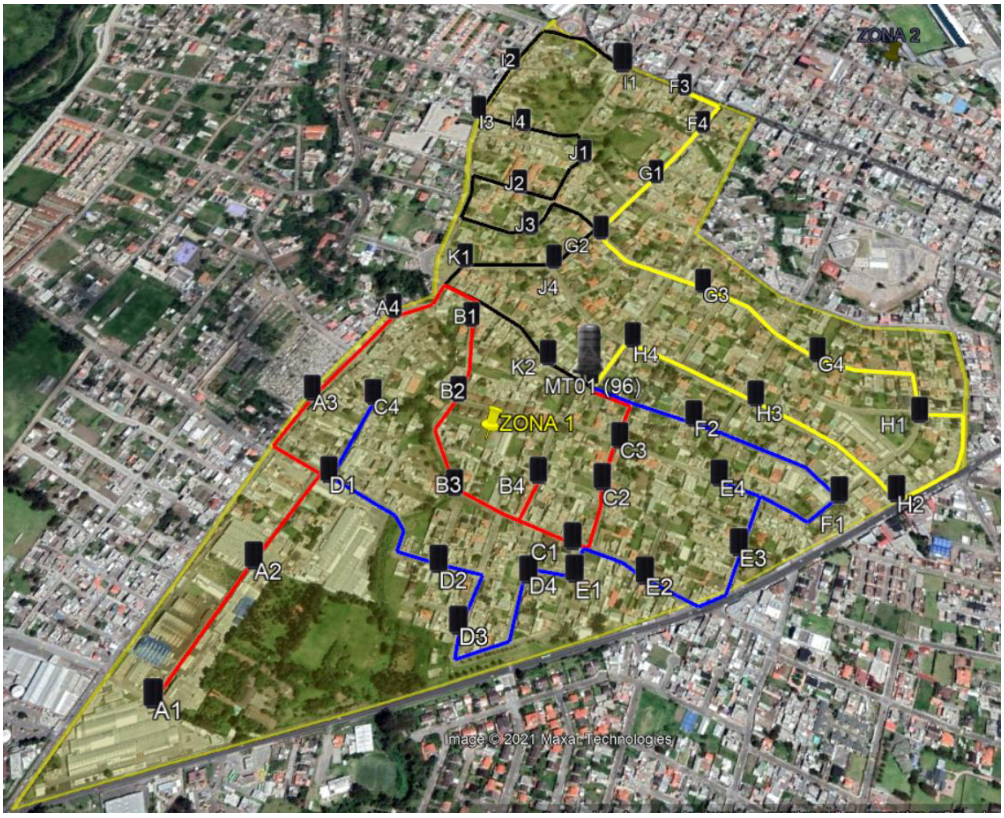

Figura 3.4. Ubicación de las cajas NAP y trayecto de la red de distribución. Fuente: Google Earth.

De la figura 3.4 se observa que las cajas de distribución (NAP) dentro de un distrito se identificarán mediante una nomenclatura alfanumérica que va desde la caja más lejana hacia la manga porta splitter, formando una serie ascendente por cada 4 cajas NAP como se muestra a continuación: A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, etc. Por lo tanto, la caja más lejana que puede abarcar el cable de distribución se le asignará el código A1 y se la instalará con los primeros hilos de fibra, luego de instalar las primeras 4 cajas NAP correspondientes a la serie A, la siguiente adopta el código B1 y se repite el mismo proceso hasta llegar a la manga porta splitter, respetando el orden ascendente del abecedario.

Por otra parte, el trayecto de la red de distribución de la figura 3.4 está identificada por cuatro colores, cada uno representa un cable de fibra óptica ADSS con capacidad de 12 hilos, de donde cada cable deja una reserva de 1 o 2 hilos de fibra con el objetivo de que cada cable de distribución pueda albergar 1 o 2 cajas NAP adicionales para una posible expansión de la red de distribución a futuro. Además, la identificación de los cables de distribución según la CNT EP se lo realiza a partir de cinco campos como se muestra en la figura 3.5.

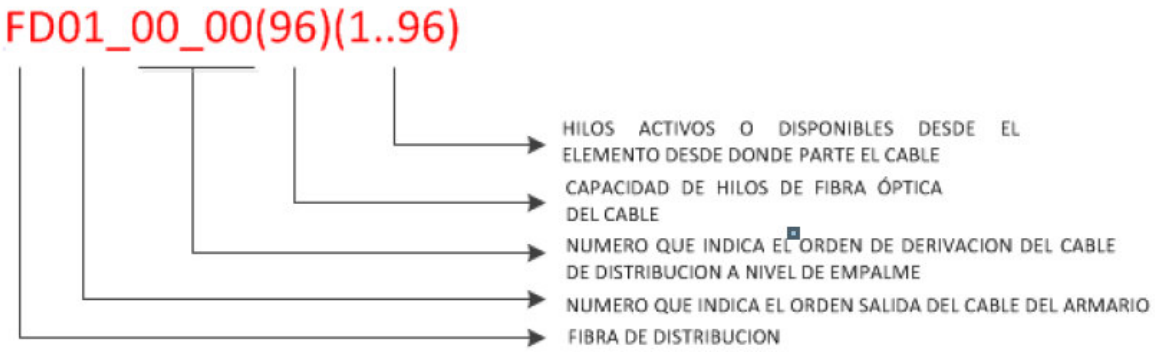

Figura 3.5. Identificación de los cables de distribución según la CNT EP *[63]*

Los criterios de nomenclatura de las cajas de distribución y reserva de los hilos de fibra por cada cable de distribución también se mantienen para el diseño de los distritos dos, tres y cuatro.

3.1.3.5 Ubicación de las mangas porta splitter y trayecto de la red de alimentación (Feeder)

Como se mencionó en la sección 3.3.2, las mangas porta splitter se ubican en un punto centralizado del área de cobertura, con el objetivo de concentrar la mayor cantidad de clientes en un solo distrito y que las ONU más lejanas puedan tolerar las pérdidas generadas por el despliegue de la fibra óptica. Comúnmente, las mangas porta splitter

están ubicadas en los pozos que forman parte de la canalización por donde se despliega el cable óptico de alimentación. En la figura 3.6 se muestra la ubicación de las mangas porta splitter y el trayecto de la red de alimentación.

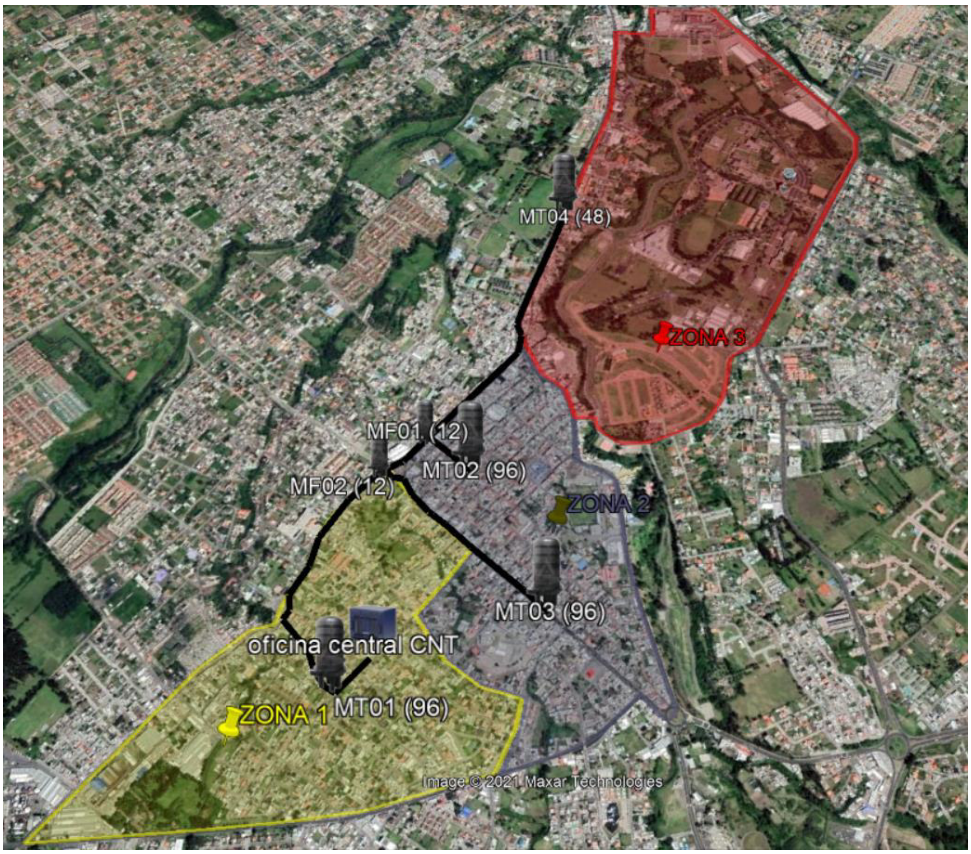

Figura 3.6. Ubicación de las mangas porta splitter y trayecto de la red de alimentación.
Fuente: Google Earth

Como se puede observar en la figura 3.6, el cable de alimentación principal presenta derivaciones con el objetivo de centralizar las mangas porta splitter del distrito dos y tres.

Las mangas de fusión utilizadas para realizar derivaciones de hilos de fibra se identifican mediante la abreviatura MF acompañado de un número formado por dos dígitos que sigue una secuencia. De igual manera, las mangas porta splitters se identifican a partir de la abreviatura MT y van enumeradas desde la manga más cerca a la OLT hasta la más lejana en forma ascendente mediante un número secuencial de dos dígitos, es decir a la primera manga porta splitter le corresponde la abreviatura MT01, así mismo a la primera manga de derivación le corresponde MF01.

Por otra parte, según la CNT EP los cables de alimentación se identifican a través de cinco campos como se indica en la figura 3.7.

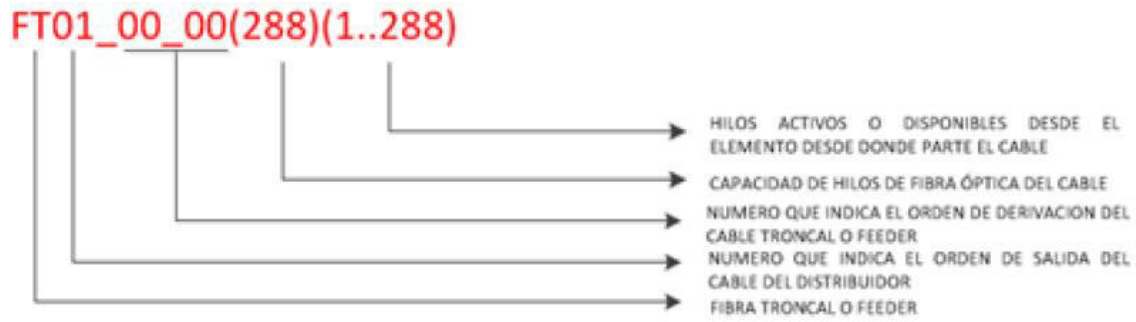

Figura 3.7. Identificación de los cables de alimentación según la CNT EP *[63]*

3.1.3.6 Esquema de la red NG-PON2

En la figura 3.8, se muestra un esquema de la red NG-PON2 detallando todos los elementos pasivos y la trayectoria del cable de fibra óptica desde la OLT hasta el cliente final.

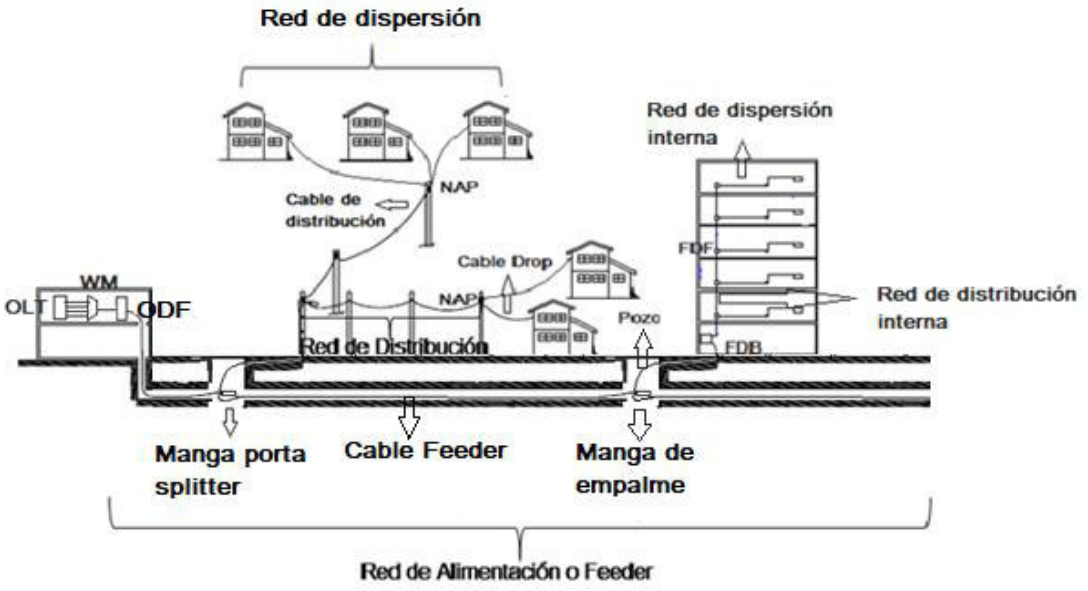

Figura 3.8. Esquema de la red NG-PON2. Fuente: El autor

Este esquema sirve como base para describir el despliegue total de la red NG-PON2, el cual se describe a continuación.

Como se puede observar en la figura 3.8, el dispositivo multiplexor WM forma parte de la OLT, de donde sale un cable óptico canalizado G.652.D de 96 hilos para desplegar la red de alimentación o feeder, la cual llega hasta la primera manga porta splitter ubicada en un pozo, donde se realiza un sagrado de hilos de fibra para conectar los 6 splitters de primer nivel que presentan una relación de división de 1:8, el resto de hilos del cable de alimentación se derivan hacia la mangas dos, tres y cuatro donde se realiza el mismo

proceso de sangrado para conectar la cantidad de splitters correspondientes a cada manga porta splitter. En este punto se debe especificar que las mangas porta splitters dos y tres se conectan mediante una derivación del cable de alimentación principal, utilizando cable óptico canalizado G.652.D de 6 hilos. Luego desde cada manga porta splitter uno, dos y tres se despliegan 4 cables ópticos ADSS G.652.D de 12 hilos y desde la manga cuatro se despliegan 2 cables ópticos ADSS de 6 hilos para formar la red de distribución, la cual conectan con las cajas de distribución NAP que forman parte de cada distrito. En cada NAP se realiza el sagrado de un hilo de fibra para conectar el splitter de segundo nivel con relación de 1:16, el resto de hilos se derivan a la siguiente NAP para repetir el proceso de sangrado y así sucesivamente hasta llegar a la última NAP que puede albergar cada cable de distribución. También, se debe detallar que cada caja NAP tiene capacidad de 16 puertos, pero según la normativa de la CNT EP solo 13 puertos se utilizan para activar el servicio y 3 quedan como reserva.

En cuanto al posible diseño para la urbanización Santa Clara, desde la manga cuatro se despliega un cable óptico ADSS de 6 hilos para conectar con las cajas FDB, luego desde este punto se deriva 2 cables ópticos ADSS de 48 hilos para conectar con las 8 cajas de distribución NAP y formar la red de distribución interna, dentro de cada NAP se realiza el sangrado de 12 hilos de fibra para conectar con el cable drop y llegar a la ONT del cliente final. Es importante señalar, que no se realizó la ubicación de las cajas NAP y el trayecto del cable de distribución interna, debido a que al tratarse de un proyecto en proceso de construcción no se tiene un dato especifico de la distribución de las viviendas.

3.1.4 PRESUPUESTO DE POTENCIA DE LA RED NG-PON2 [14] [76] [63] [77] [78] [79]

El propósito de un presupuesto de potencia óptico es garantizar que la señal que llega al receptor sea la adecuada. Para lograr esto, se debe considerar las características de potencia de transmisión y sensibilidad de los equipos activos que intervienen en la red, así como también, las pérdidas por inserción que provocan todos los elementos pasivos de la ODN.

Para realizar el presupuesto de potencia se debe tener en cuenta un valor máximo y mínimo de pérdidas en la ODN, lo cual garantice que tanto la OLT como las ONT de los clientes finales reciban una potencia mínima que permitan el correcto funcionamiento de sus receptores y una potencia máxima que no sature los receptores.

En el caso del cliente más cercano a la OLT las pérdidas en la ODN son mínimas y se toma en cuenta la potencia máxima de transmisión, con el objetivo de comprobar que la potencia de la señal que llega a los receptores esté por debajo del umbral máximo que puede soportar los detectores ópticos.

Por lo contrario, para el cliente más lejano las pérdidas en la ODN son máximas y se debe considerar la potencia mínima de transmisión, esto con el propósito de verificar que la potencia que llega a los receptores esté por encima del nivel de sensibilidad de los detectores ópticos y puedan funcionar correctamente.

3.1.4.1 Pérdidas en la ODN

Las pérdidas generales en el trayecto de la ODN están definidas por la figura 3.9.

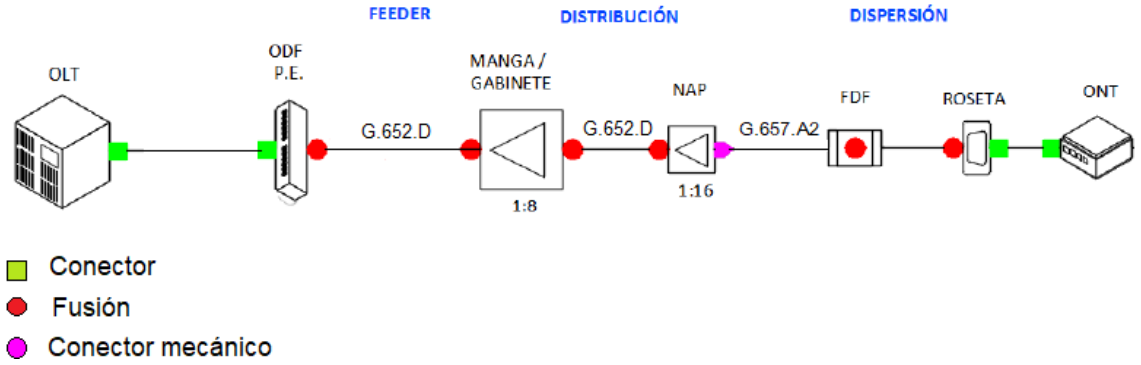

Figura 3.9. Pérdidas generales en el trayecto de la ODN *[63]*

De la figura 3.9, se puede detallar que las pérdidas acumuladas dentro del tramo que une la ODF de planta externa con la ONT del cliente más cercano o lejano a la OLT están definidas por las atenuaciones que introduce la fibra óptica por kilómetro, de modo que, el tramo correspondiente a las redes feeder y de distribución con fibra óptica G.652.D introducen atenuaciones de 0.25 dB/Km para las longitudes de onda correspondientes al rango de 1596 nm - 1603 nm pertenecientes a la banda L (1625 nm) y la misma atenuación para el rango de 1524 nm - 1544 nm correspondiente mayoritariamente a la banda C (1550 nm), ambos rangos utilizados para la transmisión y recepción de voz, datos y video sobre IP respectivamente, también se debe detallar que la longitud de onda central de 1550 nm es utilizada para transmisión de video RF de ser el caso. [78]

Por otro lado, el tramo correspondiente a la red de dispersión utiliza fibra óptica G.657.A1/G.657.A2, las cuales introducen atenuaciones de 0.40 dB/Km para las longitudes de onda de 1625 nm y atenuaciones de 0.30 dB/Km para las longitudes de onda de 1550 nm. [79]

En la tabla 3.18, se muestra las pérdidas típicas introducidas por los diferentes tipos de fibra óptica utilizados en el trayecto óptico de la ODN por parte de los sistemas NG-PON2 según las longitudes de onda de operación.

Tabla 3.18. Pérdidas en la fibra óptica por kilómetro según la longitud de onda de operación *[78] [79]*

Tipo de fibra óptica	Longitud de onda (nm)	Pérdidas Fibra Óptica (dB/Km)
G.652.D	1550	0.25
	1625	0.25
G.657.A1/ G.657.A2	1550	0.30
	1625	0.40

Además, se debe considerar todas las pérdidas por inserción generadas por los elementos pasivos de la ODN tales como: mangas, splitters, NAP, FDF, rosetas, etc., así como también, las pérdidas producidas por conectores y fusiones de fibra.

3.1.4.2 Pérdidas del cliente más cercano

Las pérdidas a las que se ve sometido el enlace del cliente más cercano a la OLT son mínimas. Estas pérdidas se calculan en base al modelo masivo / casas / corporativo con un segundo nivel de splitter en la caja NAP establecido por la CNT EP, como se muestra en la figura 3.10.

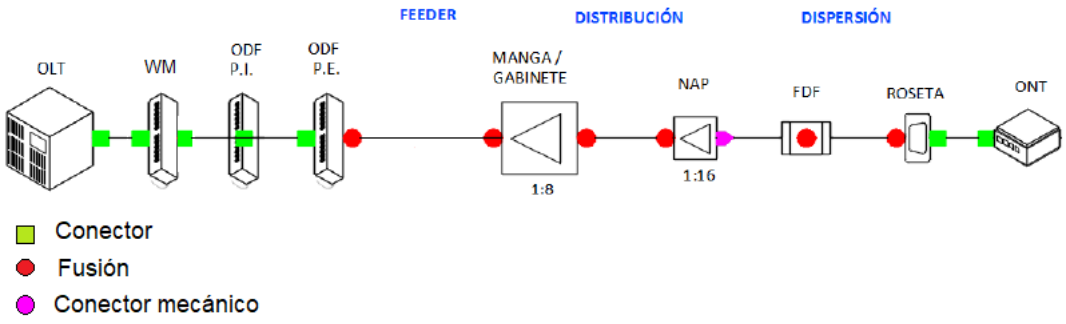

Figura 3.10. Pérdidas en la ODN del cliente más cercano a la OLT *[63]*

La ubicación del cliente más cercano a la OLT se encuentra dentro de la zona 1, donde el despliegue de fibra desde la ODF de planta externa hasta la caja NAP K2 tiene una longitud de 250 metros, como se muestra en la figura 3.11.

Figura 3.11. Despliegue de fibra óptica desde la OLT hasta la caja NAP más cercana. Fuente: Google Earth

Además, se debe considerar la longitud del cable drop de la red de dispersión, la cual corresponde a una distancia máxima de 200 m. En consecuencia, se tiene un total de 450 m de despliegue de fibra óptica desde la ODF de planta externa hasta la ONT del cliente más cercano a la OLT.

Como parte de las pérdidas por inserción producidas por los elementos pasivos de la ODN se tiene dos niveles de splitters con relación de 1:8 para el primer nivel y 1:16 para el segundo nivel, los cuales presentan pérdidas por inserción típicas de 9.75 dB y 13 dB respectivamente [63]. Se debe agregar que, como parte de la OLT se tiene el módulo CWDM que introduce pérdidas de 1.2 dB correspondientes a un MUX/DEMUX de 4 canales [72].

También, de la figura 3.10 se puede observar que existen pérdidas causadas por conectores y fusiones en el trayecto de la fibra óptica, por lo tanto, la CNT EP detalla pérdidas de 0.5 dB para conectores, 0.10 dB para fusiones y 0.60 dB para conectores mecánicos[19].

[19] Conectores mecánicos: Son aquellos conectores que se arman en campo de manera fácil, sin la necesidad de equipos como fusionadoras y prestan la misma utilidad de un conector tradicional.

En la tabla 3.19, se observa todas las pérdidas que introduce el trayecto de la ODN hasta llegar a la ONT del cliente más cercano a la OLT, incluido las pérdidas ocasionadas por el módulo WM en el lado de la OLT.

Tabla 3.19. Pérdidas totales del trayecto de la ODN desde la OLT hasta la ONT del cliente más cercano. Fuente: El autor

Elementos del trayecto óptico		**Longitud / Número de elementos**	**Pérdida típica**	**Pérdida total (dB)**
Fibra óptica G.652.D	1625 nm	0.250 Km	0.25 dB/Km	0.06
Fibra óptica G.652.A1/ G.652.A2	1625 nm	0.200 Km	0.40 dB/Km	0.08
Splitters	1:8	1	9.75 dB	9.75
	1:16	1	13 dB	13
Módulo CWDM 4 canales		1	1.2 dB	1.2
Conectores		7	0.50 dB	3.5
Fusiones		6	0.10 dB	0.6
Conectores mecánicos		1	0.60 dB	0.6
Pérdidas totales en la ODN				27.59
Pérdidas totales incluido el módulo CWDM				28.79

Según lo especificado en la tabla 1.7 correspondiente a las pérdidas en el trayecto óptico según la clase de ODN, para el presente trabajo de titulación se considera la clase N1, la cual presenta pérdidas mínimas de 14 dB, es decir por debajo de este nivel de pérdidas en la ODN, la potencia de la señal que llegue a la ONT del cliente más cercano saturará el detector óptico. Por lo tanto, como se puede observar en la tabla 3.19 el nivel de pérdidas totales en la ODN del cliente más cercano es de 27.59 dB, lo cual comprueba que el sistema operará correctamente dado que está por encima del nivel mínimo de la clase N1.

3.1.4.3 Presupuesto de potencia del cliente más cercano

Para el cálculo del presupuesto de potencia del cliente más cercano a la OLT se debe considerar la potencia máxima de transmisión y las pérdidas mínimas en la ODN, esto con el objetivo de comprobar que no se sature el detector óptico en el receptor.

De esta manera, se ha tomado en cuenta el módulo SFP+ Hisense LTF62XX de clase N1/N2, que presenta una potencia máxima de transmisión de 10.2 dBm, las pérdidas totales incluido el módulo CWDM que es igual a 28.79 dB y el módulo SFP+ Hisense LTW2601 de clase N1/N2 adaptable a ONU de redes NG-PON2 con un nivel de saturación de - 9 dBm. En la tabla 3.20 se muestra todos los parámetros necesarios para realizar el presupuesto de potencia del cliente más cercano a la OLT.

Tabla 3.20. Parámetros del presupuesto de potencia del cliente más cercano a la OLT. Fuente: El autor

Parámetro	Clase	Valor
Potencia máxima de transmisión	N1/N2	10.2 dBm
Pérdidas en el trayecto óptico incluido el módulo CWDM	N1	28.79 dB
Nivel de saturación	N1/N2	-9 dBm
Margen de Seguridad	--------	0 dB

Se debe señalar, que como parte del presupuesto de potencia del cliente más cercano se ha considerado un margen de seguridad de 0 dB, debido a que se necesita un nivel de pérdidas mínimas para comprobar que los detectores ópticos no se saturen.

Para comprobar el nivel de potencia que llega a la ONT más cercana en [14], se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{Tx.MAX} - \propto_{totales} \leq S + M$$

Donde:

$P_{Tx.MAX} = Potencia\ máxima\ de\ transmision\ de\ la\ OLT$

$\propto_{totales} = Pérdidas\ totales\ de\ trayecto\ óptico$

$S = Nivel\ de\ Saturación\ de\ la\ ONT$

$M = Margen\ de\ Seguridad$

Entonces:

$$P_{Tx.MAX} - \propto_{totales} \leq S + M$$

$$P_{Tx.MAX} - \propto_{totales} - M \leq S$$

$$10.2\ dBm - \ 28.79\ dB - 0\ dB \leq -9dBm$$

$$-18.59\ dBm \leq -9\ dBm$$

Por lo tanto, se comprueba que el nivel de potencia que llega a la ONT del cliente más cercano es menor que el nivel de saturación que puede soportar, por lo que el sistema operará apropiadamente.

3.1.4.4 Pérdidas del cliente más lejano

Las pérdidas a las que se ve sometido el enlace del cliente más lejano a la OLT son máximas. Estas pérdidas se calculan en base al modelo masivo / casas / corporativo con un segundo nivel de splitter en la caja de distribución principal (FDB) establecido por la CNT EP, como se muestra en la figura 3.12.

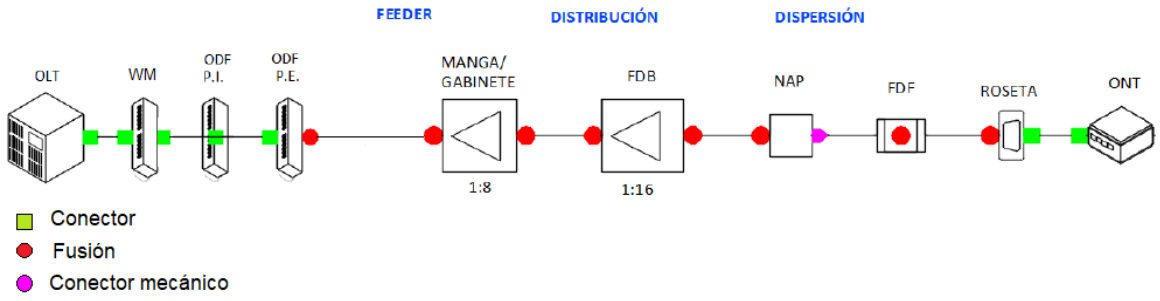

Figura 3.12. Pérdidas en la ODN del cliente más lejano a la OLT *[63]*

La ubicación del cliente más lejano a la OLT se encuentra dentro de la zona 3, con un despliegue de fibra óptica que tiene una longitud de 3.42 Km desde la OLT hasta la caja FDB ubicada en las inmediaciones de la urbanización residencial Santa Clara, a esta distancia se debe sumar una longitud de 0.80 Km correspondiente al tramo entre la caja FDB y la caja NAP más lejana dentro de la urbanización, resultando una distancia total de 4.22 Km, como se muestra en la figura 3.13.

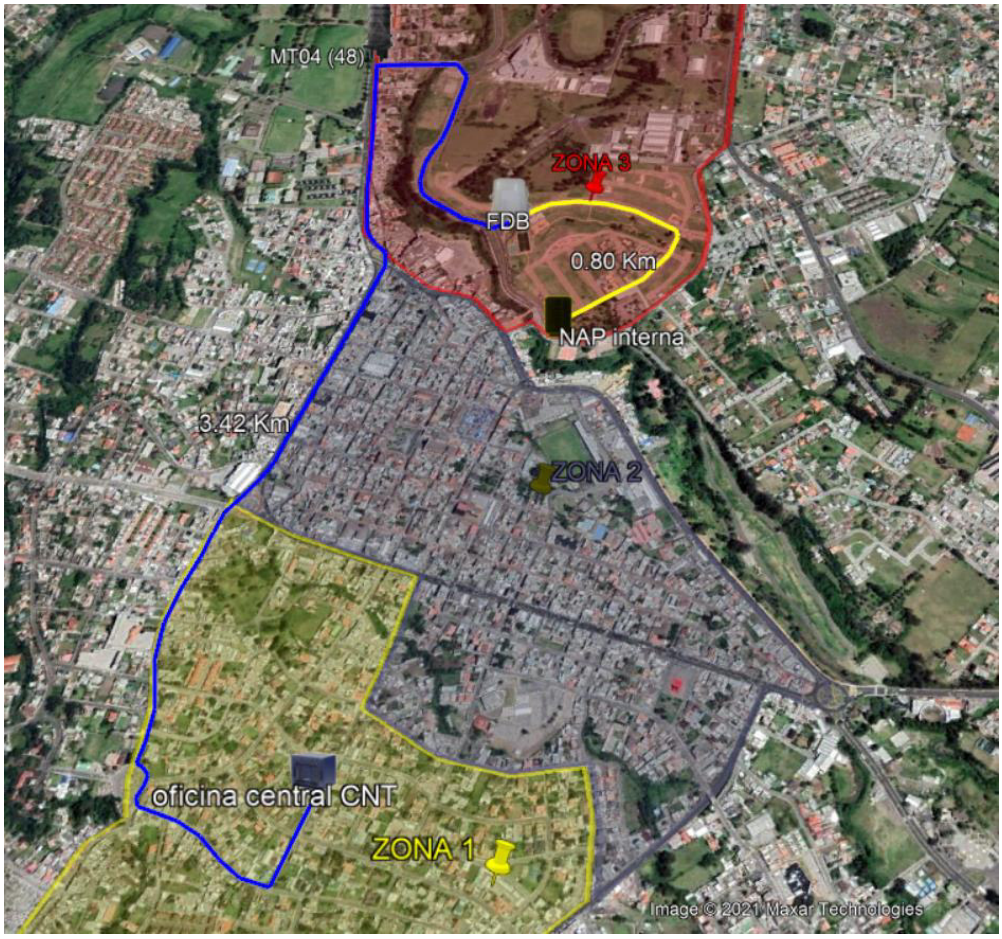

Figura 3.13. Despliegue de fibra óptica desde la OLT hasta la caja NAP más lejana.
Fuente: Google Earth

De igual manera que, al cliente más cercano a OLT se debe considerar una distancia máxima de 200 metros para el cable drop en la red de dispersión. En consecuencia, se tiene una distancia total de 4.42 Km entre la OLT y la ONT del cliente más lejano.

Además, es importante señalar que no existe ninguna fusión en la redes feeder y de distribución, debido a que la CNT EP especifica en sus fichas técnicas bobinas de 4 y 5 kilómetros de cable óptico respectivamente, también se debe mencionar que la ruta de color amarillo de la figura 3.13 representa la posible ubicación de la caja NAP más lejana dentro de la urbanización Santa Clara con respecto a la caja FDB, ya que al tratarse de un proyecto en una etapa de construcción no se puede evidenciar la distribución exacta de las viviendas, lo cual dificulta realizar una distribución centralizada de las cajas NAP dentro de la urbanización con respecto a los clientes finales.

Al igual que el cliente más cercano, las pérdidas por inserción en la ODN están dadas por dos niveles de splitters con relación de 1:8 y 1:16 con pérdidas de 9.75 dB y 13 dB respectivamente. Así mismo se considera el módulo CWDM con pérdidas de 1.2 dB y

pérdidas de 0.5 dB para conectores, 0.10 dB para fusiones y 0.60 dB para conectores mecánicos.

En la tabla 3.21, se observa todas las pérdidas que introduce el trayecto de la ODN hasta llegar a la ONT del cliente más lejano a la OLT, incluido las pérdidas ocasionadas por el módulo WM en el lado de la OLT.

Tabla 3.21. Pérdidas totales del trayecto de la ODN desde la OLT hasta la ONT del cliente más lejano. Fuente: El autor

Elementos del trayecto óptico		**Longitud / Número de elementos**	**Pérdida típica**	**Pérdida total (dB)**
Fibra óptica G.652.D	1550 nm	4.22 Km	0.25 dB/Km	1.06
Fibra óptica G.652.A2	1550 nm	0.200 Km	0.30 dB/Km	0.06
Splitters	1:8	1	9.75 dB	9.75
	1:16	1	13 dB	13
Módulo CWDM 4 canales		1	1.2 dB	1.2
Conectores		7	0.50 dB	3.5
Fusiones		8	0.10 dB	0.8
Conectores mecánicos		1	0.60 dB	0.6
Pérdidas totales en la ODN				28.77
Pérdidas totales incluido el módulo CWDM				29.97

Para el cliente más lejano también se considera la clase N1 como parte de las pérdidas del trayecto óptico según la clase de ODN la cual establece pérdidas máximas de 29 dB, en otras palabras, por encima de este nivel de pérdidas en la ODN la potencia de la señal que llegue a la ONT del cliente más lejano no podrá ser detectada por los detectores ópticos del receptor. De manera que, como se muestra en la tabla 3.21 las pérdidas totales en la ODN del cliente más lejano son de 28.77 dB, lo cual comprueba que está por debajo del nivel máximo de pérdidas de la clase N1.

3.1.4.5 Presupuesto de potencia del cliente más lejano

Para el cálculo del presupuesto de potencia del cliente más lejano a la OLT se debe considerar la potencia mínima de transmisión y las pérdidas máximas en la ODN, esto con el propósito de comprobar que los detectores ópticos en los receptores puedan detectar la señal.

De esta manera, se tiene que el caso más crítico está en el sentido desde la ONT del cliente final hasta la OLT, por lo tanto, al igual que el cliente más cercano se ha considerado el módulo SFP+ Hisense LTW2601 en el lado de la ONT del cliente más lejano con una potencia mínima de transmisión de 4 dBm, pérdidas totales incluido el módulo CWDM de 29.97 dB, el módulo SFP+ Hisense LTF62XX en el lado de la OLT con un nivel de sensibilidad comprendido entre -29.2 y – 30.6 dBm y un margen de seguridad de 3 dB, este margen maneja la CNT EP en el presupuesto de potencia óptico de sus redes FTTH con el propósito de soportar las posibles atenuaciones que se introduzcan a futuro producto de las modificaciones que se realicen en la ODN [80]. En la tabla 3.22, se muestra todos los parámetros necesarios para realizar el presupuesto de potencia del cliente más lejano a la OLT.

Tabla 3.22. Parámetros del presupuesto de potencia del cliente más lejano a la OLT. Fuente: El autor

Parámetro	Clase	Valor
Potencia mínima de transmisión	N1/N2	4 dBm
Pérdidas en el trayecto óptico incluido el módulo CWDM	N1	29.97 dB
Sensibilidad	N1/N2	-29.2 dBm a -30.6 dBm
Margen de seguridad	-------	3 dB

Para comprobar el nivel de potencia que llega a los detectores ópticos de la ONT más lejana en [14], se utiliza la siguiente expresión.

$$P_{Tx.MIN} - \propto_{totales} \geq S + M$$

Donde:

$P_{Tx.MIN} = Potencia\ mínima\ de\ transmision\ de\ la\ ONT$

$\propto_{totales} = Pérdidas\ totales\ del\ trayecto\ óptico$

$S = Sensibilidad\ de\ la\ OLT$

$M = Margen\ de\ Seguridad$

Entonces:

$$P_{Tx.MIN} - \propto_{totales} \geq S + M$$

$$P_{Tx.MIN} - \propto_{totales} - M \geq S$$

$$4\ dBm - \ 29.97\ dB - 3\ dB \geq -29.2\ dBm$$

$$-28.97\ \ dBm \geq -29.2\ dBm$$

Por lo tanto, se comprueba que el nivel de potencia que llega a la ONT del cliente más lejano está por encima del nivel de sensibilidad del receptor.

3.1.5 PRESUPUESTO REFERENCIAL [8] [44] [77] [81]

Como se estableció en el Plan de Trabajo de Titulación el presupuesto referencial se realizará mediante una cotización de los costos generales de los elementos activos y pasivos que intervienen en el diseño de la red NG-PON2.

Este presupuesto referencial se realiza en base a la cantidad de elementos activos y pasivos calculados anteriormente. Además, se tomará en cuenta los precios de los equipos activos que actualmente maneja la CNT EP para la implementación de sus redes FTTH, ya que dentro del mercado nacional todavía no se tiene un catálogo de precios exactos de equipos para sistemas NG-PON2. En cuanto a los elementos pasivos de la ODN también se revisará aquellos homologados por la CNT EP ya que existe total compatibilidad de la ODN entre los sistemas NG-PON2 y PON heredados (EPON, GPON, XG-PON, etc.).

Es importante señalar que, los precios que se citan a continuación se han tomado de las memorias técnicas especificadas por la CNT EP y distintos trabajos de titulación relacionados con el diseño de redes PON heredadas, los mismos que se observan a detalle en el Anexo F.

3.1.5.1 Presupuesto de los elementos activos

Si bien el diseño de la red NG-PON2 detalla la utilización de una OLT Huawei de la serie MA-5800 X 15, con 120 puertos de capacidad 10 GPON distribuidas en 15 tarjetas de servicio; sin embargo, para determinar el presupuesto referencial se ha tomado en cuenta los costos totales del suministro de una OLT Huawei MA5600T, la cual es utilizada

actualmente por la CNT EP para llevar a cabo el funcionamiento de sus redes FTTH, ya que posibilita incorporar tarjetas de servicios con capacidad GPON y 10 GPON (XG-PON y XGS-PON), siendo esta última apta para sistemas NG-PON2.

Con respecto a la ONT se considera el precio del módulo ONT Huawei OptiXstar S800E con capacidad de 10 GPON, el cual es capaz de soportar servicios de voz, datos y video de alta definición. Además, en esta sección se detalla el módulo MUX/DEMUX CWDM de 4 a 8 canales de la marca FS, a pesar de que no se trata de un elemento activo se lo considera como parte de la OLT.

En la tabla 3.23, se muestra los precios de los equipos activos de la red NG-PON2 incluido el módulo WM.

Tabla 3.23. Precios de los elementos activos de la red NG-PON2 *[8] [82] [73]*

Elemento	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
OLT Huawei MA-5600T	1	$ 29.204,15	$ 29.204,15
ONT Huawei OptiXstar S800E	2210	$ 66,82	$ 147.672,2
Módulo FS CWDM Mux/Demux	20	$ 389,00	$ 7.780
TOTAL			$ 184.656,35

Se debe señalar, que el presupuesto referencial de los elementos activos y pasivos se realiza en base al número de clientes proyectados, ya que en esta sección se da a conocer el precio total del proyecto, el cual está dimensionado para el año 2025. Pero se debe tener presente que de llevarse a cabo la implementación de la red NG-PON2 en la actualidad, estaría sobredimensionada y se tendría una inversión inicial alta, por lo que, lo ideal sería considerar la demanda actual (año 2020) e ir creciendo gradualmente conforme aumente el número de clientes calculados en la proyección de la demanda, lo que implicaría inversiones adicionales por año hasta cumplir con la demanda establecida para el año 2025.

3.1.5.2 Presupuesto de los elementos pasivos de la ODN

Para realizar el presupuesto de los elementos pasivos de la red NG-PON2, se debe calcular el número de elementos que intervienen en el diseño ODN, así como la longitud total de fibra óptica utilizada en cada tramo de la red.

Se debe señalar que, la cantidad de elementos pasivos mencionados a continuación hacen referencia al dimensionamiento realizado en la sección 3.1 y la longitud total de fibra para cada tramo de la red se ha calculado en base a la herramienta Google Earth, donde cada tramo incluye las reservas correspondientes de fibra óptica, según lo especificado en la normativa de la CNT EP.

3.1.5.2.1 Red de alimentación

En la tabla 3.24, se muestra un detalle de los precios de los elementos pasivos que intervienen en el diseño de la red de alimentación.

Tabla 3.24. Precios de los elementos pasivos de la red de alimentación *[81]*

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
Suministro y colocación de ODF de 48 puertos (incluye pigtails SC/APC G.652.D)	U	1	$456,34	$456,34
Suministro y colocación de Patch-cord SC/APC-SC/APC 3 metros G.652.D en el lado de OLT.	U	80	$11,60	$928,00
Suministro y colocación de Patch-cord SC/APC-SC/APC 10 metros G.652.D en el lado de OLT.	U	20	$ 18,81	$ 376,10
Suministro y colocación de manga subterránea para fusión de 12 F.O, tipo DOMO (apertura y cierre)	U	2	$ 261,45	$ 522,90
Suministro y tendido de cable canalizado 96 fibras ópticas monomodo G652.D	m	2677	$ 4,14	$ 11.082,78
Suministro y tendido de cable canalizado 6 fibras ópticas monomodo G652.D	m	1070	$ 2,11	$ 2.257,70
TOTAL				$ 15.623,82

3.1.5.2.2 Red de distribución

En la tabla 3.25, se muestra un detalle de los precios de los elementos pasivos que intervienen en el diseño de la red de distribución.

Tabla 3.25. Precios de los elementos pasivos de la red de distribución *[81]*

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
Suministro y colocación de manga subterránea porta splitter de 96 fusiones, tipo DOMO (apertura y cierre)	U	3	$ 605,54	$ 1.816,62
Suministro y colocación de manga subterránea porta splitter de 48 fusiones, tipo DOMO (apertura y cierre)	U	1	$ 427,83	$ 427,83
Suministro y colocación de caja de distribución aérea NAP de 16 puertos SC/APC	U	136	$320,03	$ 43.524,08
Suministro y colocación de caja de distribución aérea NAP de 12 puertos SC/APC con derivación	U	6	$236,78	$ 1.420,68
Suministro y colocación de caja de distribución aérea NAP de 12 puertos SC/APC sin derivación	U	2	$221,41	$ 442,82
Suministro y colocación de caja de distribución principal (FDB) 48 puertos SC/APC	U	2	$1.438,77	$2.877,54
Suministro y colocación splitter PLC (1x8) para fusión	U	20	$57,02	$ 1.140,40
Suministro y colocación splitter PLC (1x16) para fusión	U	142	$120,18	$ 17.065,56
Suministro y tendido de cable aéreo ADSS de fibra óptica monomodo de 12 hilos G.652.D vano 120 metros	m	20072.10	$ 2,47	$ 49.578,09
Suministro y tendido de cable aéreo ADSS de fibra óptica monomodo de 6 hilos G.652.D vano 120 metros	m	3268	$ 2,23	$ 7.287,64

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
TOTAL				$ 125.581,26

3.1.5.2.3 Red de dispersión

En la tabla 3.26, se muestra un detalle de los precios de los elementos pasivos que intervienen en el diseño de la red de dispersión.

Tabla 3.26. Precios de los elementos pasivos de la red de dispersión *[81]*

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio Total
Suministro y colocación de roseta óptica 2 puertos SC/APC	U	2210	$ 21,58	$ 47.691,8
Suministro y colocación de Patch-cord SC/APC-SC/APC 3 metros G.652.D en el lado de la ONT.	U	2210	$11,60	$ 25.636
Suministro y tendido de cable aéreo de 2 fibras ópticas G.657A1 (DROP) 6mm	m	221000	$ 1,24	$ 274.040
TOTAL				$ 347.367,8

3.1.5.3 Presupuesto total de la red NG-PON2

El presupuesto total del diseño de la red NG-PON2 viene dada por la suma de los suministros, colocación y tendido de todos los elementos activos y pasivos que intervienen en cada tramo de la red.

En la tabla 3.27, se muestra el precio total de los elementos activos y pasivos de la red NG-PON2.

Tabla 3.27. Precio total de la red NG-PON2. Fuente: El autor

Tramo de la red NG-PON2	Precio total
Elementos activos	$ 184.656,35
Red de alimentación	$ 15.623,82
Red de Distribución	$ 125.581,26

Tramo de la red NG-PON2	Precio total
Red de Dispersión	$ 347.367,8
Total	$ 673.229,23

Se debe señalar que, los precios de los elementos activos y pasivos mencionados anteriormente incluyen IVA, según las memorias técnicas de la CNT EP y los distintos trabajos de titulación, los cuales se encuentran vigentes y han sido utilizados como fuente de sustentación para realizar el presupuesto referencial de la red NG-PON2. Por otro lado, como se mencionó en la sección 2.2.3.1, el porcentaje de aceptación y el número de clientes potenciales dentro del área de interés es alta, lo cual indica que de llevarse a cabo la implementación de la red NG-PON2 a futuro, será factible, ya que el presupuesto total del proyecto se estima financiarse sin problemas por las ganancias obtenidas mediante las prestaciones de servicio de la red, dentro del lapso de 5 años.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La parroquia de Sangolquí es considerada un sector totalmente urbano, por lo que está en constante crecimiento y requiere de servicios que mejoren la calidad de vida de sus habitantes, por lo tanto, en cuanto al acceso a servicios de telecomunicaciones, el presente diseño de la red de acceso con tecnología NG-PON2 presenta una de las opciones más prometedoras para cumplir con los requerimientos que exigen la evolución de los diferentes servicios de telecomunicaciones, en especial aquellos que conforman el paquete triple play; así como la excesiva demanda de los usuarios finales de cara al futuro.

- La tecnología NG-PON2 surge como el primer estándar PON que permite operar bajo múltiples longitudes de onda con el propósito de incrementar el ancho de banda total del canal, así mismo, incorpora dispositivos terminales sintonizables (colorless) que permiten filtrar las longitudes de onda correspondientes a sistemas NG-PON2.

- Las ODN de las redes XPON (GPON, EPON, GEPON, entre otras) y NG-PON (XG-PON y NG-PON2) presentan características de compatibilidad, por lo que, todas estas tecnologías pueden coexistir sobre la misma infraestructura de fibra óptica, reduciendo costos de implementación; y, por consiguiente, ofreciendo paquetes de servicio asequibles a los clientes finales.

- La tecnología NG-PON2 presenta ventajas de escalabilidad y flexibilidad, ya que tiene la capacidad de adaptarse y usar cualquier parte del espectro correspondiente a los sistemas PON heredados siempre que estos no estén operando sobre la misma ODN, lo cual permite el crecimiento de la capacidad de la red.

- Los escenarios de migración PON brownfield son la mejor alternativa para garantizar una migración fluida de los sistemas PON heredados hacia NG-PON2, ya que el traslado de aquellos clientes que requieren un mayor ancho de banda se lo realiza asegurando una interrupción mínima del servicio debido a la total coexistencia que existe entre la red NG-PON2 y sus tecnologías predecesoras.

- La capacidad que disponen las redes de nueva generación (NG-PON), es adecuada para soportar el gran ancho de banda que actualmente exigen los usuarios tanto residenciales como empresariales para satisfacer servicios tales como: Internet de

alta velocidad, audio y video de ultra alta definición (4K y 8K), telefonía IP; así como parte de la infraestructura de los servicios móviles 4G y 5G, entre otros.

- El contrato de servicios triple play es una de las mejores alternativas económicas, ya que por el lado del proveedor permite explotar el gran ancho de banda que disponen las redes de nueva generación, así como también la reducción de los costos de mantenimiento y operación de la red debido a que los servicios que conforman el paquete triple play son entregados al cliente final por un solo enlace físico, y por el lado del cliente final existe una reducción en la facturación.

- En el diseño de la red NG-PON2, se ha optado por dividir el área de cobertura en 4 distritos en lugar de 3, ya que un número mayor de distritos permite obtener una cantidad de clientes finales unificada y moderada, evitando utilizar las reservas de los hilos de fibra destinadas para una posible expansión futura de la red en cada distrito.

- Para el diseño de las redes de alimentación y distribución se ha utilizado la fibra G.652.D, debido a sus características de trabajar a altas velocidades, espectro expandido y baja dispersión cromática; lo cual se acopla a los requerimientos de las redes NG-PON2 y sus tecnologías predecesoras. Por otro lado, la fibra G.657.A ha sido utilizada para el tramo de la red de dispersión, ya que introduce bajas pérdidas ante las curvaturas a las que está expuesta la fibra durante su trayecto, en específico en los ambientes internos donde está ubicada la ONT del cliente final.

- Para elegir los elementos activos de la red diseñada, se ha considerado las características de compatibilidad entre NG-PON2 y sus tecnologías predecesoras, en específico se ha elegido equipos activos pertenecientes a XG-PON, la cual es la tecnología base para llevar a cabo el funcionamiento de NG-PON2, ya que esta tecnología utiliza 4 longitudes de onda con capacidad XG-PON.

- Como parte del diseño de la red NG-PON2 se introduce un elemento multiplexor WM en el lado de la OLT, adecuado para combinar las 4 longitudes de onda propias de los sistemas NG-PON2 permitiendo incrementar la relación de división en los splitters y el ancho de banda de los clientes finales, esta característica es la única que la diferencia de los sistemas PON heredados, ya que la ODN también se mantiene totalmente pasiva.

- La ubicación de los elementos pasivos dentro de la red NG-PON2 diseñada, tales como mangas porta splitters y cajas de distribución, se centralizó con el propósito

de abarcar la mayor cantidad de clientes dentro del área de cobertura, y al mismo tiempo posibilitar que los dispositivos terminales de los clientes más lejanos a la OLT puedan soportar las pérdidas ocasionadas por la distancia del trayecto de la fibra óptica.

- En el diseño de la red de dispersión se ha considerado la reserva correspondiente de los puertos en las cajas NAP, esto con la finalidad de solucionar las posibles averías, de las cuales ninguna red física está exenta, y de esta manera evitar la interrupción del servicio y las molestias que generan a los clientes finales.

- La recomendación G.989.1 correspondiente a los sistemas NG-PON2 especifica un despliegue de fibra óptica mínima de 40 km y una relación de división en los splitters de 1:256, este criterio teórico está realmente limitado por las pérdidas introducidas en el trayecto óptico, ya que como se demostró en la red diseñada, el presupuesto de potencia óptico del cliente más lejano con una distancia aproximada de 4.2 Km, una relación de división en los splitters de 1:128 y clase N1 con pérdidas máximas de 29 dB en la ODN, el nivel de potencia que llega a los receptores de los equipos terminales es muy ajustada en comparación a los niveles de sensibilidad, lo cual indica que los sistemas NG-PON2 son aptos para soportar una gran cantidad de clientes finales pero ven comprometida su capacidad debido a la distancia de cobertura.

- Debido a la reciente aparición de la recomendación ITU-T G.989.1, la cual describe los requerimientos básicos de la capa física de los sistemas NG-PON2 tales como: ancho de banda, plan de longitudes de onda, niveles de potencia, entre otros, las industrias que dominan el mercado de las redes PON aún no disponen de equipos específicos que cumplan con los requerimientos propios de las redes NG-PON2, por lo tanto, los escenarios de coexistencia y la reutilización de la infraestructura de las ODN pertenecientes a los sistemas PON heredados, ha permitido establecer los costos referenciales de los equipos activos y pasivos que supondrían pertenecer a NG-PON2.

- El presupuesto referencial de la red NG-PON2 diseñada, permite obtener una visión general del costo total de los elementos activos y pasivos que forman parte del diseño, esto con la finalidad de conocer la factibilidad de implementar la red a futuro.

4.2 RECOMENDACIONES

- Para dar servicio a aquellos sectores donde existe una gran cantidad de usuarios ubicados a largas distancias, se recomienda diseñar la ODN con dos o más niveles de splitters que sobrepasen la relación de división de 1:32, esto con el propósito de obtener varias ramificaciones del cable de fibra y cubrir gran parte del área de cobertura.

- Para aquellos escenarios donde se prevé una futura migración de la red hacia tecnologías de mayor capacidad, se recomienda utilizar una arquitectura en cascada, la cual utiliza dos o más niveles de splitters que permiten la modificación de la relación de división en la ODN hacia una superior, por consiguiente, es factible realizar la migración de redes GPON y XG-PON hacia NG-PON2.

- Dentro del presupuesto de potencia óptico para el cliente más lejano a la OLT, se recomienda utilizar un margen de seguridad igual a 3dB como parte de las pérdidas en la ODN, esto con el objetivo de que la red soporte las pérdidas que puedan insertarse a futuro debido a las modificaciones o expansiones que sufra la ODN, pero se debe tener en cuenta que al introducir este margen de seguridad el cálculo del presupuesto de potencia podría estar muy ajustado, lo que requerirá un aumento de la potencia de transmisión.

- Como parte del presupuesto óptico de potencia, se recomienda no exceder o bordear las pérdidas máximas y mínimas del trayecto óptico respectivamente, según la clase de ODN, ya que las mismas aseguran que los receptores tanto de la OLT u ONT puedan obtener una señal con un nivel de potencia mayor al umbral de sensibilidad que permita su correcto funcionamiento o un nivel de potencia menor al umbral de saturación que no sature o queme los equipos.

- Dentro del mercado de las redes de acceso óptico existen una gran variedad de fabricantes y marcas encargadas de suministrar los equipos activos y pasivos para la implementación de redes XPON, las mismas que cumplen con los parámetros básicos impuestos por los entes de estandarización tales como: niveles de potencia, sensibilidad, relación de división, entre otros; pero difieren en parámetros como pérdidas de inserción, conexión, fusión, etc. Por lo tanto, se recomienda usar equipos del mismo fabricante ya que existe total compatibilidad de equipos y una posible reducción de las pérdidas totales.

- Las inversiones en caso de llegar a implementarse la red deben ser graduales e ir incrementando según la demanda de los clientes finales, ya que la red debe incrementar su capacidad acorde con el crecimiento de la demanda, para lo cual lo ideal sería iniciar el despliegue de la red con la cantidad de clientes finales de la demanda actual, esto con la finalidad de evitar una inversión excesiva al inicio del despliegue de la red y un posible sobredimensionamiento de la misma.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Xperts Factory, "Xperts Factory," [Online]. Available: https://xpertsfactory.com/wp-content/uploads/2018/08/Libro-de-Fibra-optica-pdf.pdf. [Accessed Febrero 2020].

[2] M. S. González, Diseño de redes telemáticas, Madrid: RA-MA, 2014, pp. 86-88.

[3] M. C. E. Boquera, Comunicaciones Ópticas, Madrid: Díaz de Santos, S.A., 2005, p. 15.

[4] L. S. Criollo Caizaguano , Diseño de una red convergente de fibra óptica para interconectar los campus de la universidad de las Américas, Quito: Pontíficia Universidad Católica del Ecuador, 2015.

[5] C. A. Geronimo Mayor, "issuu," 8 Mayo 2014. [Online]. Available: https://issuu.com/cesargeronimo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas. [Accessed Febrero 2020].

[6] J. . R. Blasco Fernández, "Óptica geométrica," [Online]. Available: https://sites.google.com/site/geometricaoptica/reflexion-y-refraccion-reflexion-total. [Accessed Junio 2020].

[7] Instituto Tecnológico de la laguna, "Fundamentos de Fibra Óptica," [Online]. Available: https://silo.tips/download/fundamentos-de-fibra-optica.

[8] B. L. Velasco Rivera, Diseño y simulación de una red GPON para ofrecer el servicio triple play en el sector de San Antonio de Ibarra para la CNT-EP, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[9] P. A. Castañeda Romero , Análisis y Simulación del Fenómeno de Dispersión Cromática en las Fibras Ópticas Monomodo ITU-T G.652 e ITU-T G.655, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[10] Instituto Técnologico de Aguascalientes, "Telecomunicaciones TICS," 2014. [Online]. Available: https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/. [Accessed Febrero 2020].

[11] W. Tomasi , Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México: Pearson Educación, 2003, pp. 425-444.

[12] A. F. Cabezas and R. A. Pinto García , Sistemas de Comunicaciones Ópticas, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2014, pp. 42-43.

[13] J. A. Martín Perada, Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones, Madrid: Pearson Educación, 2004, pp. 50-52.

[14] M. S. Jiménez Jiménez , *Comunicaciones Opticas,* Quito: Apuntes en clases, 2017.

[15] P. Chakrabarti, Optical Fiber Communication, India: McGraw Hill Education, 2015.

[16] SlideShare, "SlideShare," 13 agosto 2013. [Online]. Available: https://es.slideshare.net/kikemat/la-dispersion. [Accessed febrero 2020].

[17] Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, "Características de transmisión de fibras ópticas," [Online]. Available: https://www.iuma.ulpgc.es/. [Accessed febrero 2020].

[18] O. M. Santa Cruz , "Modulo Introductorio Principios Generales del Sistema de Fibra Óptica," 31 Julio 2010. [Online]. Available: https://www.frc.utn.edu.ar/dispensador.frc?iDs=18. [Accessed Marzo 2020].

[19] B. E. Ayala Martínez, Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones, Quéretaro: Centro Nacional de Metrología, México, 2011.

[20] H. Raj, "Optical Time Division Multiplexing (OTDM)," in *Institute of Technology, Nirma University*, Ahmedabad, 2013.

[21] D. P. Cando Garzón , Análisis y simulación de la capacidad de escalabilidad de una red nacional DWDM para que opere a 128 lambdas, Quito: Pontifica Universidad Católica del Ecuador, 2015.

[22] ITU International Telecommunication Union, "Recomendacion G.694.2," 14 Diciembre 2003. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I.

[23] ITU International Telecommunication Union, "Recomendación G.694.1," 13 Febrero 2012. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I.

[24] S. Moreno , D. Torres and G. Puerto , "Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y RAMAN," *Rev. Ing. Investig. Desarro,* vol. 18, no. 2, pp. 22-28, 2018.

[25] M. C. España Boquera, Servicios Avanzados de Telecomunicaciones, Madrid: Díaz de Santos, S.A., 2003, pp. 125-126.

[26] J. LLoret Mauri , M. García Pineda and F. Boronat Seguí , IPTV: la televisión por internet, España: Vértice, 2008, pp. 11-160.

[27] L. M. Toapanta Mejía , Ánalisis técnico comparativo entre LR-PON y XPON, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[28] C. Radicelli , M. Pomboza , N. Samaniego and E. Villacrés , "Red óptica pasiva para proveer de Internet a la ciudad de Riobamba-Ecuador," *Espacios,* vol. 40, no. 40, p. 12, 2019.

[29] F. Effenberger, D. Cleary, O. Haran, G. Kramer, R. Ding Li, M. Oron and T. Pfeiffer, "An introduction to PON technologies [Topics in Optical Communications]," *IEEE Communications Magazine,* vol. 45, no. 3, p. 18, 2007.

[30] A. Sendín Escalona , Tecnologías de acceso para las ICTs. El instalador, los servicios y las redes de telecomunicaciones, Barcelona: Experiencia, S.L., 2008, pp. 141-143.

[31] I. V. Jaya Riofrío, Diseño de una red pasiva GPON de planta externa para el barrio Capelo en la provincia de Pichincha, Quito: Pontificia Universidad Cátolica del Ecuador, 2016.

[32] Full Service Access Network, "Next Generation Task Group," 2010. [Online]. Available: http://www.fsan.org/task-groups/ngpon/. [Accessed mayo 2020].

[33] ITU International Telecommunication Union, "Recomendacion G.987.1," Marzo 2016. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201603-I. [Accessed mayo 2020].

[34] J. M. Moreno Manzanares, Estudio tecno-económico del despliegue del estándar NG-PON2 sobre infraestrucutura óptica heredada, Cataluña: Universitat Oberta de Catalunya, 2018.

[35] Full Service Access Network, "Full Service Access Network Organization Recommends Path for Next-Generation PON Technology," Julio 2012. [Online]. Available: https://www.fsan.org/full-service-access-network-organization-recommends-path-for-next-generation-pon-technology/. [Accessed Mayo 2020].

[36] Y. Luo, X. Zhou , F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian and Y. Ma, "Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)," *IEEE Journal of Lightwave Technology,* vol. 31, no. 4, pp. 587-593, 2013.

[37] ITU International Telecommunication Union, "Recomendación G.989.1," Marzo 2013. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I. [Accessed Mayo 2020].

[38] F. Pérez Igualada, Diseño de un conjunto de escenarios de uso y de recomendaciones para una futura migración de las redes de acceso de nueva generación, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2016.

[39] ITU International Telecommunication Union, "Recomendación G.989.2," Febrero 2019. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201902-I. [Accessed Mayo 2020].

[40] JDSU, Triple-Play Service Deployment A Comprehensive Guide to Test, Measurement, and Service Assurance, California: JDS Uniphase Corporation, 2007.

[41] E. J. Coronel González and M. E. Morocho Cayamcela, "Integration of a triple-play platform service to the GPON infrastructure of the National Telecommunications Corporation of Ecuador," in *IEEE ANDESCON*, Cochabamba, 2014.

[42] M. E. Morocho Cayamcela, Estudio y análisis de integración de la plataforma de servicio triple-play a la infraestructura GPON de la coorporación nacional de telecomunicaciones CNT E.P. agencia Azogues, Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana Sede Cuenca, 2014.

[43] "Blog de Fibra Óptica y Redes del CIFP Tartanga," 1 Enero 2015. [Online]. Available: http://fibraoptica.blog.tartanga.eus/2015/01/01/iptv-la-alternativa-al-sistema-

analogico-rf-overlay-para-la-senal-de-television-en-redes-de-fibra-optica/. [Accessed Mayo 2020].

[44] L. D. Vízacaino Armas , "Diseño de una red GPON en el Nodo Caranqui para el sector 19 de enero de la ciudad de Ibarra, basado en el estándar ITU-T G.984, para CNT EP," Febrero 2016. [Online]. Available: http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4621. [Accessed mayo 2020].

[45] Rumiñahui Gobierno Municipal, "GADM Rumiñahui," [Online]. Available: http://www.ruminahui.gob.ec/rumi3/. [Accessed Noviembre 2020].

[46] L. E. Gavilanes Rodríguez, Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial 2012-2015 "Actualizacion 2014-2019", Sangolquí, 2014.

[47] INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos, "Población y tasas de crecimiento intercensal de 2010-2001-1990 por sexo, según parroquias," [Online]. Available: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/?s=poblacion+y+tasas+de+crecimiento+. [Accessed Noviembre 2020].

[48] Avanza Solutiuons, "Como se despliega una red de fibra óptica FTTH," [Online]. Available: https://www.avanzasolutions.es/como-despliega-avanza-solutions-una-red-de-fibra-optica. [Accessed Noviembre 2020].

[49] ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, "Servicio de Telefonía Fija "STF"," [Online]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/servicio-de-telefonia-fija2/. [Accessed Diciembre 2020].

[50] ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, "Servicio de Acceso a Internet "SAI"," [Online]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/servicio-de-acceso-a-internet-sai2/. [Accessed Diciembre 2020].

[51] ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, "Servicio de Suscripción - Televisión Pagada "STV"," [Online]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/servicio-suscripcion-television-pagada/. [Accessed Diciembre 2020].

[52] ARCOTEL Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, "Boletín Estadístico del Sector de las Telecomunicaciones," 2020. [Online]. Available: http://www.arcotel.gob.ec/boletines-estadisticos/. [Accessed Diciembre 2020].

[53] CNT EP Corporación Nacional de Telecomunicaciones, "Planes Telefonía Fija," [Online]. Available: https://www.cnt.com.ec/productos/planes-telefonia-fija. [Accessed Diciembre 2020].

[54] CNT EP Corporación Nacional de Telecomunicaciones, "Planes de Internet," [Online]. Available: https://www.cnt.com.ec/productos/planes-internet. [Accessed Diciembre 2020].

[55] CNT EP Corporación Nacional de Telecomunicaciones, "Planes de Televisión," [Online]. Available: https://www.cnt.com.ec/productos/planes-television. [Accessed Diciembre 2020].

[56] Netlife, "Planes para el Hogar," [Online]. Available: https://www.netlife.ec/planes-hogar/. [Accessed Diciembre 2020].

[57] Netlife, "Planes PYME," [Online]. Available: https://www.netlife.ec/planes-pymes/#2. [Accessed Diciembre 2020].

[58] Directv, "Planes TV," [Online]. Available: https://www.directv.com.ec/comprar/planes-tv. [Accessed Diciembre 2020].

[59] CONECEL S.A., "Internet," [Online]. Available: https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-hogar/internet/planes-y-precios/. [Accessed Diciembre 2020].

[60] CONECEL S.A., "Internet Fibra Óptica," [Online]. Available: https://www.claro.com.ec/negocios/servicios/internet/internet-fibra-optica/planes-y-precios/. [Accessed Diciembre 2020].

[61] Fibramax, "Servicio de Internet," [Online]. Available: http://fibramax.ec/planes/. [Accessed Diciembre 2020].

[62] D. J. Pérez , "Cálculo del Crecimiento de la Población," Junio 2010. [Online]. Available: https://apuntesdedemografia.com/curso-de-demografia/temario/tema-3-crecimiento-y-estructura-de-la-poblacion/calculo-del-crecimiento-de-la-poblacion/. [Accessed Enero 2021].

[63] CNT EP Corporación Nacional de Telecomunicaciones, Normativa técnica de diseño de planta externa con fibra óptica (ODN - Optical Distribution Network), Quito: Gerencia de Ingeniería e Implementación, 2019.

[64] A. Rodríguez , "la velocidad de internet es un reto al que se enfrenta el Ecuador," *El Comercio,* 8 Octubre 2020.

[65] J. Dueñas , "Cuál es la velocidad de acceso a internet ideal para tu compañía," Enter.CO, 27 Septiembre 2018. [Online]. Available: https://www.enter.co/empresas/velocidad-internet-empresas/. [Accessed Enero 2021].

[66] Comunidad FS, "Fibra monomodo G.652," [Online]. Available: https://community.fs.com/es/blog/is-g652-single-mode-fiber-your-right-choice.html. [Accessed Febrero 2021].

[67] Beyontech, "Diferencias entre las fibras monomodo," [Online]. Available: https://beyondtech.us/blogs/beyondtech-en-espanol/cuales-son-las-diferencias-entre-las-fibras-opticas-monomodo-g-652-y-g-655. [Accessed Febrero 2021].

[68] ITU International Telecomunication Union, "Recomendación G.657," [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201611-I. [Accessed Febrero 2021].

[69] Huawei, "Smart NG-OLT MA5800," [Online]. Available: https://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network/access/olt/smart-ng-olt-ma5800. [Accessed Febrero 2021].

[70] Acfornet, "Inteligente NG-OLT MA5800," [Online]. Available: https://actfornet.com/huawei-access/ma5800.html. [Accessed Febrero 2021].

[71] Huawei, "Dispositivo de agregación inteligente NG-PON SmartAX EA5800," [Online]. Available: https://e.huawei.com/es/products/enterprise-transmission-access/access/olt/ea5800. [Accessed Febrero 2021].

[72] Hilink, "XWDM Pasivo," [Online]. Available: https://www.hilinktech.com/passive-xwdm/. [Accessed Febrero 2021].

[73] FS, "Mux Demux y OADM," [Online]. Available: https://www.fs.com/mx/c/mux-demux-oadm-6. [Accessed Febrero 2021].

[74] Hisense Broadband, "NGPON2," [Online]. Available: http://www.hisensebroadband.com/html/Solutions/Access/NGPON_2/index.html. [Accessed Febrero 2021].

[75] Huawei, "Terminales Ópticos - Huawei OptiXstar," [Online]. Available: https://e.huawei.com/es/products/enterprise-transmission-access/terminal. [Accessed Febrero 2021].

[76] J. A. Molina Rodríguez, "Enlace de fibra óptica de trayecto largo entre las ciudades de Bogotá y Cúcuta," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2018.

[77] J. E. Campos Velasco and C. J. Romo Morales , Diseño de una red de acceso para brindar servicios triple play con tecnología GPON (Gigabit-Capable Passive Optical Network) y plan de certificación de la ODN (Optical Distribution Network) implementada para el sector "EL DORADO" en la ciudad de Puyo, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2019.

[78] CNT Corporación Nacional de Telecomunicaciones, "Cable canalizado de fibra optica G.652.D," [Online]. Available: https://institucional.cnt.com.ec/especificaciones-tecnicas. [Accessed Abril 2021].

[79] ITU International Telecommunication Union, "Recomendacion G.657," [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201611-I. [Accessed Abril 2021].

[80] CNT Corporación Nacional de Telecomunicaciones, Capacitacioón Diseño de ODN, Quito, 2018.

[81] CNT Corporación Nacional de Telecomunicaciones, Memoria Técnica - Fibra óptica redes de acceso, Quito, 2015.

[82] YCICT, "Terminal de Huawei," [Online]. Available: https://www.ycict.com/huawei/huawei-access.html. [Accessed mayo 2021].

ANEXOS

ANEXO A. Características de OLT de diferentes proveedores.

ANEXO B. Características de tarjetas de servicio de la marca Huawei.

ANEXO C. Características de ONT de diferentes proveedores.

ANEXO D. Ubicación de las cajas NAP y trayecto de la red de distribución para el distrito 2 y 3.

ANEXO E. Ubicación de las cajas NAP, FDB y trayecto de la red de distribución para el distrito 4.

ANEXO F. memorias técnicas CNT EP.