



**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones**

Red acceso óptica para la modernización de la planta  
externa en el municipio Manzanillo

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Telemática**

**Maestría en Telemática**

Autor: Ing. Dilber Rosabal Montero  
Tutor: Dr. C. Miguel Arturo Mendoza Reyes

Santa Clara, Cuba, 2016

*Una de las principales enfermedades del hombre es su inquieta curiosidad por conocer lo que no puede llegar a saber.*

**Blaise Pascal**

*A mis padres, Oneida y Emiliano Wilfredo.*

*A mi esposa Yamilé y a mi hijo Diago.*

*A mi hermano Wilín y mi hermana Yunaisis.*

*A toda mi familia.*

## AGRADECIMIENTOS

---

Quiero agradecer a mi tutor Miguel Arturo Mendoza Reyes y a Manleys Rodríguez Torres, por sus sugerencias durante esta etapa de la vida. Sus consejos han contribuido a mi desarrollo personal y profesional.

A los profesores de la Maestría en Telemática, por sus enseñanzas en cada sesión de clases, las cuales he podido aplicar durante mi desempeño como profesor en la UDG.

A toda mi familia, en especial a mis padres Oneida y Emiliano Wilfredo, mi esposa Yamilé y mi niño Diago, así como a Ada, Ramón, Olideisis, Armando (Papo), Lisdanis, Ariel, Leonardo y amigos de la familia, que una vez más me han apoyado en todo lo necesario para continuar mis estudios, esta vez en Villa Clara.

A mis amigos, Leonel, mi compañero de estudio de postgrado, Yenner, Yusdanis, Leodanis, Abel, Yusbel, Harold, Elieser, Alex, Alín, Darel, Leover, Ernesto, Yuniel, Saylín, Yisel, Cecilia, Eriberto, Adriel (Segundo), Wilfredo, Erick, Frank, Luis, Wilder, Erick, Alberto, Erodís, Ramón, María Isabel, Arelys, Yuniesky, Amed, José Rosales, Jorge, por su ayuda y sus criterios oportunos durante el desarrollo de la investigación y mi vida laboral, en general.

A mis compañeros de la Maestría en Telemática y del Doctorado en Ciencias de la Computación que compartimos todo este tiempo de estudio en la UCLV.

A los especialistas de la División Territorial Granma de ETECSA, al Grupo de Desarrollo de la Red, con los cuales establecí buenas relaciones personales y de trabajo, así como los especialistas de la Dirección Provincial de Planificación Física Granma, de su sede municipal en Manzanillo, de la ONEI Granma y los compañeros de la Dirección de Informatización de la Universidad de Granma, por la buena atención prestada y su colaboración para el desarrollo de la investigación.

A todos los que contribuyeron con el desarrollo de esta investigación.

## RESUMEN

---

El desarrollo de las redes ópticas pasivas ha permitido el surgimiento de nuevos servicios de banda ancha que requieren cada día mayor velocidad de transmisión. Este trabajo consiste en el diseño de una red de acceso óptica, apoyado en la información geográfica de la infraestructura existente, para la modernización de la planta externa de ETECSA que garantice los requerimientos de los servicios de banda ancha en el municipio Manzanillo de la provincia de Granma. En la investigación se valoran las tecnologías de fibra óptica como solución para reducir las limitaciones de las redes sobre par de cobre. Además, se expone la importancia del manejo de la información geográfica en el diseño de redes FTTx. Específicamente, se diseñó la topología de la red con el apoyo del QGIS v2.12.1-Lyon y el diseñador FiberPlanIT v1.7.2, con los cuales se obtuvo las localizaciones de los principales elementos de la red GPON. Se demostró la factibilidad técnica de la propuesta mediante el cálculo de enlaces ópticos y la simulación de la red mediante el Optisystem v7.0. La valoración económica tuvo en cuenta el equipamiento elegido y el costo de los materiales para la implementación de la propuesta. Además la reutilización de la ubicación de la central telefónica y los postes en explotación permitió reducir la inversión inicial de la red. De esta manera, se contribuye al logro de las metas de desarrollo planteadas en el programa “Conectar 2020” de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

**Palabras claves:** red de acceso óptica, diseño de red, información geográfica, GPON

# ABSTRACT

The development of passive optical networks has allowed the emergence of new broadband services that require higher transmission rates. This work is about of an optical access network design, supported in the geographic information of the existing infrastructure, for the modernization of the outside plant of ETECSA that ensures the broadband services requirements in the Manzanillo municipality of the Granma province. In the research, the optical fiber technologies as a solution for reducing the copper pair-based network limitations are valued. In addition, the importance of the geographic information in the FTTx network design is exposed. Specifically, the network topology with the support of the QGIS v2.12.1-Lyon and the FiberPlanIT Dessigner v1.7, with which was obtained the main elements locations of the GPON network was designed. The technical feasibility of the proposal through the optical link calculation and the network simulation using Optisystem v7.0 was demonstrated. The economic assessment took into account the chosen equipment and the cost of materials for the implementation of the proposal. In addition, the reuse of the central office and the existing poles location allowed reducing the initial investment of the network. In this way, it contributes to the achievement of the development goals raised in the "Connect 2020" agenda of the ITU.

**Key words:** optical access network, network design, geographic information, GPON

# ÍNDICE GENERAL

---

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                                                                    | <b>1</b>  |
| <b>1. Redes de acceso y sistemas de información geográfica</b>                                         | <b>7</b>  |
| 1.1. Planta externa de la red de acceso . . . . .                                                      | 7         |
| 1.2. Red de acceso basada en cobre . . . . .                                                           | 9         |
| 1.3. Red de acceso óptica . . . . .                                                                    | 10        |
| 1.3.1. Red óptica activa . . . . .                                                                     | 13        |
| 1.3.2. Red óptica pasiva . . . . .                                                                     | 14        |
| 1.4. Red óptica pasiva con capacidad de gigabit . . . . .                                              | 16        |
| 1.5. Red óptica pasiva de próxima generación . . . . .                                                 | 17        |
| 1.5.1. NG-PON 1 . . . . .                                                                              | 18        |
| 1.5.2. NG-PON 2 . . . . .                                                                              | 19        |
| 1.6. Diseño de redes de acceso cableadas de banda ancha . . . . .                                      | 23        |
| 1.6.1. Sistema de información geográfica . . . . .                                                     | 24        |
| 1.6.2. Empleo de la información geográfica en el diseño de redes de acceso de<br>banda ancha . . . . . | 25        |
| 1.7. Conclusiones del capítulo . . . . .                                                               | 29        |
| <b>2. Diseño de red de acceso de banda ancha</b>                                                       | <b>31</b> |
| 2.1. Solución general . . . . .                                                                        | 31        |
| 2.2. Servicios de telecomunicaciones . . . . .                                                         | 33        |
| 2.3. Datos GIS . . . . .                                                                               | 34        |
| 2.4. Especificaciones de diseño de la red óptica pasiva . . . . .                                      | 36        |
| 2.4.1. Localización de la OLT . . . . .                                                                | 38        |
| 2.4.2. Localización de los divisores ópticos . . . . .                                                 | 39        |
| 2.4.3. Localización de las terminales de red óptica . . . . .                                          | 40        |
| 2.4.4. Distribución del cable de fibra óptica . . . . .                                                | 40        |
| 2.4.5. Escenarios de diseño de la ODN . . . . .                                                        | 41        |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5. Propuesta de equipamiento . . . . .                              | 43        |
| 2.6. Diseño de la red de fibra óptica con GIS . . . . .               | 47        |
| 2.7. Validación técnico-económica . . . . .                           | 48        |
| 2.7.1. Cálculo de presupuesto de potencia del enlace óptico . . . . . | 48        |
| 2.7.2. Cálculo de presupuesto económico . . . . .                     | 50        |
| 2.8. Conclusiones del capítulo . . . . .                              | 51        |
| <b>3. Validación del diseño propuesto</b>                             | <b>52</b> |
| 3.1. Dimensionamiento de la red . . . . .                             | 52        |
| 3.1.1. Descripción de la región de estudio . . . . .                  | 52        |
| 3.1.2. Requerimientos de velocidad . . . . .                          | 53        |
| 3.2. Diseño de la red de acceso óptica . . . . .                      | 54        |
| 3.3. Análisis de presupuesto de potencia óptica . . . . .             | 57        |
| 3.4. Simulación de la red . . . . .                                   | 58        |
| 3.4.1. Resultados de la simulación . . . . .                          | 60        |
| 3.5. Valoración económica . . . . .                                   | 63        |
| 3.6. Conclusiones del capítulo . . . . .                              | 64        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                                                   | <b>65</b> |
| <b>RECOMENDACIONES</b>                                                | <b>67</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                     | <b>68</b> |
| <b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>                                           | <b>74</b> |
| <b>A. Tecnologías de banda ancha soportadas sobre par de cobre</b>    | <b>78</b> |
| <b>B. Tecnologías de acceso ópticas</b>                               | <b>79</b> |
| <b>C. Diseño de red de acceso óptica con GIS</b>                      | <b>80</b> |
| <b>D. Listado de materiales</b>                                       | <b>83</b> |
| <b>E. Costo e ingresos por clientes conectados</b>                    | <b>85</b> |



# INTRODUCCIÓN

---

El auge de las redes de acceso ha posibilitado la evolución de los servicios brindados por los operadores de telecomunicaciones a una arquitectura de servicios integrados de voz, video y datos, llamados *triple play*. En la actualidad, se pueden ofrecer aplicaciones como [1]: televisión de alta definición (HDTV, *High Definition Television*), telemedicina y otras, que necesitan de altas velocidades de transmisión y mayor calidad de servicio.

La comisión de banda ancha para el desarrollo digital, creada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), considera que los países deben usar estrategias y políticas para que la banda ancha sea costea-ble y esté disponible como herramienta vital para el avance sostenido de la sociedad moderna del conocimiento. Su uso en la vida diaria permitirá el acceso a los servicios de educación, cultura, entretenimientos, salud, servicios comerciales y financieros en formato digital [2].

Aunque inicialmente las redes de acceso estuvieron basadas en el par de cobre para la transmisión de voz y datos sobre la red telefónica pública conmutada (RTPC), las familias de tecnologías de línea de abonado digital (xDSL, *Digital Subscriber Line*) posibilitaron la extensión de la vida útil de la red de cobre y todavía tiene predominio para soportar la banda ancha. El principal inconveniente de las xDSL está dado por la disminución de la velocidad de transmisión con el aumento de la distancia entre el equipo del abonado y la central telefónica [3].

En el acceso se han utilizado también los cables coaxiales, los cuales soportan un mayor flujo de información. Este medio de transmisión ha tenido su aplicación en la red de distribución para la transmisión de televisión y acceso a Internet a través de la red híbrida de fibra coaxial (HFC, *Hybrid Fiber-Coaxial*), con lo que se obtiene una relación costo-beneficio superior [4]. A pesar de sus posibilidades, los medios

anteriores se han visto superados por las ventajas del uso de la fibra óptica en las redes de telecomunicaciones.

En la actualidad, los requerimientos de los servicios de banda ancha y la infraestructura de las redes FTTH deben ser garantizados por las redes de acceso ópticas de próxima generación (NGOA, *Next Generation Optical Access*) que utilizan la fibra óptica como medio de transmisión en la última milla. A partir de sus posibilidades, ellas se han convertido en una opción tecnológica viable para el acceso. Estas alcanzan largas distancias, reducen los problemas de ruido, atenuación e interferencias, al emplear como fuente de energía los emisores de luz y permiten atender a una mayor cantidad de usuarios al utilizar la multiplexación por división de longitud de onda.

Todo lo anterior, es una motivación para el cambio de las redes tradicionales de cobre a una infraestructura basada en fibra óptica. Este tipo de redes puede clasificarse de acuerdo a su cercanía hasta un determinado lugar (FTTx, *Fiber to the "x"*) como: fibra hasta el hogar o un edificio, fibra hasta un nodo, la acera o un gabinete en un vecindario [5, 6]; dichas arquitecturas son implementadas por los operadores de telecomunicaciones en función de sus requerimientos técnicos y funcionalidades. Para ello, se agrupan de acuerdo al uso de elementos activos entre la central telefónica y el equipo del usuario final, como red óptica activa y pasiva [7, 8], las cuales, según su topología de interconexión, pueden ser punto a punto y punto a multipunto [5].

El manejo de la información geográfica cobra cada día mayor importancia en disciplinas como: la agricultura, minería, hidráulica, medio ambiente y telecomunicaciones, en las que se trabaja con información georeferenciada [9]; en el campo de las comunicaciones, ha contribuido al planeamiento y diseño de redes de acceso basado en el empleo de los sistemas de información geográfica (GIS, *Geographic Information System*) o SIG, pues a través de los mismos se ha ganado en productividad y precisión de las tareas con los mapas digitales, apoyados anteriormente en la cartografía clásica [9].

En varios estudios se evidencia la importancia de la utilización de la información geográfica en el diseño de redes de acceso cableadas de banda ancha [10, 11, 12, 13]; los diferentes autores tienen en cuenta la distribución geográfica de la demanda de servicios de los clientes residenciales y no residenciales, la localización de la ruta que sigue la red aérea, soterrada, correspondiente a la red primaria y secundaria, soportada sobre cobre y fibra óptica, así como las características del equipamiento en explotación, su ubicación y la necesidad de su actualización para satisfacer los requerimientos de los usuarios en el área básica de una central telefónica. Con el empleo de la información geográfica de los elementos descritos anteriormente, se puede lograr la representación

de la red de acceso a implementar; por lo que el desarrollo y mantenimiento de la red en el futuro pueden realizarse ágilmente con el apoyo de los SIG.

El despliegue de soluciones de acceso ópticas que soporten altas velocidades posibilita un rápido desarrollo de la red de cobre. La red óptica pasiva pudiera constituir una solución para la actualización de la planta externa (OSP, *OutSide Plant*) de los operadores de telecomunicaciones; pues permite la migración de la red basada en cobre por fibra óptica en la red de alimentación y de distribución, disminuye el consumo de energía eléctrica y eleva el rendimiento de la red para garantizar el acceso a los servicios de banda ancha.

El diseño de la red de acceso óptica es una tarea compleja y constituye un factor importante en el adecuado despliegue de la red de acceso. Con el apoyo del SIG el especialista puede visualizar la disposición actual de los elementos de la red y reducir la necesidad de visitas físicas al lugar [14]. El proveedor de servicios de telecomunicaciones, mediante la utilización de la información georeferenciada de sus componentes en el terreno, puede obtener la cartografía digital de la OSP desplegada; lo que permite que sus actualizaciones se realicen en un menor tiempo y con un cálculo de los costos más reales [15, 16].

La Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A. (ETECSA) ha aprovechado las ventajas de los SIG a través de la experiencia adquirida por un grupo de especialistas de la empresa. Inicialmente, se realizaron esfuerzos para confeccionar una cartografía digital de la OSP que sirviera de base al planeamiento, análisis, proyección y operación de las redes de telecomunicaciones. Actualmente dicha tarea se ha realizado junto a GeoCuba. Asimismo, se han realizado varios intentos para la introducción de un SIG en los procesos empresariales, entre ellos está la aplicación de SigPex como prueba piloto, un sistema para la gestión de planta externa de redes de telecomunicaciones; además se han desarrollado trabajos de diploma de la especialidad de Telecomunicaciones y Electrónica, así como en Ciencias Informáticas. Estas investigaciones han permitido la ejecución de proyectos pilotos para el levantamiento cartográfico de la OSP en los municipios Bayamo y Manzanillo e integrar en dicho proceso un sistema de información geográfica.

En el municipio Manzanillo de la provincia de Granma existen importantes instituciones de educación, salud, empresas, comercios y hogares que pueden utilizar los servicios de banda ancha sobre redes de acceso fijas. La OSP en la región todavía presenta conexiones de una red rígida, lo que trae consigo mayor probabilidad de fallos en los pares y dificultad en su localización; también es insuficiente la capacidad del

equipamiento en explotación; por tanto, se limitan las posibilidades para alcanzar los objetivos propuestos por la UIT en el programa “Conectar 2020” [17].

El empleo de la información geográfica aún es pobre para la toma de decisiones sobre la modernización de la OSP en la región objeto de estudio; pues se deben realizar varias visitas al sitio objeto de análisis para la proyección de la red, lo que incide negativamente en el tiempo dedicado a dicha tarea técnica y su posterior despliegue. Existen limitaciones al realizar el proceso de planeamiento de la red de forma manual, pues es insuficiente la portabilidad y flexibilidad para la actualización de la información geográfica en el diseño de red, evidenciado en la limitada eficiencia en el uso de los recursos desplegados en la OSP. La situación antes expuesta provoca que se reduzcan las posibilidades de un cambio rápido de la red de cobre existente para llevar la fibra hasta el hogar.

Asimismo, el empleo de elementos activos como *switch* ópticos constituye una variante costosa en comparación con la utilización de dispositivos pasivos; por lo que se debe considerar dónde ubicar los elementos de la red de acceso óptica durante su migración para disminuir los costos de implementación.

De todo lo expuesto anteriormente, se deduce que es necesaria la modernización de la OSP de la red de acceso para brindar los servicios de telecomunicaciones acordes a estándares internacionales, así como satisfacer los requerimientos de crecimiento y diversificación de los servicios de banda ancha en la región; además de lograr la optimización de recursos y una productividad superior en los diferentes sectores de la sociedad.

A partir de la situación problemática expuesta se identifica el siguiente **problema científico**: ¿cómo contribuir a la modernización de la planta externa que garantice los requerimientos de los servicios de banda ancha en el municipio Manzanillo de la provincia de Granma?

De acuerdo al problema identificado, se declara como **objeto de estudio**: las redes de acceso cableadas de banda ancha.

Para dar solución al problema planteado, se define como **objetivo general**: proponer una red de acceso óptica, basado en el empleo de la información geográfica, para la modernización de la planta externa que garantice los requerimientos de los servicios de banda ancha en el municipio Manzanillo.

La investigación comprende como **campo de acción**: el diseño de la red de acceso óptica, basado en el empleo de la información geográfica.

Para dar cumplimiento al objetivo general, se definieron los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar las tecnologías de acceso de banda ancha soportadas sobre cobre y fibra óptica, así como el diseño de la red de acceso basado en el empleo de la información geográfica.
2. Diseñar la red de acceso óptica con el apoyo de la cartografía digital de base y de la planta externa del operador de telecomunicaciones en la región de estudio.
3. Evaluar técnica y económicamente la solución propuesta.

Para el desarrollo de la investigación se plantearon las siguientes **preguntas científicas**:

1. ¿Cuáles son las tecnologías de acceso de banda ancha soportadas sobre cobre y fibra óptica que pueden emplearse en la última milla de la red de telecomunicaciones?
2. ¿Cómo se utiliza la información geográfica en el diseño de la red de acceso cableada de banda ancha?
3. ¿Qué tecnologías de acceso ópticas garantizan los requerimientos de los servicios de banda ancha en la región de estudio?
4. ¿Cómo diseñar la red de acceso óptica mediante el manejo de la información geográfica?
5. ¿Cómo evaluar técnica y económicamente la solución propuesta?

Con la realización de la investigación se obtienen los siguientes **resultados**:

- Diseño de red de acceso óptica, basado en el empleo de la información geográfica para la modernización de la red de planta externa de ETECSA en el municipio Manzanillo de la provincia de Granma.
- Localización del primer y segundo nivel de divisores ópticos pasivos en la topología de la red de acceso óptica.

Durante el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos teóricos y empíricos. Entre los métodos teóricos se empleó el analítico-sintético, pues permitió el análisis de los elementos que conforman la planta externa de la red de telecomunicaciones, al tener en cuenta sus características fundamentales y los principales medios de transmisión cableados empleados; así como el estudio de los referentes teóricos sobre el desarrollo de las tecnologías surgidas para garantizar las velocidades que requieren los servicios de banda ancha soportados sobre par de cobre y fibra óptica; además

del importante papel que juega la utilización de la información geográfica de los elementos de la red de telecomunicaciones en su planeamiento y diseño, basados en la cartografía digital base y de la planta externa. El método inductivo-deductivo fue de utilidad para arribar a conclusiones parciales y finales, para la elección de las tecnologías de acceso que ofrecen una solución al problema planteado y la incorporación de datos geográficos en el diseño de la planta externa de la red de acceso en la región analizada. La modelación posibilitó la representación de la topología de la red propuesta en un mapa digital y su simulación.

Como método empírico se empleó la observación científica para diagnosticar la situación existente con la red de planta externa y los servicios de telecomunicaciones que se pueden ofrecer en el área objeto de estudio. Se efectuó la entrevista como técnica de recopilación de información para precisar el proceso de diseño de la red en la región. Se determinaron las tecnologías de banda ancha que se pudieran implementar y cuáles se han desplegado por ETECSA en la red de acceso de sus clientes de acuerdo a las políticas de la empresa.

La tesis está estructurada en introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, glosario de términos y anexos. En el primer capítulo se exponen las tecnologías de red de acceso soportadas sobre el par de cobre y fibra óptica usadas en el despliegue de soluciones de banda ancha en la última milla. Se muestran estudios sobre diseño de redes apoyados en el manejo de la información geográfica de la infraestructura de telecomunicaciones y de las regiones de demanda de servicios de banda ancha.

En el segundo capítulo se describen las características de la tecnología de acceso de banda ancha elegida. Se reflejan los criterios de diseño, se incluyen las consideraciones sobre la localización de los componentes de la OSP, para determinar la topología de la red basada en la información geográfica. Se describe la propuesta del equipamiento y su ubicación para el despliegue de la solución planteada.

En el último capítulo se presenta el diseño de la red de acceso óptica para la región objeto de estudio y se muestran los resultados de la utilización de la información geográfica de la OSP. La propuesta de solución se evalúa técnica y económicamente, mediante el cálculo de enlace, la simulación y el análisis de los costos de la red diseñada.

# CAPÍTULO 1

## Redes de acceso y sistemas de información geográfica

---

En el capítulo se exponen los aspectos fundamentales de la planta externa de la red de telecomunicaciones abordados durante la investigación. Se explican las tecnologías de red de acceso soportadas sobre par de cobre y fibra óptica que permiten el despliegue de soluciones de banda ancha en la última milla. Finalmente, se valoran varios estudios realizados sobre diseño de redes, apoyados en el manejo de la información geográfica de la infraestructura de telecomunicaciones y de las regiones identificadas, para ofrecer los servicios de banda ancha.

### 1.1. Planta externa de la red de acceso

El desarrollo de las redes de comunicaciones ha traído consigo la demanda creciente de nuevos servicios de telecomunicaciones, los cuales necesitan cada día mayor velocidad de transmisión. Son diversas las soluciones tecnológicas existentes para entregar los servicios de banda ancha hasta el usuario; de ahí que es necesaria la modernización de las redes tradicionales soportadas sobre par de cobre por una infraestructura basada en fibra óptica.

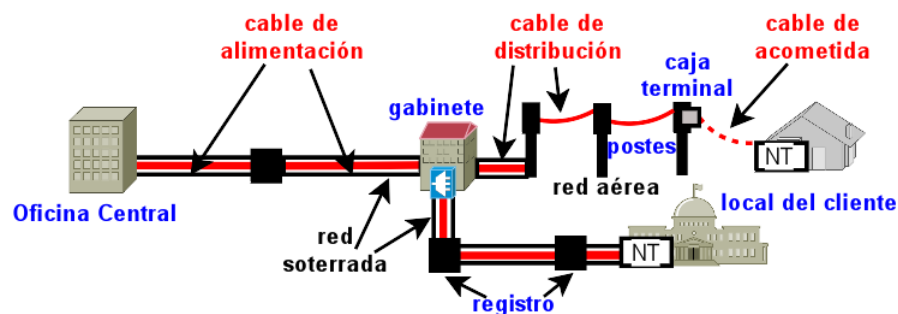
La red de telecomunicaciones está constituida por la planta externa y la planta interna, incluye la oficina central (CO, *Central Office*), con sus equipos de conmutación, los elementos de alimentación eléctrica y la infraestructura donde se ubican. En general, la planta externa parte de una estructura formada por las redes de acceso, desde la central telefónica hasta el lugar del cliente y por las redes que interconectan los distintos puntos de conmutación, denominadas líneas locales o urbanas [18].

Otra definición de la OSP la describe como el conjunto de medios, tecnologías y protocolos, necesarios para el intercambio de información entre los usuarios de la red y

se puede dividir en la red de acceso, que proporciona las conexiones finales de la CO con los usuarios y la red de tránsito o red troncal [19].

Los diferentes componentes de la OSP están distribuidos en un área básica la cual es el territorio servido por una central telefónica determinada [20]. El área de una CO puede ser clasificada como monoárea o monocentral, si está constituida por una única central local y de área múltiple, cuando está compuesta por varias centrales locales, las líneas que las enlazan y la red que las interconecta con su centro interurbano; también puede ser urbana y rural [18].

Se asume que la OSP representa todo el equipamiento de telecomunicaciones y los servicios relacionados con la instalación de la red desde el panel de distribución principal (MDF, *Main Distribution Frame*) o el panel de distribución óptica (ODF, *Optical Distribution Frame*), ubicados en el Centro Telefónico hasta el local del abonado u otros MDF/ODF. En la figura 1.1 se representan los elementos principales de la planta externa, entre ellos están: la oficina central de telecomunicaciones, los postes y cables de la red aérea, registros y cables de la red soterrada, gabinetes, caja terminal, red de acometida y el terminal de red (NT, *Network Terminal*).



**Figura 1.1.** OSP del operador de telecomunicaciones

La sección de la red de acceso puede dividirse en la red de alimentación, con su origen en la central telefónica hasta un armario subrepartidor y la red de distribución, desde el gabinete intermedio hasta la caja terminal. También, se denominan como red primaria y secundaria, respectivamente. Por último, el tramo entre el punto de distribución y el equipo en el local del cliente conforman la red de dispersión o de acometida.

La planta externa de la red de acceso, en sus inicios, estuvo compuesta por una red rígida y a través de ella el par de cobre se extiende eléctricamente desde la central telefónica hasta la caja terminal a la que se conecta el equipo del abonado. Posteriormente, se instalaron equipamientos intermedios, los mismos dieron origen y desarrollaron el



uso de la red flexible para llegar al usuario final y satisfacer los servicios demandados [21]. Estos requieren de altas velocidades de transmisión, calidad y alta disponibilidad, por lo que el par de cobre en ocasiones es insuficiente cuando se degradan los parámetros de atenuación y diafonía permisibles, así como la calidad requerida por los servicios prestados.

Con el objetivo de reutilizar la infraestructura de cobre existente, surge la familia de tecnologías xDSL. Esta aprovecha de manera eficiente la red de cobre en explotación, logra una mayor velocidad de transmisión y permite un flujo de información simétrico y asimétrico para ofrecer los servicios de banda ancha hasta el local del cliente.

## 1.2. Red de acceso basada en cobre

Existen varios tipos de redes de línea de abonado digital [22], cada una con sus características específicas en cuanto al ancho de banda utilizado, velocidad en sentido de descarga y subida, alcance máximo y las aplicaciones que soportan. Entre ellas, línea de abonado digital asimétrica (ADSL, *Asymmetric Digital Subscriber Line*), ADSL2+, línea de abonado digital de muy alta tasa de transferencia (VDSL, *Very high bit rate Digital Subscriber Line*) y VDSL2, son las que permiten una mayor tasa de transferencia.

ADSL evolucionó hacia ADSL2 y luego a ADSL2+, con características muy similares entre ellas. ADSL2+ es descrito en la recomendación ITU-T G.992.5. Con respecto a sus antecesoras, ella emplea el doble del ancho de banda, de 2,2 MHz y la velocidad de descarga es de 24 Mbps, así como de subida de 2 Mbps, cuando se define un modo de operación adicional en el caso de la transmisión, sobre el mismo par de cobre con los servicios de voz [23].

También, VDSL se desarrolló a VDSL2, cuyas características se recogen en el estándar ITU-T G.993.2, actualizado en enero de 2015 y está diseñado para soportar los servicios *triple play* como televisión de alta definición y juegos interactivos. VDSL2 aprovecha la actual infraestructura telefónica de pares de cobre. Ella permite a las empresas y operadores actualizar gradualmente las líneas xDSL existentes y posibilita un ancho de banda superior de 30 MHz para ofrecer una mayor velocidad en la transmisión simétrica de 100 Mbps y asimétrica, con respecto a otras tecnologías xDSL [24].

VDSL2 es una opción viable para un enlace menor de 500 m, dentro de edificios y junto a ADSL2+, pueden implantarse como parte de las soluciones de fibra hasta la acera, que incluye la sustitución de la red de alimentación de cobre por fibra, lo

que posibilita mayores velocidades en el acceso. Esta se ha desarrollado a partir de la utilización de transceiver VDSL2, mediante el uso de técnicas de aceleración de DSL como *vectoring* o *self-FEXT cancellation*, el cual es un método de transmisión que emplea la coordinación de las señales de línea para la reducción de la diafonía en el sentido de subida, descarga y la mejora del rendimiento. Además, depende de las características del canal y sirve para beneficio de uno o varios usuarios [25].

Es importante destacar que ADSL2+ se ha desplegado ampliamente en la red de acceso y hoy en día es reemplazado por VDSL2 la cual ofrece una mayor tasa de transferencia en ambos sentidos de la comunicación [26]. Las xDSL han evolucionado hacia G.fast, un nuevo estándar que permite alcanzar velocidades de 1 Gbps sobre el par de cobre [27]. En el anexo A se muestran las características de los estándares abordados.

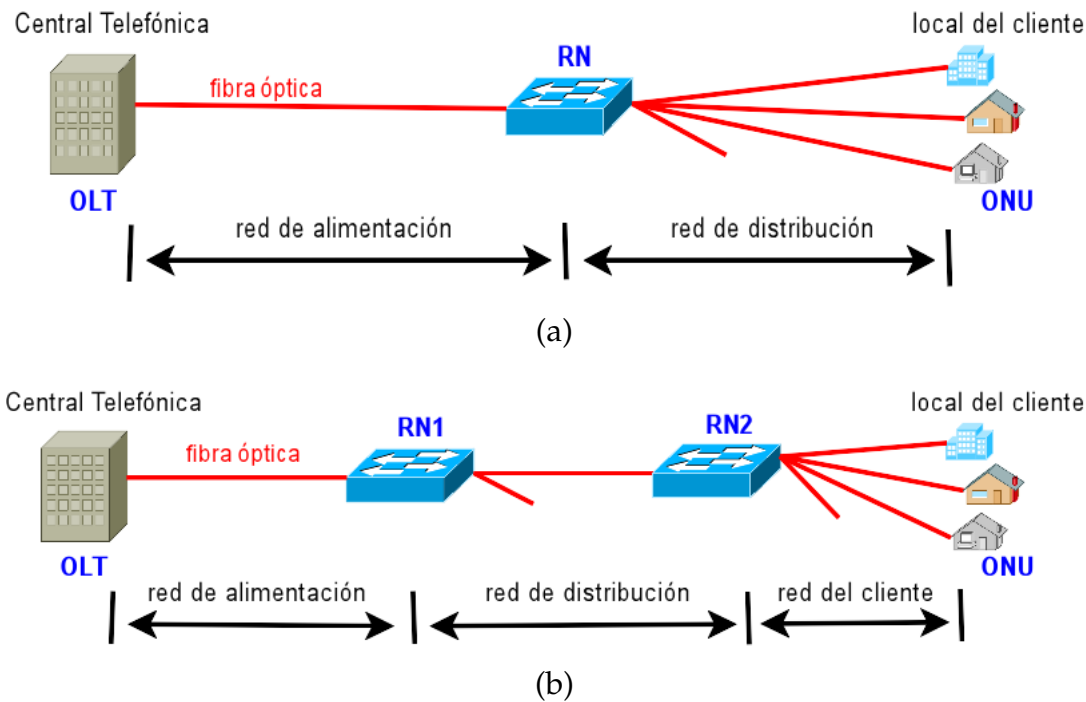
De lo expuesto anteriormente, el autor de este trabajo es del criterio que las tecnologías xDSL en ocasiones no satisfacen los altos requerimientos de servicios de banda ancha. Debido a que las líneas de cobre poseen limitaciones en cuanto a la velocidad de transmisión de datos con el aumento de la distancia entre el equipo del abonado, módem DSL y el multiplexor de acceso de línea de abonado digital (DSLAM, *Digital Subscriber Line Access Multiplexor*), en la central telefónica. Por ello, ha sido necesaria su coexistencia con otras tecnologías basadas en cables coaxiales, radioenlaces de microondas y fibra óptica, que permiten un mayor flujo de información.

Cada día los servicios de banda ancha demandan mayor velocidad de transmisión. Por lo que el autor de esta investigación considera indispensable la sustitución del lazo de abonado soportado sobre el par de cobre por una infraestructura basada en la fibra óptica. El análisis y evaluación del proceso de modernización de la planta externa de las redes de acceso permitirá tomar ventajas en las inversiones requeridas.

### 1.3. Red de acceso óptica

Las redes de acceso soportadas sobre fibra óptica permiten una alta capacidad de transmisión sobre largas distancias con respecto a las tecnologías basadas en cobre. Las ventajas que ofrece el uso de la fibra en las redes de telecomunicaciones posibilita el soporte de servicios de banda ancha. La red de acceso óptica (OAN, *Optical Access Network*) está compuesta por 3 componentes principales [8], como muestra la figura 1.2 (a): la oficina central, en la que se ubica la terminal de línea óptica (OLT, *Optical Line Terminal*), el nodo remoto (RN, *Remote Node*) y la unidad de red óptica (ONU, *Optical Network Unit*) ubicada en el local del cliente, la cual proporciona la interfaz en

el lado del usuario de la OAN y se conecta a la red de distribución óptica.



**Figura 1.2.** Componentes de la red acceso óptica

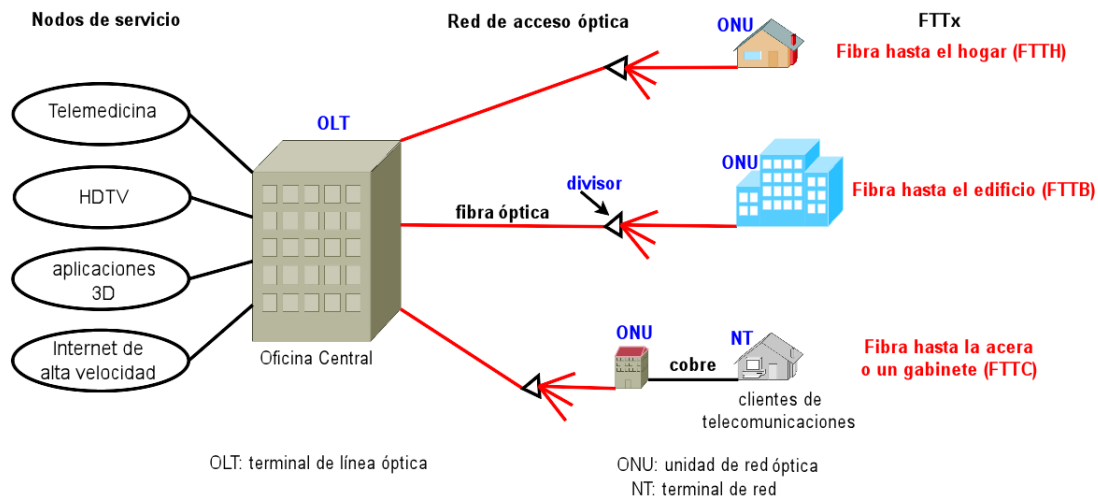
La OAN representada utiliza una topología en árbol; está compuesta por la red de fibra y los nodos intermedios en el que se pueden ubicar los dispositivos ópticos de conmutación o de división de la señal óptica. El esquema mostrado en la figura 1.2 (b) contribuye al aumento de la cantidad de usuarios conectados por puerto de la tarjeta de línea de la OLT mediante la utilización de 2 puntos de distribución en los que se divide la señal óptica. En la investigación se considera que el enlace entre la OLT y el RN1 corresponde a la red de alimentación (FN, *Feeder Network*); el tramo entre los dos RN corresponde a la red de distribución (DN, *Distribution Network*) y entre el RN2 y la ONU, pertenece a la red del cliente, denominada red de dispersión o de acometida (dN, *drop Network*).

La AON se puede clasificar de acuerdo con el tipo de dispositivos que se encuentran entre la central telefónica y el equipo del usuario final, como pasiva, cuando no necesitan alimentación y activa. Según su topología física, pueden ser punto a punto (P2P, *Point to Point*) y punto a multipunto (P2MP, *Point to Multi Point*). La primera categoría se utiliza cuando existe una conexión de fibra óptica o longitud de onda dedicada desde la OLT hasta el equipo del cliente, mientras que cuando se emplea una técnica de

multiplexación para compartir los recursos entre varios usuarios finales se denomina P2MP [8].

Existen organismos internacionales como el *FTTH Council (Europe)*, que promueven el despliegue de fibra óptica hasta el hogar o sus inmediaciones, mediante tecnologías FTTx con las que se sustituyen parcial o totalmente el tramo de cobre existente. Ellas se pueden clasificar como: fibra hasta el hogar (FTTH, *Fiber to the Home*), fibra hasta el edificio (FTTB, *Fiber to the Building*), fibra hasta la acera (FTTC, *Fiber to the Curb or Cabinet*), entre otras [28].

El desarrollo de las redes FTTx es una tarea que necesita de un buen planeamiento y diseño de la topología de la red que se pretende desplegar. Se deben considerar elementos importantes como: la distribución geográfica de la demanda de servicios de los clientes de telecomunicaciones, la localización de la ruta que sigue la traza aérea y soterrada, el tramo que corresponde a la red primaria y secundaria, soportada sobre cobre y fibra óptica y las características del equipamiento en explotación, su ubicación y la necesidad de su modernización para satisfacer los servicios de banda ancha a ofrecer en un área determinada. En la figura 1.3 se muestran las variantes FTTx.



**Figura 1.3.** Redes FTTx

Es importante destacar que las arquitecturas FTTx son implementadas por los operadores de telecomunicaciones de acuerdo con sus requerimientos técnicos y funcionalidades. Por medio del despliegue de la red FTTH se ofrecen los servicios de banda ancha sobre fibra óptica hasta el hogar.

En escenarios FTTB la fibra óptica llega hasta el equipo terminal localizado en el in-

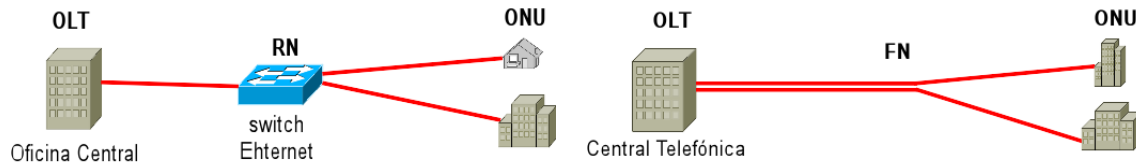
terior de edificios multifamiliares y de negocios; a partir de este punto se ofrecen los servicios de telecomunicaciones mediante tecnologías xDSL y la LAN empresarial, respectivamente. Con la red FTTC se llega con fibra hasta un gabinete que posee concentradores multiservicios cercanos al usuario y se aprovecha el resto de la red de cobre existente, a través del empleo de tecnologías como ADSL2+ y VDSL2. Además podría insertarse la tecnología G.fast para clientes con alta demanda de servicios cuando lo permitan los requerimientos del alcance físico del enlace.

En la presente investigación se abordan las arquitecturas FTTH/FTTB cuando se hace referencia al enlace de fibra óptica hasta el local del cliente y las FTTC para el caso en que se utiliza fibra y cobre en el acceso.

### 1.3.1. Red óptica activa

En la red óptica activa (AON, *Active Optical Network*), los equipos de interconexión ubicados entre la central telefónica y el usuario requieren energía eléctrica; dichos dispositivos soportan Ethernet para proporcionar la agregación de enlaces por fibra. La AON utiliza una conexión de fibra óptica o longitud de onda dedicada para la comunicación entre la OLT y el equipo del cliente. Asimismo, el área de cobertura es superior con respecto a la red óptica pasiva, independientemente del número de clientes conectados, pues la cantidad de usuarios está limitada por el número de puertos del switch [29]. Actualmente, las arquitecturas de fibra más comunes de la AON son la estrella activa y *home run*.

En la arquitectura estrella activa se utiliza una fibra óptica desde el *switch* de agregación en la central telefónica hasta un *switch* Ethernet activo ubicado en el punto de distribución, que requiere de alimentación en la planta externa. Una ONU pueden comunicarse con el resto a través del conmutador sin acceder a la OLT. La red de fibra de alimentación se caracteriza por ser de uso compartido, de ahí que la arquitectura tiene una topología P2MP. Tiene un alto grado de flexibilidad. La AON soporta 10 Gbps por interfaz Ethernet y alcanza distancias alrededor de los 100 km. La principal desventaja es que tiene un alto costo operacional y de consumo de energía por los componentes activos [8]. En la figura 1.4 (a) se representa su diagrama lógico.



**Figura 1.4.** Diagrama lógico de una red óptica activa. (a) Arquitectura estrella activa. (b) Arquitectura *home run*.

El esquema lógico de la arquitectura *home run* se muestra en la figura 1.4 (b), la cual utiliza Ethernet como portador de servicios en la red de acceso. Además, emplea una fibra óptica dedicada entre la CO y cada ONU sin un dispositivo intermedio en la planta externa y se caracteriza por su topología punto a punto que la hacen menos compleja y más segura que las soluciones de medio compartido como la estrella activa y las redes ópticas pasivas. La arquitectura ofrece velocidades en el orden de los 10 Gbps por usuario y un alcance de 100 Km [8]. Tiene la desventaja del alto costo por cliente como consecuencia del empleo de la fibras y *transceivers* dedicados y lo complejo que puede resultar desplegar la red en áreas de alta densidad de hogares y locales, pues requieren de una alta cantidad de fibras.

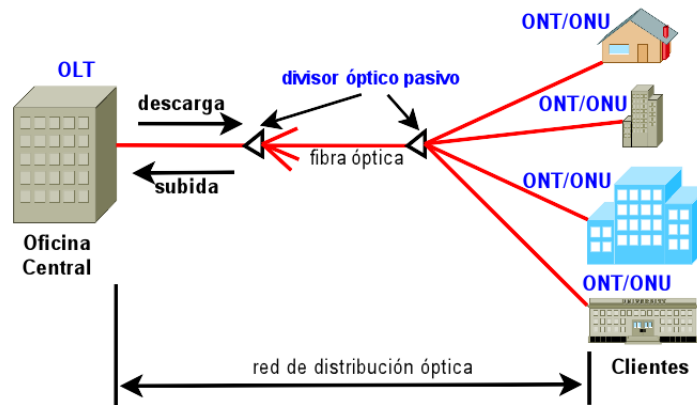
### 1.3.2. Red óptica pasiva

La red óptica pasiva (PON, *Passive Optical Network*) emplea una conexión P2MP para las transmisiones entre la OLT y las ONU/ONT, las cuales comparten los recursos mediante técnicas de multiplexación. En ella no se requiere energía para la alimentación de los equipos intermedios. La PON está compuesta por 3 partes principales [30]: la OLT, la terminación de red óptica (ONT, *Optical Network Termination*) y la red de distribución óptica (ODN, *Optical Distribution Network*) correspondiente a cada puerto PON de la OLT; en esta última se localizan los divisores ópticos pasivos (POS, *Passive Optical Splitter*) encargados de dividir la señal óptica hacia cada usuario.

Las PON sustituyen el tramo de cable de cobre por fibra óptica monomodo y los divisores eléctricos por divisores ópticos pasivos; de esta manera se eliminan los componentes activos existentes entre el proveedor de servicios de telecomunicaciones y el cliente. Generalmente, no requieren ningún tipo de actualización ante un posible cambio de tecnología. Utiliza diferentes topologías como: árbol, bus y anillo pasivo [31].

En la figura 1.5 se muestra la arquitectura de una red PON genérica con topología en

árbol y con 2 niveles de POS que representan 1 entrada y 4 salidas, correspondiente a una razón de división de 1:4.



**Figura 1.5.** Arquitectura de un sistema PON con 2 divisores en cascada

Las redes PON ofrecen una solución factible a la problemática de la última milla y son desplegadas por los operadores de redes de telecomunicaciones por las significativas ventajas que ofrecen [32]. Ellas minimizan el despliegue de fibra óptica en el bucle local, al poder utilizar topologías punto a multipunto que simplifican la densidad del equipamiento de la central, por lo que se reduce el consumo de energía; garantizan los servicios a usuarios que se encuentran a distancias de 20 kilómetros, por lo que supera la cobertura máxima de las tecnologías xDSL y ofrecen mayores tasas de transmisión por suscriptor que las alternativas de cobre, debido a la capacidad superior de la fibra óptica para transportar información.

Las tecnologías PON constituyen una alternativa primaria con respecto a las redes AON para la migración de las redes soportadas sobre par de cobre a fibra óptica. Las PON sustituyen los divisores eléctricos por divisores pasivos. De esta forma, se reduce la cantidad de dispositivos activos en la planta externa y se minimiza el planeamiento de red, lo cual contribuye a la reducción de la inversión o gasto de capital (CAPEX, *Capital Expenditure*) y de operaciones (OPEX, *Operational Expenditure*) [33], al formar una económica red de acceso hasta el usuario final.

Entre las arquitecturas PON, las de mayor aceptación han sido la red óptica pasiva Ethernet (EPON, *Ethernet Passive Optical Network*) estandarizada en la IEEE 802.3ah y la red óptica pasiva con capacidad de gigabit (GPON, *Gigabit capable Passive Optical Network*) descrito en el estándar ITU-T G.984.1 [34]. GPON ha sido elegida por varios operadores de telecomunicaciones y fabricantes en el mundo por sus ventajas sobre EPON [35], por lo cual ha sido la tecnología desplegada en Norteamérica y Europa



[33]. Estas se han desarrollado hacia otras tecnologías PON que ofrecen velocidades de transferencia superiores como: 10G-EPON [31] y XG-PON [36, 37], respectivamente; las cuales pueden evolucionar hacia la segunda etapa de las redes ópticas pasivas de próxima generación, NG-PON2.

## 1.4. Red óptica pasiva con capacidad de gigabit

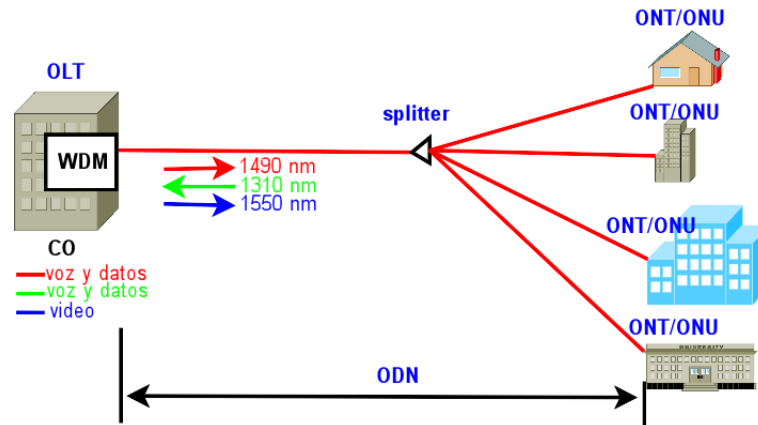
El funcionamiento de la tecnología GPON se describe en la serie de estándares ITU-T G.984.x, en los cuales se exponen las características generales de un sistema PON, tales como: sobre su arquitectura, velocidades binarias, alcance, retardo de la señal, razón de división óptica, protección, seguridad y otras. GPON permite la implementación de una red flexible de acceso sobre fibra óptica capaz de soportar los requisitos de banda ancha de los servicios de usuarios residenciales y no residenciales mediante FTTH. El estándar G.984.1 surgió con el fin de establecer nuevas exigencias a la red, entre ellas [38]:

- El soporte de los servicios de voz, Ethernet y ATM.
- El alcance físico máximo es de 20 km, aunque puede llegar hasta un alcance lógico máximo de 60 km.
- Incluye velocidades de 2.4 Gbps en el enlace descendente, de la OLT a las ONU y 1.2 Gbps en el ascendente, de las ONU a la OLT. Además soporta 2.4 Gbps de forma simétrica.
- El número máximo de usuarios que pueden servir a través de una misma fibra es 64, aunque el sistema está preparado para soportar hasta 128.

La figura 1.6 muestra una red GPON formada por la OLT, ONT/ONU y la ODN con una topología P2MP en la que se localizan los divisores ópticos pasivos. Para la transmisión de voz y datos utiliza el rango de longitud de onda de 1480-1500 nm en el sentido de descarga y en subida, el rango de 1260-1360 nm. La transmisión unidireccional se realiza mediante el empleo de 2 fibras ópticas y la transmisión bidireccional sobre una sola fibra y en los mismos componentes a través de WDM [39], que además posibilita el servicio de distribución de video en la banda de 1550-1560 nm [40].

El par de longitudes de onda utilizadas en sentido descendente o *downstream* (1490 nm) y ascendente o *upstream* (1310 nm) sobre una única fibra, se comparte a través de la multiplexación por división de tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*) entre todos los usuarios. La velocidad de transmisión por usuario resulta de la razón de





**Figura 1.6.** Esquema general de la red GPON

transferencia máxima dividida por la cantidad de usuarios conectados a un puerto PON de la tarjeta de línea de la OLT.

GPON permite la implementación de una red flexible de acceso sobre fibra óptica capaz de soportar los requisitos de los servicios de banda ancha de los usuarios residenciales y no residenciales, mediante FTTH en escenarios *greenfield*. Asimismo, posibilita la convergencia de los servicios de telecomunicaciones sobre una única infraestructura de red, lo que favorece la reducción de los costos para los operadores al no tener que instalar y mantener redes paralelas para cada servicio. Por lo tanto, constituye una solución efectiva para la migración de la red de cobre por fibra óptica en escenarios *brownfield*.

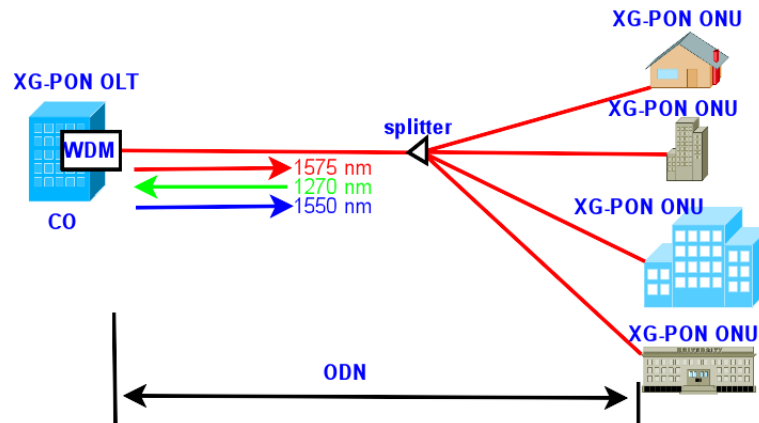
## 1.5. Red óptica pasiva de próxima generación

GPON es compatible con otras tecnologías PON que han surgido para garantizar una velocidad de transmisión superior en la red de acceso. A continuación se describen las características de las redes ópticas pasivas de próxima generación que ofrecen soluciones tecnológicas para satisfacer los requerimientos técnicos de los nuevos servicios de telecomunicaciones con la modernización del equipamiento óptico en ambos extremos de la red y manteniendo la compatibilidad con las PON tradicionales a través de los escenarios de migración planteados.

### 1.5.1. NG-PON 1

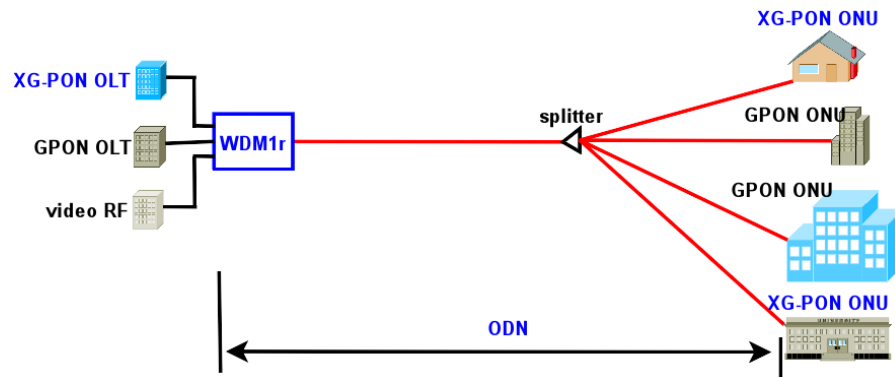
La red óptica pasiva de próxima generación fase 1 (NG-PON1, *Next Generation Passive Optical Network phase 1*) posee 2 variantes de arquitecturas denominadas: XG-PON1, la cual opera a una velocidad de 10 Gbps en bajada y 2.5 Gbps en subida, así como XG-PON2, con una razón de transferencia de 10 Gbps de forma simétrica. De forma general, la red óptica pasiva con capacidad de 10 gigabit (XG-PON, *10-Gigabit-capable Passive Optical Network*) es un sistema que soporta velocidades en el orden de los 10 Gbps en al menos un sentido de la comunicación [37]. Específicamente, XG-PON1 constituye una subclase de las redes NG-PON1; sus parámetros se describen en la serie de estándares ITU-T G.987.x y usa los tipos de fibra estandarizados en la recomendación ITU-T G.652 al igual que GPON. Para la transmisión en sentido de subida utiliza el rango de 1260-1280 nm y en descarga, la longitud de onda de 1577 nm que pertenece al rango de 1575-1580 nm.

En la figura 1.7 se muestra el diagrama lógico de la red de acceso XG-PON cuya ODN representa un segmento simple de distribución óptico (ODS, *Optical Distribution Segment*), aunque también está compuesta por un grupo de ODS pasivos interconectados con dispositivos para la extensión del alcance de la red óptica (RE, *Reach Extender*).



**Figura 1.7.** Esquema general de la red XG-PON

Para garantizar la compatibilidad con GPON, XG-PON1 utiliza en el sentido de descarga la longitud de onda de 1575 nm del rango de 1575-1580 nm y 1270 nm en subida, perteneciente al rango de 1260-1280 nm. Por tanto, los sistemas GPON y XG-PON funcionan sobre la misma ODN, como se representa en la figura 1.8, al adicionar un nuevo componente (WDM1r) el cual es un filtro WDM que puede localizarse en la central telefónica para combinar o separar las longitudes de onda de las señales GPON y los sistemas NGA.



**Figura 1.8.** Escenario de coexistencia entre GPON y XG-PON

En el estándar se describen 2 posibles escenarios de migración de la red óptica pasiva llamados *greenfield* PON y *brownfield* PON [41]. El primero, se refiere a una región donde no se ha desplegado una red PON y resulta viable el cambio de la red de cobre existente por XG-PON1 sin antes desplegar GPON para satisfacer una velocidad de transferencia por usuario igual o superior. En el segundo caso, pueden coexistir XG-PON y GPON sobre una misma fibra; de ahí que el operador debe minimizar las interrupciones del servicio de los usuarios que no participan en el proceso de actualización y la nueva tecnología tiene que soportar todos los servicios existentes con GPON. Asimismo, al utilizar una OSP común se deben instalar las ONT GPON con filtro de bloqueo de longitud de onda (WBF, *Wavelength Blocking Filter*) para eliminar las interferencias de la tecnología XG-PON1.

Aunque las tecnologías TDM-PON analizadas ofrecen una alta razón de transferencia por ONU, se ven limitadas al utilizar un solo par de longitudes de onda compartidas entre todos los usuarios [42]. Además, cada día surgen nuevas aplicaciones las cuales demandan velocidades superiores, por lo que es necesario incrementar el rendimiento de las redes ópticas pasivas mediante el empleo de los sistemas NG-PON2, cuyas tecnologías permiten la asignación de un par de longitudes de onda dedicada por cliente para la transmisión bidireccional.

### 1.5.2. NG-PON 2

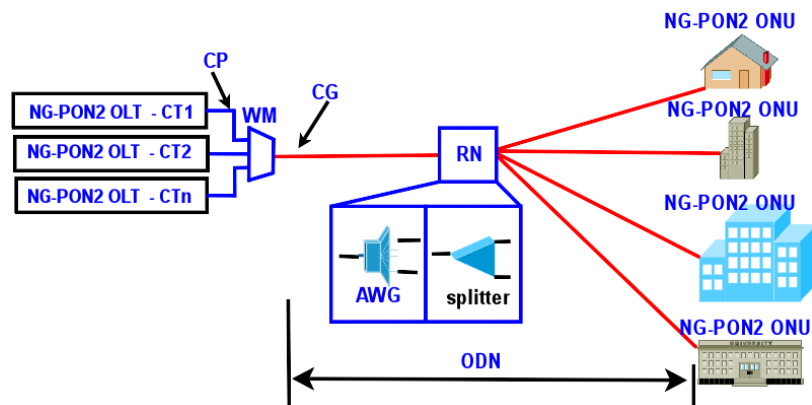
La serie de estándares ITU-T G.989.x describe las especificaciones generales de NG-PON2 (*40-Gigabit-capable Passive Optical Network*) la cual garantiza la variedad de servicios de los usuarios residenciales, clientes de negocio y las aplicaciones del backhaul móvil; incluye las configuraciones de despliegue, migración de escenarios a partir de

las PON tradicionales, así como los requerimientos operacionales, de protección y de servicio para una red de acceso flexible que posibilite las aplicaciones actuales.

Los sistemas NG-PON2 poseen las siguientes características [43]:

- Arquitectura de multiplexación de división de longitud de onda y de tiempo (TWDM, *Time and Wavelength Division Multiplexing*) de un canal de múltiples longitudes de onda.
- 4-8 par de canales TWDM, en el que cada uno incluye un canal de longitud de onda de descarga y uno de subida.
- Multiplexación de división de longitud de onda punto a punto (PtP WDM, *Point-to-Point Wavelength Division Multiplexing*) para disponer de una longitud de onda dedicada por ONU en ambos sentidos de la comunicación. Además cada ONU puede ser servida por una o más longitudes de onda dedicadas.
- Capacidad de 40 Gbps en sentido descendente y de 10 Gbps en sentido ascendente, con un alcance de 20 km y al menos una razón de división de 1:64.
- Enlaces simétricos de 2.5 Gbps, así como de 10 Gbps, con un alcance de 40 km y una razón de división de 1:32.

En la figura 1.9 se representa la ODN simple de un sistema NG-PON2. La OLT está conformada por varias terminaciones de canal (CT, *Channel Termination*), conectadas a un multiplexor de longitud de onda (WM, *Wavelength Multiplexor*). Un par de canales de longitudes de onda de descarga y de subida (CP, *Channel Pair*) permite la conexión entre la OLT y una o varias ONU. El conjunto de CP utilizado sobre la misma fibra óptica conforma el grupo de canales (CG, *Channel Group*).



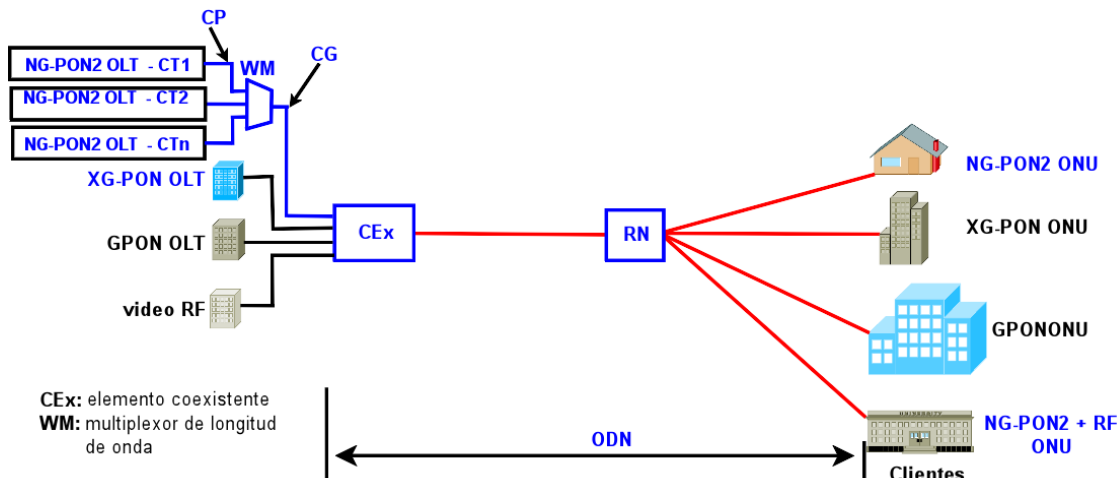
**Figura 1.9.** Esquema general del sistema NG-PON2

NG-PON2 al igual que XG-PON describe 2 posibles escenarios de migración *greenfield* y *brownfield* de las redes ópticas pasivas [43]. En el escenario *greenfield* PON se puede reemplazar la infraestructura de cobre por los sistemas NG-PON2 o desplegarlos directamente en una nueva área, pues no se necesita satisfacer los requerimientos de coexistencia con otras tecnologías. A diferencia del escenario *brownfield* PON el cual considera una región con una red de fibra en explotación que puede soportar sobre la misma ODN la operación de NG-PON2 junto a las PON tradicionales como GPON, XG-PON, GEAPON y 10G-EPON.

Las tecnologías ópticas especificadas por NG-PON2 son TWDM PON y PtP WDM PON [42, 44]. TWDM es un sistema PON híbrido en el cual cada canal de longitud de onda puede ser compartido entre varias ONU, mediante mecanismos de acceso múltiple y multiplexación por división de tiempo. La tecnología utiliza el rango de longitudes de onda de 1524-1544 nm en descarga y 1596-1603 nm en la banda de subida de gran alcance (*wide range upstream band*). Por su parte, PtP WDM es un sistema PON que permite la conexión punto a punto a través de un canal de longitud de onda dedicado por ONU para cada sentido de la transmisión; emplea las bandas de espectro compartido entre 1603-1625 nm y ensanchado entre 1524-1625 nm, ambas en sentido descendente y ascendente.

Las tecnologías descritas proporcionan la protección de las inversiones realizadas en los despliegues de las PON tradicionales y facilitan la migración gradual de los suscriptores de dichas redes al nuevo sistema. Además, ellas soportan nuevas ODN las cuales contienen una combinación de divisores de longitud de onda denominados AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), que contribuyen a un mayor alcance de la red óptica pasiva.

La figura 1.10 muestra un esquema general de la red de acceso, en él coexisten NG-PON2 y los sistemas tradicionales. NG-PON2 tiene que ser compatible con las infraestructuras desplegadas: localización de la central telefónica, soterrados, cables de fibras, entre otros. La ODN tiene en funcionamiento los divisores de potencia y un elemento de coexistencia (CE, *Coexistence Element*), que puede localizarse en la central telefónica para combinar y separar las longitudes de onda de NG-PON2 y las PON anteriores, así como las señales de video.



**Figura 1.10.** Esquema general con escenario de coexistencia de NG-PON2, XG-PON y GPON

El anexo B resume las particularidades de las tecnologías de acceso ópticas analizadas anteriormente en relación con la banda de longitud de onda de operación en el enlace descendente y ascendente, velocidad de transmisión, distancia del enlace sobre fibra óptica y la razón de división de la señal óptica.

Por todo lo antes expuesto, se considera que la red óptica pasiva constituye una solución factible para el desarrollo de la OSP con respecto a la red óptica activa, pues minimiza el despliegue de fibra óptica en la última milla al utilizar topologías P2MP, simplifica la densidad del equipamiento en la central, en nodos de distribución y se reduce el consumo de energía en la ODN. La PON contribuiría a la migración de la red de acceso soportada sobre par de cobre por medio de la utilización de la fibra óptica en la red de alimentación, distribución y acometida. Ello favorece la liberación del espacio en las tuberías de la red soterrada, la fiabilidad y el rendimiento de la red; lo que permite una infraestructura necesaria para garantizar el acceso a los servicios de banda ancha.

Las redes ópticas pasivas de próxima generación descritas anteriormente, constituyen una posible solución para la actualización de la tecnología GPON, pues soportan la demanda de altas velocidades de transmisión por usuario, una mayor cantidad de clientes y distancias superiores. Todas ellas pueden coexistir en un mismo escenario de forma que garanticen los requerimientos técnicos en diferentes etapas del despliegue de redes FTTH/FTTB, elemento importante para la continua modernización de la red de acceso.

Las redes de acceso ópticas analizadas requieren de altos costos de instalación, operación y mantenimiento. Por tanto, las decisiones importantes en las etapas de planeamiento y diseño juegan un papel fundamental para minimizar el CAPEX, lo que repercutirá en el OPEX de la red.

## 1.6. Diseño de redes de acceso cableadas de banda ancha

El proceso completo para el despliegue de la planta externa de la red de acceso, concibe las etapas de planeamiento estratégico, de alto nivel y detallado de la red. En todo momento las decisiones deben basarse en datos cuyo tipo y exactitud varían de acuerdo con la fase de planeamiento. En cada una se realiza el análisis de la información sobre los datos georeferenciados, las especificaciones del hardware y el costo de la red [28]. Entre los elementos que tienen un gran impacto en dicho proceso se encuentran: las características del posible escenario de despliegue, la localización de los grupos de clientes y la infraestructura de telecomunicaciones, los servicios y velocidades de transmisión requeridas, la arquitectura y tecnologías a introducir, así como la estimación del costo de la red, el período de retorno de la inversión (ROI, *Return of Inversion*), el marco regulatorio en la región y el estado competitivo o de colaboración con otros proveedores.

Específicamente, las características del escenario de despliegue de las tecnologías FTTx juegan un rol fundamental en la elección de la arquitectura y el diseño de la topología de red. Los escenarios se dividen en 3 categorías [28]: *greenfield*, al nuevo sitio donde se va a desplegar la red conjuntamente con la construcción de las edificaciones; *brownfield*, si en la región existen edificios ya construidos con un bajo desarrollo de la red de telecomunicaciones y *overbuild*, al lugar donde se instalan nuevos componentes de red sobre la infraestructura existente. En los últimos 2, el costo de despliegue de la red puede ser menor al reutilizar los elementos de la planta externa en explotación [45].

A partir de las características anteriores, en la investigación se hace referencia a todas las etapas de planeamiento a un nivel de parcela en el que se consideran sitios tipo *brownfield* para el cual puede desplegarse una red óptica pasiva FTTH/FTTB GPON para la modernización de la OSP existente, soportada sobre par de cobre, así como las actualizaciones continuas de la red de fibra. Asimismo, el proveedor de servicios de telecomunicaciones debe planear la red para garantizar un acceso a mayor velocidad de acuerdo con los requerimientos de los nuevos servicios de telecomunicaciones que

se garantizan a nivel mundial [46] y basado en la ubicación geográfica de los clientes.

### 1.6.1. Sistema de información geográfica

Las herramientas basadas en un SIG permiten el diseño de la nueva red de fibra y la gestión transparente de una infraestructura completamente integrada. El empleo de la información geográfica ha ganado interés, pues contribuye a agilizar el proceso de diseño, su simplificación y optimización. El SIG facilita las herramientas para el planeamiento y diseño de la planta externa soportada sobre par de cobre y fibra óptica.

Un SIG es una colección de datos espacialmente referenciados, es decir, los datos tienen localizaciones añadidas a sí mismos, junto a las herramientas requeridas para trabajar con ellos [47]. Otra definición se refiere a que constituye un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, que desempeñan una función particular. Además, integra la informática, las personas y la información geográfica; sus funciones principales son: la captura, visualización, edición, análisis y generación de cartografía en la que se representan los datos georeferenciados [9]. Los elementos de un SIG son [9]: datos, procedimientos, recursos humanos, software y hardware. Se puede concluir que un SIG es un sistema que maneja información georeferenciada y emplea recursos informáticos que son utilizados por las personas para el procesamiento de los datos en una cartografía digital.

La cartografía digital ha posibilitado el análisis de la información georeferenciada sobre mapas digitales, entre ellos, los de redes, los cuales representan rutas de transporte, servicios de gas y electricidad, infraestructura de tuberías, telecomunicaciones y logística; por tanto, constituyen recursos fundamentales para las empresas y permiten gestionar su infraestructura operacional.

Algunas aplicaciones tienen como característica principal la visualización, por ejemplo, Google Earth; por lo que son conocidos como visores o exploradores. Ellas presentan capacidades reducidas o nulas de edición, análisis y solo permiten la visualización de la cartografía sin incorporar las restantes funcionalidades de un SIG [9]. A pesar de lo anterior, se emplean para la visualización de los planes de red, en particular de las redes FTTx y contribuyen a reducir la necesidad de ir físicamente a los sitios a comprobar e inspeccionar lo planificado.

Entre los ejemplos de SIG más utilizados se encuentran ArcGis<sup>1</sup> y Mapinfo<sup>2</sup>, solu-

---

<sup>1</sup> <http://www.esri.com>

<sup>2</sup> <http://www.geobis.com/es/?portfolio=mapinfo-gis-software>



ciones líderes, propietarias, es decir, hay que pagar una licencia para su utilización; ellos posibilitan el análisis detallado y sofisticado de la información geográfica [48]; así como QGIS<sup>3</sup> y gvSIG<sup>4</sup>, aplicaciones libres para el procesamiento de los datos geográficos. Todas ellas permiten el manejo de mapas vectoriales en el cual las entidades se modelan como puntos, polilíneas, polígonos; además de la representación raster, que emplea formatos de imágenes tales como: tiff, jpeg, entre otros.

Dentro de las aplicaciones de los SIG, puede resultar de interés las relacionadas con el planeamiento de la red de telecomunicaciones. Ellos ofrecen las herramientas para el análisis espacial de la información de los elementos de la OSP y la facilidad de generar la documentación gráfica, en mapas digitales o cartografía digital, para las labores de mantenimiento y modernización de la infraestructura de la empresa; permiten el análisis de los aspectos de diseño de la topología de red, análisis espacial, análisis multicriterio, construcción de modelos para automatizar procesos, estimación de costos, análisis de negocios y estrategias de desarrollo eficientes.

### **1.6.2. Empleo de la información geográfica en el diseño de redes de acceso de banda ancha**

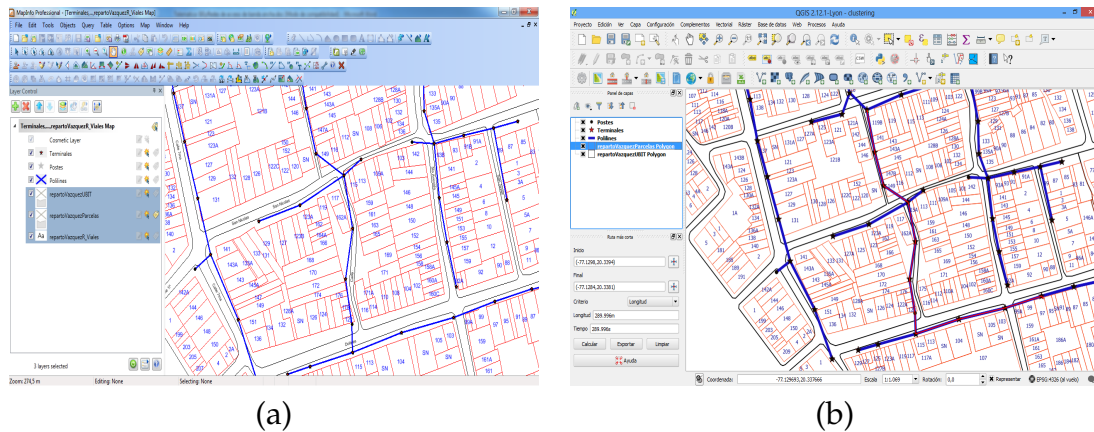
El SIG permite la representación del escenario para el diseño de la red de banda ancha. A través del manejo gráfico de la información se identifican las áreas de acuerdo con la oferta y demanda de servicios de los usuarios. También posibilita la visualización de otras tecnologías de redes en explotación y contribuye a la toma de decisiones para la modernización de la planta externa existente. Con la información recogida en los mapas digitales se pueden desarrollar soluciones efectivas en un menor período de tiempo y con un cálculo preciso de los recursos para el despliegue de la red de telecomunicaciones. En la operación, el seguimiento de los cambios tecnológicos a través de un sistema de gestión de red empresarial que maneje componentes geográficas, contribuirá a contabilizar los recursos empleados para el desarrollo de las nuevas soluciones de acceso.

En la figura 1.11 (a) y (b) se visualizan las capas vectoriales que corresponden a las parcelas de la cartografía base (rojo), modelada como polígonos, la cartografía de infraestructura de instalación como postes (negro) y terminales de la red de cobre (estrella), representados por puntos y la red de cables (azul), constituida por polilíneas.

---

<sup>3</sup> <http://www.qgis.com>

<sup>4</sup> <http://www.gvsig.com>



**Figura 1.11.** Representación de la cartografía digital base y de la OSP en Mapinfo (a) y QGIS (b)

Por ejemplo, Mapinfo posibilita la creación de polilíneas desde una base de datos, realización de consultas espaciales, creación de polígonos de Voronoi, el cálculo de la distancia más corta entre puntos de 2 capas y otras. Por su parte, QGIS se integra con Grass para conformar una potente aplicación que posibilita el análisis de redes a través del cálculo del camino más corto, obtención del árbol de Steiner, árbol de expansión mínima y otros que pueden ser aplicados sobre mapas vectoriales.

El autor de esta investigación considera que los sistemas de información geográfica pueden aplicarse a la solución de temas de gestión decisivos para la correcta ejecución de proyectos, negocios o investigaciones. Ellas juegan un importante papel en el éxito del mercado y la rentabilidad de las redes de acceso FTTx. En general, los SIG incorporan funcionalidades útiles para el planeamiento y diseño de las infraestructuras de acceso FTTH a partir de la modelación de la red basado en la información sobre las posibles rutas y las localizaciones de los nodos.

El empleo de los mapas vectoriales es útil para extraer las características importantes de la red, entre ellas, el grado de un nodo, puntos de cruces, longitudes de segmentos y distancia entre los puntos. Los datos GIS son parte esencial en la metodología propuesta para el planeamiento de la arquitectura FTTH en la que se utiliza un cable de fibra óptica dedicado entre el nodo de acceso y los clientes. Para obtener el modelo de planeamiento adecuado se modifican los requerimientos de red que influyen en parámetros como: la distancia desde el nodo de acceso (AN, *Access Node*) hasta los terminales de red (NT, *Network Terminal*), dimensionamiento de los ANs, de ductos y la distancia entre los registros. Por ejemplo, el dimensionamiento de los ductos está dado por la cantidad máxima de fibras permitidas, la distancia máxima entre registros

es de 600 - 800 m, debido a las limitaciones del soplado de la fibra en ellos [49].

Los sistemas de información geográfica también se emplean para la estimación del desempeño de las redes de cobre. El SIG junto a las configuraciones de distribución de los DSLAM, permite el cálculo de la cantidad de ubicaciones del equipamiento activo necesaria para garantizar los niveles adecuados de calidad de servicio y la definición de las limitaciones del acceso de banda ancha soportado sobre el par de cobre [50]. Los resultados obtenidos, en el municipio Lolland en Dinamarca durante la estimación del dimensionamiento de la red para ofrecer los servicios de videoconferencia, mostraron como conclusión que se necesita una gran cantidad de DSLAM para garantizar las demandas de la población en la región. También evidencian que la utilización de nuevas tecnologías sobre par de cobre como *vectoring* y *phantom*, probablemente no resolverían la problemática, pues aunque ofrecen un alto rendimiento a cortas distancias, no resultarían útiles para llevar la banda ancha a los usuarios ubicados en las áreas rurales.

La transición de la red en explotación a fibra puede seguir una estrategia que considere el análisis del acceso actual basado en cobre, sus limitaciones, los métodos para el planeamiento, su actualización y la evaluación de su factibilidad económica [13]. En el estudio se proponen varias etapas para la transición de la infraestructura de cobre a fibra. Primeramente, se analiza la situación actual de la red xDSL, posteriormente se realiza la estimación del rendimiento máximo de la red, por último, se establece una selección de prioridad de los terminales de red para el desarrollo de la fibra y se realiza la valoración económica. Del análisis anterior, cabe destacar que la tecnología xDSL no permite un 100 % de cobertura en la región de estudio en Lolland, Dinamarca, por lo que es necesario modernizar la infraestructura existente. Para la estimación se empleó la estrategia seguida por la mayoría de los operadores de llevar la fibra lo más cerca al usuario para desplegar nuevos puntos de acceso de cobre. En el despliegue de la red xDSL la cantidad de equipos activos requerida harían que el proyecto no fuese factible en cuanto a consumo de energía, costo de equipamiento o ambos.

En el diseño de la topología de las redes de fibra hasta la casa se puede utilizar un modelo geográfico, basado en el empleo de datos geoespaciales detallados y reales, que facilitan la estimación precisa de su costo de desarrollo, en vez de un modelo geométrico, definido por valores promedios del área de estudio, que no es apropiado cuando la densidad de población es desigual y el sistema de calles es irregular [16]. En tal sentido, se puede aplicar una metodología de diseño de la topología para redes de acceso de banda ancha FTTx con el objetivo de obtener resultados de interés práctico

[10], en la cual los cálculos se basan en datos geográficos reales, en mapas digitales y en la información de la infraestructura del área analizada, mediante modelos de costo reales. Además se tiene en cuenta el equipamiento de red existente, la ubicación de los abonados, las condiciones que dependen de la tecnología y otras.

Se ha propuesto un *framework* o marco de trabajo para la evaluación técnico-económica de diferentes tecnologías y arquitecturas de redes de acceso de próxima generación [15]. El marco de trabajo permite el análisis de mercado basado en servicios y las arquitecturas más relevantes que los proveen; evidencia el papel importante que tiene el diseño de red en los cálculos técnicos, así como económicos, basados en la estimación de los costos de la introducción de redes FTTH por etapas y los posibles ingresos, que completan el modelo económico planteado con el análisis de la inversión; este junto a los costos también influyen en el rendimiento de la red.

Relacionado con el modelo anterior, se desarrolló una metodología de diseño de la topología de una red de acceso parcial o totalmente óptica, basada en la información geoespacial sobre el área de servicio, a partir de los mapas digitales, la infraestructura existente y la localización de los posibles abonados [11]. En este caso, la utilización de la información georeferenciada ofrece un alto nivel de detalle en el proceso de diseño y de exactitud en la estimación de los costos, por ejemplo: de la planta de cable y de los equipos de red.

El problema de diseño de redes de acceso punto a multipunto, se divide en fases y se plantea en 3 subproblemas interrelacionados: problema de agrupamiento, problema de localización y problema de flujo o camino [11]. Los resultados obtenidos por sus autores arrojan que las redes GPON y VDSL posibilitan la realización de un proyecto rentable con un período de retorno de la inversión relativamente largo, con respecto a una red de acceso óptica punto a punto para todos los hogares, cuyo proyecto no sería factible.

También se ha desarrollado una plataforma optimizada para el diseño de las redes de acceso ópticas con arquitectura punto a multipunto, capaz de minimizar la inversión inicial de la red. En el modelo de datos usado se representaron los equipos, la infraestructura actual, futura, así como varios parámetros constantes que pueden ser empleados en el proceso de optimización del diseño de red [45]. Los análisis realizados consideran las características de 2 casos que se diferencian por la disponibilidad de la infraestructura; tipo *greenfield*, para el caso en que no se considera la red de telecomunicaciones existente y *brownfield*, si se tiene en cuenta la red en explotación. Los elementos más relevantes con respecto al costo de desarrollo de la red son los

relacionados con la ubicación de las centrales telefónicas, los puntos de distribución y la localización de los patrones de división.

En otro estudio se propone un método simple para obtener un desarrollo óptimo de una colección de herramientas de diseño de redes basadas en los SIG [12]. El prototipo del sistema agiliza la planificación de redes FTTH, que depende de la información georeferenciada de la región analizada, específicamente los datos urbanos geográficos que incluyen los mapas de las calles, construcciones y hogares del área en cuestión, en la cual se distinguen 3 tipos de clases de nodos de acuerdo a la demanda de ancho de banda de los usuarios. El diagrama de la red se realiza usando una topología en estrella y en bus. Además, se muestra la distribución de los nodos de la red y los cables conectados a ellos para asegurar la cobertura de la región completa con el menor costo posible.

También se propuso una plataforma de migración de la red de acceso de cobre a fibra óptica con una infraestructura FTTx-PON optimizada y escalable usando el sistema de información geográfica ArcGIS [51]. Se explica en detalle las actividades realizadas por los operadores para analizar los requerimientos de un área determinada y el posterior planeamiento optimizado de la red. En dicha investigación se comparan los resultados de despliegue físicos reales con simulaciones en regiones geográficas seleccionadas de Pakistán, en los cuales se obtuvo la reducción de los gastos de inversión y operación de la red durante el despliegue de servicios de telecomunicaciones mediante redes PON en escenarios *greenfield* y *dryfield*.

Las aplicaciones SIG incorporan elementos acerca de la teoría de grafos, base de datos, empleados en el planeamiento de redes y que pueden incluir algoritmos de programación lineal, métodos de búsqueda heurística y otros [52], que aunque no se abordan en este trabajo, es un área de investigación considerada para obtener un diseño de red automático, en el que se optimice, por ejemplo, el costo de despliegue de la red de telecomunicaciones.

## 1.7. Conclusiones del capítulo

La variante FTTC-ADSL2+ puede utilizarse como solución de acceso para ofrecer los servicios de telecomunicaciones sobre el par de cobre, para los clientes residenciales en una primera etapa de despliegue de la red. Posteriormente, es necesaria su actualización por la tecnología de vectorización VDSL2 para proporcionar mayores tasas de transferencia a los abonados que se localizan cercanos a la central telefónica a una

distancia inferior a 500 m. Ambas tecnologías permiten la reutilización de la planta externa de cobre en explotación, sin embargo, su principal inconveniente sigue siendo la disminución de la razón de transferencia con el aumento de la distancia del enlace entre la central telefónica y el equipo del cliente. Por tanto, es necesario, el despliegue de fibra óptica en la red de alimentación y distribución para reducir la distancia del lazo de abonado de cobre, así como su inserción en la red de acometida para garantizar los altos requerimientos de velocidad de transmisión de los servicios de telecomunicaciones que se pueden ofrecer en la actualidad.

La red GPON es la opción elegida para entregar los servicios de banda ancha sobre fibra óptica hasta el hogar, comercios e industrias. Las tecnologías ópticas especificadas en los estándares XG-PON y NG-PON2 pueden coexistir con los escenarios de despliegue de redes GPON. TWDM PON y PtP WDM PON posibilitan la continua modernización de la red de acceso, la actualización del equipamiento y la reutilización de los componentes de la ODN de las redes PON tradicionales.

La red FTTH-GPON permite la modernización de la red de cobre al emplear la fibra óptica como medio de transmisión y los equipos necesarios para garantizar velocidades superiores en la última milla. El manejo de la información geográfica de los componentes de la planta externa tiene un papel relevante durante el proceso de diseño de la red de acceso óptica, pues posibilita un menor tiempo dedicado a las tareas de diseño y constituye un factor importante en la reducción del CAPEX de la red.

El sistema de información geográfica QGIS contiene funcionalidades a través de sus *plugins* que lo hacen una buena opción para el trabajo con la cartografía digital. La representación de la información a través del modelo de datos vectorial es la idónea para modelar los componentes de la OSP de la red de telecomunicaciones.

# CAPÍTULO 2

## Diseño de red de acceso de banda ancha

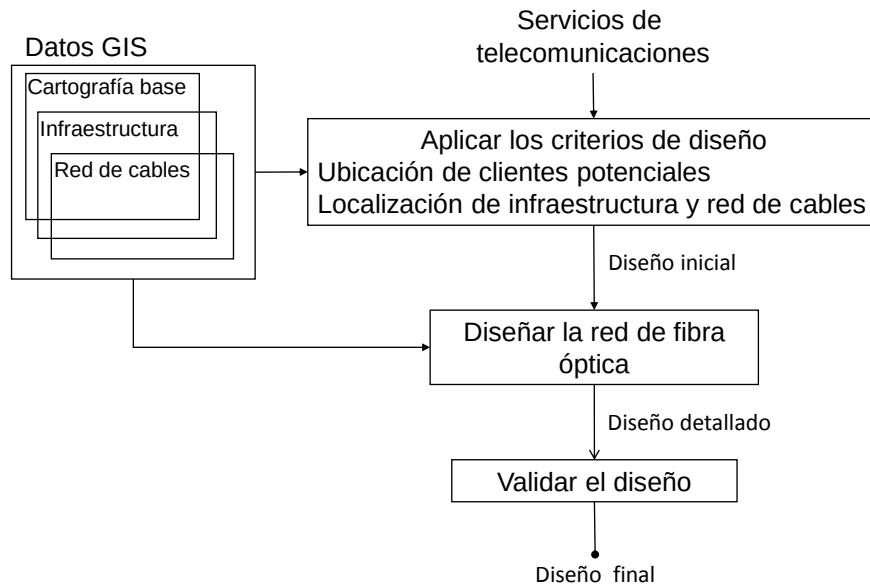
---

En el capítulo se presentan los elementos considerados para el diseño de redes FTTx, que incluyen la información geográfica de la infraestructura de telecomunicaciones y de los puntos de demanda de servicios, la valoración del equipamiento y proveedores para la implementación de la red. Se propone el diagrama lógico de la red y la interconexión de los elementos de la planta externa asociada al área básica de la central telefónica. Finalmente, se describen las herramientas utilizadas para el diseño de la red de acceso óptica y su validación técnico-económica.

### 2.1. Solución general

Para la modernización de la planta externa del operador de telecomunicaciones y satisfacer los requerimientos de los servicios de banda ancha, se propone la red de acceso óptica mediante las arquitecturas FTTx y la tecnología GPON, para lo cual se diseña la topología de red, basado en el manejo de la información geográfica. La propuesta de la red óptica pasiva y la reutilización de la infraestructura existente en las regiones en las cuales predominan las redes aéreas soportadas sobre par de cobre, reduce los costos durante la actualización de la red. Además contribuye a reducir el efecto negativo de la obsolescencia tecnológica mediante la incorporación de equipos ópticos que soporten la tecnología GPON. En la figura 2.1 se muestra el esquema general de la solución propuesta.

Se considera la propuesta de servicios de banda ancha para Cuba y que se ofertan actualmente a nivel internacional. El análisis se basa en las diferentes capas correspondientes a la cartografía digital de base, de infraestructura de instalaciones y de la red de cables pertenecientes al área de servicio de una central telefónica. El manejo de



**Figura 2.1.** Esquema general de la solución propuesta

los datos GIS sobre la localización de los puntos de demanda contribuye a la toma de decisiones en el proceso de modernización de la planta externa en explotación para garantizar los requerimientos de servicios de banda ancha en el área de estudio. El sistema de información geográfica proporciona los recursos para la entrada, almacenamiento, análisis y generación de la información georeferenciada en correspondencia con los datos GIS de una región determinada.

También, se abordan las arquitecturas FTTx que pueden desplegarse, teniendo en cuenta las características del escenario, tecnologías y equipamientos a utilizar en el despliegue de la red de acceso óptica. En el diseño de la topología de la red se utiliza la cartografía base con las parcelas de clientes, rutas de vías/calles y otras, que pueden obtenerse a través de las instituciones encargadas del planeamiento territorial. También, la cartografía digital de infraestructura de instalaciones por medio de la localización de los componentes de la OSP en el área básica de la central telefónica. Las líneas del bucle de abonado, generalmente, siguen las rutas de calles por medio de la red aérea o soterrada. Ambas son elaboradas sobre la cartografía base del territorio objeto de análisis; sus datos se obtienen de la cartografía digital (AutoCAD) o impresa existente y mediante GPS.

Para la validación del diseño de red se realizan los cálculos técnicos y económicos que



evidencian el cumplimiento de los requerimientos técnicos de los enlaces ópticos mediante cálculo de enlaces y simulaciones, así como la comparación entre los costos de inversión de la red para los escenarios propuestos. Los resultados obtenidos permiten realizar la mejora necesaria basada en los criterios de diseño.

## 2.2. Servicios de telecomunicaciones

Como parte del diseño de la red se realiza el análisis de la demanda de servicios de telecomunicaciones. En este sentido, se tuvo en consideración la propuesta de escenarios y servicios de banda ancha que ETECSA pudiera ofertar sobre las redes cableadas en diferentes regiones de Cuba, para lo cual se propusieron 4 escenarios que dependen de la situación geográfica, tecnológica y la demanda real de servicios; ellos son [53]: urbano, con alta densidad de tráfico; urbano, con densidad de tráfico moderada; rurales periférico y alejado de la ciudad.

El dimensionamiento de la capacidad de los enlaces GPON se realiza en función de los servicios que se le pueden ofrecer a los usuarios finales conectados a un puerto de la OLT. En la tabla 2.1 se presentan los requerimientos de velocidad de transmisión por servicios de telecomunicaciones, basado en la propuesta para Cuba [53] y otras a nivel internacional [54].

**Tabla 2.1.** Servicios de telecomunicaciones [54]

| velocidad de transmisión | servicios de telecomunicaciones |
|--------------------------|---------------------------------|
| 64 kbps                  | Telefonía                       |
| 2 Mbps                   | Juegos en línea                 |
| 2 Mbps                   | Videoconferencia                |
| 10 Mbps                  | Internet                        |
| 18 - 20 Mbps, 3 Mbps     | 2 canales HDTV (MPEG-4), SDTV   |

También se consideró que a nivel mundial, por ejemplo, los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), actualmente requieren al menos velocidades de descarga/subida de 25/3 Mbps [55]. Esto se debe a los requerimientos de los servicios de video, tales como video bajo demanda y televisión de alta definición. El tráfico generado por estas aplicaciones determina las condiciones del enlace que deben ser garantizadas.

De forma general, se tienen en cuenta 2 tipos de usuarios: para los casos de vivienda residencial individual y vivienda residencial en edificio multifamiliar, llamado cliente residencial y si es una empresa, industria e institución, denominado cliente no residencial o estatal. Se asume que el 100 % de los subscriptores en la región de análisis demandan una conexión de fibra óptica para acceder a los servicios de banda ancha.

## 2.3. Datos GIS

En el procesamiento de los datos GIS se emplea el QGIS para la entrada, manejo, visualización, análisis y generación de la información georeferenciada sobre los puntos de demanda de servicio, la localización de la ruta que sigue la red aérea y soterrada. En el diseño de la topología de la red de acceso de banda ancha se considera la información geográfica de la región en la que se desplegará la nueva red de telecomunicaciones, así como la localización y características de los elementos de la OSP existente.

El SIG contribuye al proceso de planeamiento y diseño de la red mediante las funcionalidades ofrecidas para el manejo de la información geográfica de los elementos descritos anteriormente que se representan mediante un modelo de datos vectorial. A continuación se describen los elementos considerados para el trabajo con la cartografía o planimetría de base, infraestructuras de instalaciones y de la red de cables en correspondencia con las normas técnicas de ETECSA.

### **Cartografía digital de base**

La cartografía base constituye la información de referencia para la representación de los elementos de la red de telecomunicaciones en un área de proyecto. Su información se obtiene a partir de mapas digitales con información georeferenciada y de imágenes satelitales. En la investigación se utilizan los datos ofrecidos por la Dirección Provincial de Planificación Física (DPPF) y su dirección municipal de Manzanillo con la información del censo de población del 2012 en la provincia de Granma. Los datos están organizados en diferentes capas de entidades, entre ellas se encuentran la red vial, líneas de fachadas, nombres de las calles/vías, UBIT, parcelas, rótulo postal y otras.

Los puntos de demanda se pueden representar por el centro geográfico o centroide de la parcela a la que pertenecen. A partir de la cartografía base se realiza la localización de los grupos de clientes de telecomunicaciones los cuales se asignan a un punto de

distribución cuya ubicación depende de la región de despliegue. Las características técnicas del equipamiento asignado están determinadas por el tamaño del grupo de demanda. Cada grupo de usuarios se conecta al equipo localizado en el punto de distribución correspondiente, mediante el cable de acometida.

En el escenario donde no se considera la infraestructura de telecomunicaciones en explotación se crean los grupos de abonados a partir del tipo de cliente, cantidad de unidades de viviendas, oficinas y la distancia entre los  $N$  puntos de demandas, con la cual se obtienen los  $k$  clientes más cercanos. En el caso con infraestructura en explotación, se tienen en cuenta los criterios anteriores y la distancia del punto de localización del abonado a los elementos de la planta externa como: postes, cajas terminales, registros y gabinetes.

### **Cartografía digital de infraestructura de instalaciones**

La cartografía de infraestructura de instalaciones recoge la información sobre los puntos o nodos de la OSP soportada sobre par de cobre y fibra óptica, tales como: MDF/ODF, gabinetes, cajas terminales, apoyos, registros y empalmes en el área básica de la central telefónica. Su información se obtiene mediante GPS, mapas digitales e impresos, en la escala de 1:1000. En la investigación se trabaja con los datos del levantamiento cartográfico de la planta externa de la red de cobre realizado por los especialistas de ETECSA en Granma.

Para el diseño de la red FTTx se considera que los elementos de red entre cada ONT/ONU y la OLT en el centro de telecomunicaciones pueden ser modelados como puntos. Los apoyos de la red aérea son los postes y paredes de viviendas y locales. Las cajas terminales se ubican en postes, paredes de edificaciones y en registros; estos últimos son los puntos de la red soterrada.

El ODF es el elemento ubicado en el edificio de la oficina central que independiza la red de distribución óptica, cumple funciones de terminación, numeración e interconexión. Además se ubican en gabinetes de telecomunicaciones, componente de la red flexible donde terminan el cable de cobre o fibra óptica de la red primaria y secundaria para realizar la conexión entre ellas, la cual constituye un empalme cuya función es dar continuidad a los distintos tramos de red.

### **Cartografía digital de la red de cables**

La cartografía de la red de cables posee los datos de los elementos de la OSP: las corazas, cables, canalizaciones y conductos en el área básica de la central telefónica. Estos pueden ser modelados como polilíneas, las cuales son una secuencia de puntos que

se pueden relacionar con los componentes de un enlace. Su información se obtiene a través de los mapas digitales. En la investigación se trabaja con los datos del levantamiento cartográfico de la red de cables de cobre realizado también por los especialistas de ETECSA en Granma.

Un enlace óptico lo constituye una secuencia de puntos mencionados anteriormente que son nodos de una polilínea. Es la conexión entre un puerto PON de la tarjeta de línea en un extremo y una ONT/ONU en el otro. Se establecen varios enlaces sobre una misma fibra. La localización de los puntos que lo conforman y el valor de sus atributos temáticos se pueden variar para cumplir con el valor de pérdidas permisibles en la ODN.

El enlace tiene valores fijos a considerar que no varían de uno a otro, como la clase del enlace GPON, atenuación definida por cada clase, atenuación por envejecimiento de la fibra ( $A_{FO}$ ) en  $dB/km$  para cada longitud de onda de trabajo y margen de seguridad. En el análisis basado en el SIG la longitud del enlace se calcula con precisión sobre la capa de calles/vías entre el punto de localización de la CO y el punto de demanda, así como a través de la ruta que sigue la red de cables existente.

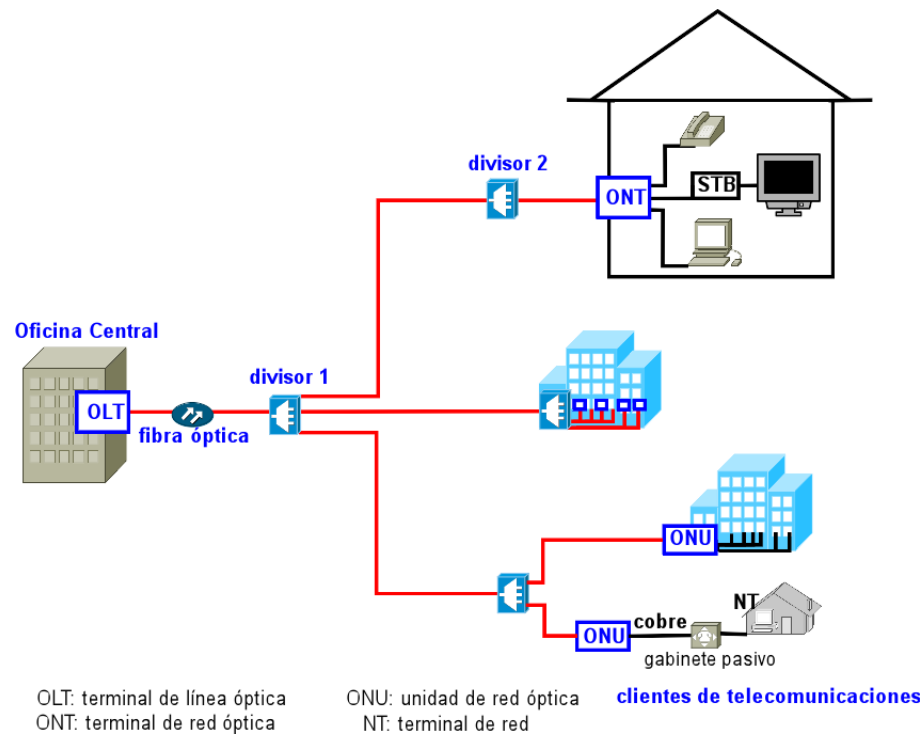
## 2.4. Especificaciones de diseño de la red óptica pasiva

Las redes PON poseen una estructura de la topología en árbol punto a multipunto, que reduce las inversiones en el equipamiento y posibilita un mejor reaprovechamiento de la fibra óptica. En la investigación se hace referencia al caso de un sitio *brownfield* en el cual se reutiliza la información geográfica sobre la ubicación del centro de comunicaciones y los postes de la red aérea en la región.

Se asume una distancia física máxima de las redes PON de 10 km entre la ONT/ONU y la OLT [38]. Las tecnologías PON utilizan la fibra óptica monomodo. El alcance máximo depende de la potencia de transmisión de los equipos, en función de la clase del enlace, la sensibilidad del receptor, pérdidas introducidas por el cable de fibra óptica, divisores ópticos, conectores y empalmes.

El divisor óptico pasivo introduce las mayores pérdidas en el enlace, por lo cual su adecuada selección juega un rol importante en el diseño de la topología, pues debe establecerse un compromiso entre la razón de división y la potencia manejada por los equipos; esto influye en el alcance de la red, la cantidad de divisores, de fibras a instalar y el número de puertos PON utilizados.

Para garantizar los requerimientos de los servicios de telecomunicaciones de los clientes residenciales y no residenciales se propone una arquitectura FTTH-GPON la cual forma una estructura de red flexible que lleva la fibra óptica hasta el local del usuario final. Una alternativa a corto plazo para la instalación de nuevos servicios consiste en utilizar una arquitectura basada en fibra y cobre, la cual sería una etapa intermedia en el proceso de modernización de la red. Esta solución puede utilizar FTTC/FTTB con GPON y VDSL2. Si la distancia es superior a 500 m se debe implementar la combinación FTTC-ADSL2+ para ofrecer los servicios de banda ancha en un menor tiempo. En la figura 2.2 se muestra el diagrama general de la red.



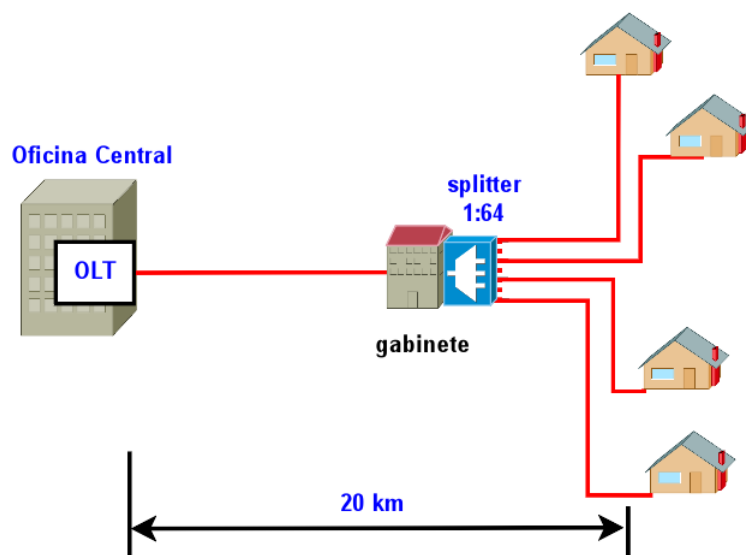
### Figura 2.2. Solución de red para ofrecer los servicios de banda ancha

A continuación se presentan los aspectos considerados en el diseño de la topología de la red PON:

- Localización de la terminal de línea óptica
- Localización los divisores ópticos
- Localización de las terminales de red óptica
- Distribución del cable de fibra óptica

### 2.4.1. Localización de la OLT

La oficina central se ubica en el centro de carga de la región de cobertura y la terminal de línea óptica se localiza en ella debido a que se reducen los costos en la operación y mantenimiento. El dimensionamiento de la OLT depende de la cantidad de clientes potenciales a servir. La OLT constituye el nodo raíz del árbol al cual se conectan los nodos de subscriptores que conforma la red óptica y está compuesta por tarjetas de línea y de control. Una tarjeta de línea posee varios puertos PON a los que se conecta cada fibra óptica monomodo. En la figura 2.3 se muestra la posible ubicación de la OLT.



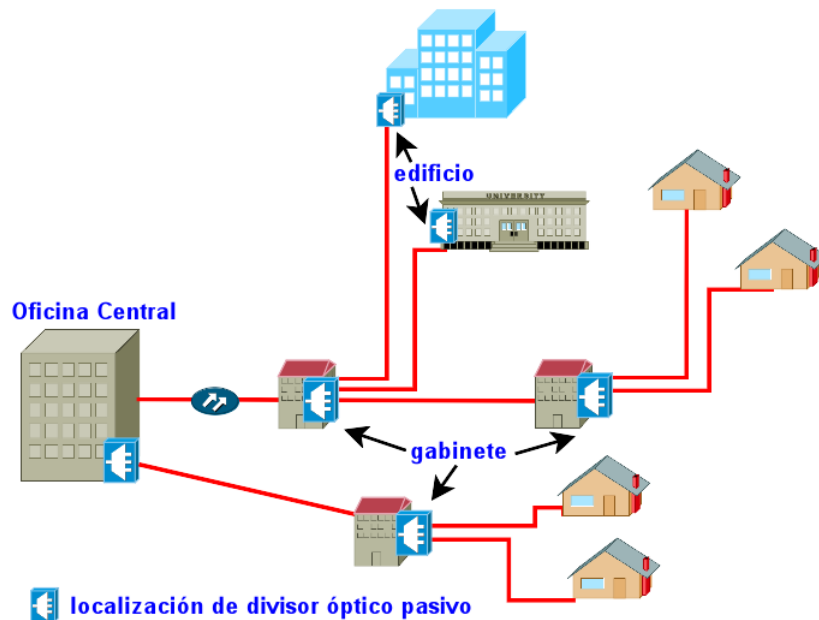
**Figura 2.3.** Ubicación de la OLT en la oficina central

La OLT debe soportar el tráfico originado por los clientes de telecomunicaciones y encaminarlo hacia la red de agregación. En el diseño se utiliza una OLT que tenga las siguientes características:

- Contará con tarjetas de 4 u 8 puertos GPON que soporten hasta 64 ONUs por puerto PON y tarjeta de control para las operaciones de administración y mantenimiento.
- Operación en las longitudes de onda: 1310 nm para voz y datos, en sentido ascendente, 1490 nm para voz y datos, descendente y 1550 nm para distribución de video en descarga.
- Un puerto Gigabit Ethernet para la conexión hacia la red de agregación.

### 2.4.2. Localización de los divisores ópticos

La localización de los divisores ópticos pasivos puede ser de 3 formas [51]: configuración de  $n$  etapas de división, centralizada y dispersa. En general, los *splitter* se ubicarán en la oficina central en una primera etapa, durante el proceso de migración de la red de cobre a fibra en la red de alimentación y distribución. Posteriormente, será distribuida en gabinetes y registros de la red soterrada, así como en las cajas terminales en postes, edificios empresariales y multifamiliares. Un divisor se asigna a un grupo de clientes o a otro divisor que se conecta al equipo del operador de telecomunicaciones.



**Figura 2.4.** Localización de los divisores ópticos pasivos

Los divisores ópticos son de  $M:N$  conexiones, donde  $M = 1, 2$ , es la cantidad de entradas y  $2 \leq N \leq 64$ , el número de salidas, con  $N$  potencia de 2. Las pérdidas introducidas por el splitter depende de la cantidad de salidas que posee. A una mayor razón de división se reduce la velocidad de transmisión con el incremento de la cantidad de usuarios. Un puerto GPON puede servir 64 clientes con una velocidad promedio 37.5 Mbps por subscriber.

Se asume que se deben desplegar como máximo 2 niveles de división de la señal óptica en cascada para reducir el costo de despliegue por abonado. En el primer nivel en la oficina central, se utilizarán razones de división de  $1:N$  o  $2:N$  (para garantizar redundancia), así como  $1:8$ , si se localizan en gabinetes o registros en puntos de distribución.

En la segunda etapa de división se instalan divisores ópticos de 1:8, 1:16 dentro de la caja terminal óptica localizada en puntos de acometida correspondientes a postes o registros. En el caso de los despliegues FTTB el segundo nivel se puede ubicar en el cuarto de telecomunicaciones en un edificio multifamiliar o de una empresa, a partir del cual se distribuirá hacia otros puntos de demanda cercanos.

### 2.4.3. Localización de las terminales de red óptica

En la localización del equipo terminal se debe considerar cada tipo de cliente y su distribución geográfica. Para ello, se crean grupos de clientes que son asignados a un divisor óptico. Para el despliegue de FTTH la ONT se instala en el local del abonado. En el caso de FTTB, la ONU se localiza en el cuarto de telecomunicaciones de edificios multifamiliares y empresariales. También se puede ubicar en las instalaciones existentes cercanas al cliente con la unidad de múltiples usuarios (MDU, *Multi-Dwelling Unit*) en los despliegues de FTTC. La ONU se conecta al terminal de red del usuario para aprovechar la red de cobre existente, mediante las tecnologías xDSL. Ambas arquitecturas evolucionaron a la red FTTH para la modernización de los equipos de la red de cobre por fibra.

La ONT/ONU se conecta a la central telefónica a través de la OSP soportada sobre fibra óptica la cual permite al usuario acceder a servicios de banda ancha como televisión de alta definición, internet de alta velocidad (HSI, *High Speed Internet*), aplicaciones 3D, telemedicina y otros.

### 2.4.4. Distribución del cable de fibra óptica

Los despliegues de red FTTH emplean la fibra óptica en todas las partes de la red de acceso: red de alimentación, distribución y acometida. El tramo entre la terminal de red del nodo cliente y el segundo divisor conforma el cable de acometida, en la cual se desplegarán cables de 2 fibras para garantizar una de reserva hasta la caja terminal óptica por cliente y prever la activación de subscriptores P2P.

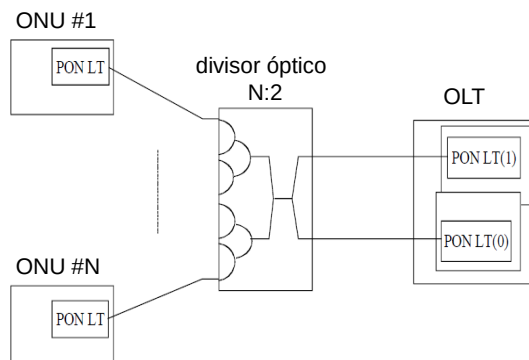
La conexión entre el segundo y primer nivel de *splitter* se realiza por medio del cable de distribución. En esta parte de la red la cantidad de fibras del cable depende del tamaño del grupo de clientes de telecomunicaciones y de la ubicación de las edificaciones.

El cable de alimentación posibilita la interconexión entre la OLT y el primer grupo de divisores ópticos. Se desplegarán en función de la cantidad de divisores de primer



nivel necesarios en la ODN. En regiones *brownfield*, se pueden reutilizar los soterrados y registros existentes para la instalación de los nuevos cables de alimentación.

Se puede emplear una combinación de la topología en anillo y árbol para garantizar la redundancia de los enlaces GPON en este tramo de red a través de la protección tipo B. El esquema de la figura 2.5 muestra la duplicación de las fibras ópticas y los puertos de la terminal de línea óptica entre ella y el splitter. El divisor óptico posee 2 puertos de entradas en el lado de la OLT. Dicha configuración reduce el costo de duplicar las ONUs, con la dificultad de que solo es posible recuperar el lado de la OLT [38].



**Figura 2.5.** Sistema GPON con protección tipo B [38]

La implantación de la red FTTB se realiza para proveer el servicio a los locales empresariales y edificios multifamiliares, mediante la instalación de la fibra en la red de alimentación y distribución. El despliegue de FTTC constituye la primera etapa en el proceso de migración y modernización de la OSP en la cual se sustituye el tramo de cobre por fibra en la red de alimentación.

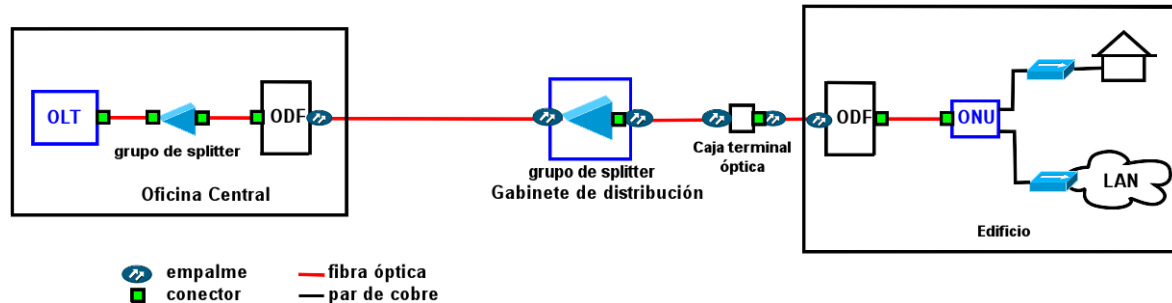
En general, el alcance físico de la red cubrirá una región menor que 10 km. Se utiliza la fibra óptica monomodo y la topología de la red es punto a multipunto con divisores de potencia óptica en la ODN.

### 2.4.5. Escenarios de diseño de la ODN

A continuación se presenta el diseño de la ODN de diferentes escenarios para ofrecer los servicios de banda ancha a diversos grupos de clientes de telecomunicaciones mediante la tecnología GPON. Para ello se consideraron los requerimientos para la localización de la oficina central, los divisores ópticos pasivos, el equipo terminal y la

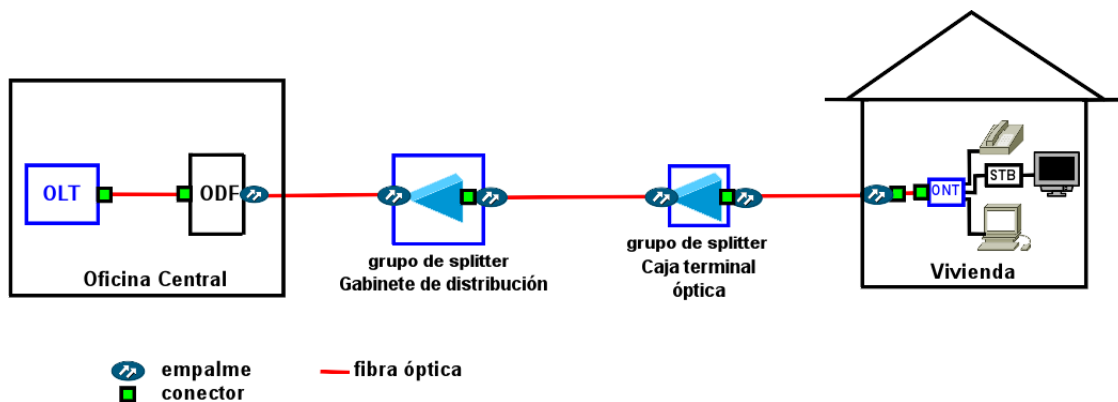
distribución del cable de fibra óptica.

El escenario mostrado en la figura 2.6 representa la arquitectura FTTB con la instalación de 2 niveles de división, localizados en la oficina central y en el gabinete de distribución. Los clientes no residenciales se conectan a través de la ONU localizada en un gabinete en el interior de la construcción.



**Figura 2.6.** Diseño de la ODN con 2 niveles de *splitter*, en CO y gabinete de distribución

En la figura 2.7 se propone el uso de 2 etapas de división en cascada, el primer nivel se localiza en el gabinete de distribución y el segundo en el punto de acometida donde se instala la caja terminal óptica. Mediante una arquitectura FTTH/FTTB se distribuyen los servicios de banda ancha para todos los usuarios.



**Figura 2.7.** Diseño de la ODN con 2 niveles de *splitter*, en gabinete de distribución y caja de conexión óptica

Los escenarios presentados pueden ser aplicados para garantizar de forma escalable el despliegue de la red de acceso óptica. Inicialmente, se utiliza un solo nivel de splitter localizado en los puntos de distribución existentes. Luego, es necesario insertar un segundo nivel de división para poder servir más usuarios por puerto GPON, el primer nivel estaría en la oficina central y el segundo se mantiene en los puntos de

distribución. Posteriormente, con el crecimiento de los puntos de demanda, se instala la segunda etapa de división lo más cercano al cliente, en los puntos de acometida y el primer nivel, en puntos de distribución nuevos o existentes. De esta forma, se garantiza la escalabilidad de la red.

## 2.5. Propuesta de equipamiento

A continuación se analiza el equipamiento propuesto para el despliegue de redes FTTH-GPON. En Cuba, se han desplegado equipos de telecomunicaciones de fabricantes de nivel mundial como ZTE y Huawei, que brindan soluciones tecnológicas para garantizar el acceso a los servicios de banda ancha. Se realizó el despliegue de GPON en Cayo Coco, provincia de Ciego de Ávila, con el empleo de dispositivos provistos por ZTE. Por otro lado, Huawei es el proveedor estratégico de ETECSA, ofrece una migración de la red con la inversión protegida y posibilita la modernización de la red con la reutilización de equipos: FTTC, FTTB y FTTH, por lo cual en el trabajo se presentan las características del equipamiento propuesto por este proveedor.

### Terminal de línea óptica

Huawei comercializa la OLT MA5600T que posee 16 ranuras para tarjetas de servicio y la OLT MA5603T de menor capacidad con solo 6. En la presente investigación se propone la OLT MA5600T. Este equipo se ubica en la oficina central y permite la conexión entre la red de acceso y la red de agregación. Proporciona el acceso a servicios ADSL2+, VDSL2, POTS, RDSI, GPON y otros; tiene interfaces GE/10GE de alta densidad para conexiones en cascada, hasta 36 interfaces de 10 GE o 140 GE, no se requiere inversiones adicionales en *switch* de agregación y garantiza un menor consumo de energía y costo de mantenimiento.<sup>5</sup>

Para establecer el enlace GPON se pueden utilizar las tarjetas GPBD, GPFD, GPBH; la diferencia fundamental está en que la tarjeta GPFD tiene 16 puertos GPON y las otras 8. Ellas soportan los módulos GPON SFP B+ o C+ y permite hasta 128 usuarios por puerto. En la tabla 2.2 se muestran las características técnicas.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> <http://www1.huawei.com/ec/products/fixed-access/fttx/olt/ma5600t/index.htm>

<sup>6</sup> <http://www.hza-network.com/products/Huawei-MA5600T-Series-Card-GPFD.html>

**Tabla 2.2.** Especificaciones técnicas de la tarjeta GPFD

| Parámetros                       | Especificaciones de GPON (clase B+)            | Especificaciones de GPON (clase C+)            |
|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| velocidad de transmisión         | transmisión: 2.49 Gbps<br>recepción: 1.24 Gbps | transmisión: 2.49 Gbps<br>recepción: 1.24 Gbps |
| longitud de onda de operación    | transmisión: 1490 nm<br>recepción: 1310 nm     | transmisión: 1490 nm<br>recepción: 1310 nm     |
| alcance                          | 20 km                                          | 20 km                                          |
| tipo de conector                 | SC/PC                                          | SC/PC                                          |
| potencia de transmisión          | 1.5 ~ 5 dBm                                    | 3 ~ 7 dBm                                      |
| sensibilidad máxima del receptor | -28 dBm                                        | -32 dBm                                        |
| razón de extinción               | 8,2 dB                                         | 8,2 dB                                         |

### Terminales de red óptica ONT/ONU

Huawei comercializa varios equipos ONT para ofrecer los servicios de banda ancha mediante el despliegue de FTTH-GPON, entre ellos están HG8240, HG8242, HG8245, HG8247, HG8447. Este terminal se localiza en el local de los usuarios residenciales y pequeñas empresas; sirven de interfaz entre la LAN del cliente y la red de acceso. En general, poseen interfaces POTS/GE/USB/CATV/Wi-Fi .

Específicamente, se escoge la ONT Echo Life HG8247H<sup>7</sup>, proporciona dos puertos POTS, cuatro 1000BASE-T, uno USB, uno CATV y uno Wifi (IEEE 802.11 b/g/n), por lo cual constituye una opción atractiva para entornos residenciales. Soporta el estándar ITU-T G.984.2 para un enlace GPON clase B+. En la tabla 2.2 se muestran las especificaciones técnicas del equipo.<sup>8</sup>

**Tabla 2.3.** Especificaciones técnicas del puerto GPON de la ONT HG8247H

| Parámetros                    | Especificaciones de GPON           |
|-------------------------------|------------------------------------|
| clase                         | B+                                 |
| longitud de onda de operación | descarga: 1490 nm; subida: 1310 nm |
| tipo de conector óptico       | SC/APC                             |
| sensibilidad del receptor     | -27 dBm                            |

Por otro lado, Huawei posibilita los despliegues de fibra hasta un edificio o un gabinete

<sup>7</sup> <http://www1.huawei.com/ec/products/fixed-access/fttx/ont/hg8247/index.htm>

<sup>8</sup> <http://en.it-dialog.com.ua/products/subscriber-terminals/huawei-gpon-ont-echolife-hg8247h.html>

a través de sus módulos de acceso multiservicio MA5616 y MA5612. Ellos pueden funcionar como mini DSLAM o nodo de acceso multiservicio (MSAN, *Multiservice Access Node*).<sup>9</sup> La combinación de una OLT MA5600T que alimente a varias ONU MA5616, es una configuración típica para implementar la arquitectura FTTC, con la cual se pudiera reutilizar la infraestructura de cobre en explotación en una región determinada.

La ONU MA5616 puede dar servicio hasta 128 usuarios xDSL, con la utilización de las tarjetas H83A/H835/H836ADLE para ADSL2+ o H83BVCLE para VDSL2. La ONU se ubica en los edificios multifamiliares y empresariales, como alternativa durante la migración de la red se puede instalar en los gabinetes de distribución. Las especificaciones técnicas del puerto GPON del equipo se muestran en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Especificaciones técnicas del puerto GPON de la ONU 5616

| Parámetros                       | Especificaciones de GPON                       |
|----------------------------------|------------------------------------------------|
| longitud de onda de operación    | transmisión: 1310 nm; recepción: 1490 nm       |
| velocidad de transmisión         | transmisión: 1,244 Gbps; recepción: 2,488 Gbps |
| potencia óptica de transmisión   | 0,5 ~ 5 dBm                                    |
| sensibilidad máxima del receptor | -27 dBm                                        |
| tipo de conector óptico          | SC/PC                                          |
| alcance                          | 20 km                                          |
| tipo de fibra óptica             | monomodo                                       |

### Red de distribución óptica

La fibra óptica monomodo es empleada en la solución propuesta. El cable de fibra óptica cumple con las especificaciones G.652D o G.657A y G.657B para FTTH y sus valores se muestran en la tabla 2.5. En la investigación se emplea WDM para la transmisión sobre una misma fibra óptica a través de diferentes longitudes de onda para el canal de descarga y de subida, lo que contribuirá a ahorrar en el costo de la red. Para las conexiones entre fibras se pueden emplear los empalmes por fusión, con menor pérdida de inserción que la introducida por los mecánicos.

<sup>9</sup> <http://www1.huawei.com/ec/products/fixed-access/fttx/mxu/MA5616/index.htm>

**Tabla 2.5.** Especificaciones del cable de fibra G.652D y G.657 [56][57]

| Parámetros                  | G.652D           | G.657A            | G.657B            |
|-----------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| atenuación (1310 - 1625 nm) | $\leq 0.4$ dB/km | $\leq 0.40$ dB/km | $\leq 0.40$ dB/km |
| atenuación (1383 nm)        | $\leq 0.4$ dB/km | $\leq 0.40$ dB/km | $\leq 0.40$ dB/km |
| atenuación (1550 nm)        | $\leq 0.3$ dB/km | $\leq 0.30$ dB/km | $\leq 0.30$ dB/km |

En la propuesta de red de acceso óptica se usan como máximo 2 niveles en cascada de división de la señal óptica. Los divisores ópticos operan en el rango de longitud de onda de trabajo de 1260-1650 nm. La utilización del *splitter* permite el despliegue de una red flexible. En la tabla 2.6 se muestran los valores de pérdidas de acuerdo con la razón de división de diferentes *splitter*. Los datos no incluyen las pérdidas por conector.<sup>10</sup>

**Tabla 2.6.** Especificaciones de divisores ópticos pasivos

| Modelo | Razón de división | Pérdida por inserción (dB) | Pérdida de retorno (dB)           |
|--------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| FBT    | 1:2               | $\leq 3,6$                 | $\geq 50$ (PC)<br>$\geq 55$ (APC) |
| FBT    | 2:2               | $\leq 3,6$                 |                                   |
| PLC    | 1:4               | $\leq 7,3$                 |                                   |
| PLC    | 2:4               | $\leq 7,6$                 |                                   |
| PLC    | 1:8               | $\leq 10,4$                |                                   |
| PLC    | 2:8               | $\leq 10,8$                |                                   |
| PLC    | 1:16              | $\leq 13,6$                |                                   |
| PLC    | 2:16              | $\leq 14,3$                |                                   |
| PLC    | 1:32              | $\leq 16,8$                |                                   |
| PLC    | 2:32              | $\leq 17,4$                |                                   |
| PLC    | 1:64              | $\leq 20,3$                |                                   |
| PLC    | 2:64              | $\leq 20,6$                |                                   |

Específicamente se puede utilizar el módulo de divisores ópticos perteneciente a la serie SPL9101 el cual soporta adaptadores tales como: SC/APC y SC/UPC. Además, tiene un diseño modular con el mismo tamaño para todas las razones de división presentadas anteriormente; se puede instalar en cajas de terminales ópticas, en gabinetes y posee colores para identificar el *pigtail* de entrada (verde) de los de salida (amarillo).

<sup>10</sup> [http://e.huawei.com/hk/marketing-material/global/products/enterprise\\_network/access/20150923123752](http://e.huawei.com/hk/marketing-material/global/products/enterprise_network/access/20150923123752)

## 2.6. Diseño de la red de fibra óptica con GIS

El diseño de la topología de la red FTTx es un problema complejo, se puede dividir en 3 subproblemas: agrupamiento de entidades, localización de *splitter* y creación de las rutas de cables de red entre el punto de localización de la oficina central y cada punto de demanda en una región determinada.

Durante el análisis de la región de estudio se obtienen las necesidades de modernización de la red de acceso en función de garantizar los requerimientos de nuevos servicios de telecomunicaciones y actualizar la infraestructura de red existente. Para ello, además se cuenta con el levantamiento cartográfico de la planta externa que contribuye al diseño de alto nivel y detallado de la red. Por lo que resulta de importancia para la investigación disponer de la información georeferenciada de los elementos de infraestructura y de la red de cables en explotación. Con los datos anteriores se realiza el estudio en el terreno para verificar/actualizar la información digital y a continuación, se desarrollan las tareas de diseño de red apoyado en aplicaciones informáticas.

En el diseño de la red se emplea el sistema de información geográfica QGIS v2.12.1-Lyon. También, el Mapinfo v12.0.2 es utilizado para la visualización de la topología de la red de planta externa existente. Con este software se realiza la preparación inicial de los datos GIS que posteriormente fueron normalizados en el QGIS para su uso en el resto de las operaciones de diseño.

De forma similar, mediante el QGIS se realiza el manejo de la información georeferenciada de la red de telecomunicaciones, mediante las funcionalidades que ofrece para el trabajo con mapas vectoriales. Además, se integra con la aplicación FiberPlanIT Designer v1.7.2<sup>11</sup>, el cual es un software que emplea los datos GIS de las localizaciones de edificios y las líneas centrales de las calles para el diseño de la red FTTx de acuerdo con los criterios establecidos [58]. Después de instalada, la aplicación se ejecuta a través de un *plugin* en el QGIS y se encarga del procesamiento de la cartografía digital para obtener un diseño optimizado a partir del costo de los materiales para el despliegue de la red de acceso óptica.

Inicialmente, FiberPlanIT Designer permite agregar al QGIS la cartografía digital en formato *shape* correspondiente a las capas de puntos de demanda, parcelas, líneas de calles, localización de la oficina central, postería, estructuras de acceso y otras. El sistema de referencia de coordenadas (CRS, *Coordinate Reference System*) empleado es

---

<sup>11</sup> <http://www.comsof.com/fiberplanit>

Cubasur. Posteriormente, se crean las rutas potenciales de cables aéreos y soterrados. Después, se definen las reglas de diseño necesarias en las que se consideran las características de la tecnología GPON, así como los factores de costo del equipamiento y de la mano de obra. Luego, se procesa el área de estudio. Por último, el software realiza el cálculo para obtener el diseño de la red de acceso y los resultados obtenidos se visualizan en el mapa.

La topología de la red generada puede ser modificada en función de mejorar el resultado obtenido, por ejemplo, mediante la modificación de la localización de cada nivel de *splitter* y su razón de división la cual incide en la cantidad de clientes por puerto GPON, de divisores, cables a desplegar en cada tramo de red, en el presupuesto de potencia óptica y costo de la red.

## 2.7. Validación técnico-económica

Para la validación técnica se realiza el cálculo de enlace óptico en el peor caso y mediante la simulación se evalúan la razón de error de bit y el factor Q, que ofrecen una medida de la calidad del sistema GPON diseñado. El análisis económico se establece por medio de la evaluación de los indicadores que contribuyen a la toma de decisiones sobre la viabilidad del proyecto.

### 2.7.1. Cálculo de presupuesto de potencia del enlace óptico

En el cálculo del enlace inciden las pérdidas introducidas por los equipos de transmisión y recepción, conectores, empalmes, las características de la fibra y un margen de pérdidas considerado. El enlace GPON debe satisfacer el valor de presupuesto de potencia de 28 dB para la clase B+, la cual es soportada por los equipos ONT/ONU y OLT propuestos.

En la investigación se efectúa el cálculo de atenuación total ( $A_T$ ) para el enlace de mayor longitud, pues constituye el caso más crítico. La  $A_T$  se calcula según la ecuación 2.1.

$$A_T = L * (\alpha_{FO} + \alpha_{env.FO}) + \alpha_E * N_E + \alpha_C * N_C + \alpha_{POS1} + \alpha_{POS2} + M_S \quad (2.1)$$

El margen de potencia ( $P_M$ ) se calcula mediante la ecuación 2.2.



$$P_M = P_T - S \quad (2.2)$$

Donde:

$P_t$ : potencia de salida del transmisor (dBm)

$S$ : sensibilidad del receptor (dBm)

$\alpha_{FO}$ : coeficiente de atenuación de la fibra óptica G.652D (dB)

$\alpha_{env.FO}$ : coeficiente de atenuación por envejecimiento de la fibra (dB/km)

$L$ : longitud del enlace (km)

$\alpha_E$ : pérdidas en los empalmes (dB)

$N_E$ : número de empalmes

$\alpha_C$ : pérdidas en los conectores (dB)

$N_C$ : número de conectores

$\alpha_{POS1}$ : pérdidas en el *splitter* de primer nivel (dB)

$\alpha_{POS2}$ : pérdidas en el *splitter* de segundo nivel (dB)

$M_S$ : margen de seguridad (dB)

En el cálculo de enlace se asumen varios valores teóricos de pérdidas introducidas por los componentes del enlace óptico [51]. Se trabaja con el coeficiente de atenuación de la fibra óptica G.652D de 0.4 dB (1310 nm), 0.3 dB (1490 nm) y un coeficiente de atenuación por envejecimiento de 0.05 dB/km; atenuación en los empalmes de 0.1 dB, en los conectores de 0.2 dB y el margen de seguridad de 3 dB.

El valor obtenido de la atenuación total debe ser menor que el margen de potencia del sistema de fibra óptica; si se cumple lo anterior, se hace viable técnicamente la implementación de los enlaces GPON. En caso de que no se cumplan los requerimientos del enlace óptico se debe modificar la razón de división o la cantidad de etapas de *splitter*, lo cual incide en la cantidad de divisores y fibras ópticas a desplegar en cada tramo de red, lo que repercute en el CAPEX de la propuesta.

También, se realiza la simulación del enlace más crítico mediante el Optisystem 7.0. La herramienta posibilita la evaluación de los indicadores de calidad y desempeño del sistema GPON diseñado, mediante el análisis de la razón de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) y el factor Q.

El factor  $Q$  tiene en consideración efectos no deseados como el ruido, la dispersión cromática, los cuales pueden degradar la señal y ocasionar errores de bit. Dado un valor alto del factor de calidad, mejor es la relación señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) y por tanto, es más baja la probabilidad de que ocurran errores. Asimismo, la BER representa el número de bit con errores recibidos con respecto a la cantidad total de bits transmitidos en un intervalo de tiempo. Por tanto, el análisis de dichos parámetros es importante para la evaluación de la factibilidad técnica de la red de acceso óptica.

### 2.7.2. Cálculo de presupuesto económico

En el cálculo del presupuesto económico del diseño de red se considera el costo del equipamiento y de los cables de fibra óptica en la red de alimentación, distribución, acometida, así como el costo de instalación de la red. Los resultados se obtienen a través del listado de costo de material (BoM, *Bill of Material*) en un archivo *excel* generado por la herramienta FiberPlanIT Designer.

El software permite la inserción de los valores de costo para cada tramo de red a través de las reglas de diseño en la opción Reglas (*Rules*). Junto al resumen general del CAPEX, se genera un listado detallado de los componentes de la red obtenida.<sup>12</sup>

La valoración económica para la modernización de la red de acceso, además de la inversión inicial requerida, se basa en el costo por cliente sin conectar e ingresos anuales estimados por pago de servicios de telecomunicaciones, la reutilización de infraestructura existente y el análisis de métodos dinámicos de evaluación financiera.

Se emplean los indicadores Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación (PR) para la evaluación de la inversión. El VAN puede ser calculado mediante la ecuación 2.3.

$$VAN = \sum_{t=0}^N \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (2.3)$$

Donde  $FC_t$  es el flujo de caja en cada año,  $t$  es el período de flujo de caja para el cual se realiza el cálculo y  $k$  es la tasa de descuento. La obtención de un valor positivo del VAN implica que el proyecto es viable y es aceptable la inversión. Por su parte, la TIR es la tasa en la que el VAN se iguala a cero, se utiliza como elemento complementario

<sup>12</sup> <http://www.manula.com/manuals/comsof/fiberplanit/1.7/en/topic/bill-of-material#bom>

para decidir la viabilidad del proyecto. Se calcula a través de la ecuación 2.4.

$$\sum_{t=0}^N \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} = VAN = 0 \quad (2.4)$$

En el análisis se compara la TIR con la tasa de descuento utilizada en el cálculo del VAN. Si  $TIR = k$ , no hay interés; si  $TIR > k$ , existe rendimiento y si  $TIR < k$ , el proyecto se rechaza. Se utilizan las funciones del *excel* para obtener los valores de los indicadores explicados. También, se calcula el período de recuperación (*pay-back*) descontado o actualizado, mediante la ecuación 2.5.

$$PR = \sum_{t=0}^N \frac{FC_t}{(1 + k)^t} \quad (2.5)$$

El  $PR$  se obtiene al tomar el valor de costo inicial con signo negativo, como año 0 y se le adicionan los flujos de caja actualizados de cada año. Cuando se cubra el tiempo de costo de la inversión del proyecto, se habrá encontrado la cantidad de años y meses en que se recupera la inversión.

## 2.8. Conclusiones del capítulo

El diseño de la red de acceso óptica emplea una topología punto a multipunto con 2 niveles de divisores ópticos pasivos 1:8 en cascada distribuidos en la ODN para contribuir a la modernización de la red de cobre en sitios *brownfield*. Se pueden realizar otras combinaciones de *splitter* de forma que se garantice en todo momento el cumplimiento del presupuesto de potencia óptica del enlace. Huawei constituye el proveedor estratégico de ETECSA cuyo equipamiento GPON conforma una efectiva solución para garantizar los requerimientos de los servicios de banda ancha. El sistema de información geográfica QGIS y la herramienta FiberPlanIT Designer facilitan y agilizan el proceso de diseño de la topología de la red de acceso óptica. El VAN, la TIR y el PR son indicadores que necesariamente tienen que analizarse juntos, pues se complementan entre sí para evaluar la factibilidad económica de un proyecto de inversiones.

# CAPÍTULO 3

## Validación del diseño propuesto

---

En el capítulo se presenta el diseño de la red de acceso FTTx que permite la modernización de la planta externa de ETECSA para garantizar los servicios de banda ancha en la región de estudio. El manejo de la información georeferenciada de la región se realiza a través del FiberPlanIT Designer integrado con el sistema de información geográfica QGIS. La propuesta se valida mediante el cálculo de enlace óptico, así como la simulación de la red mediante el software OptiSystem y finalmente, se presenta la valoración económica de la propuesta.

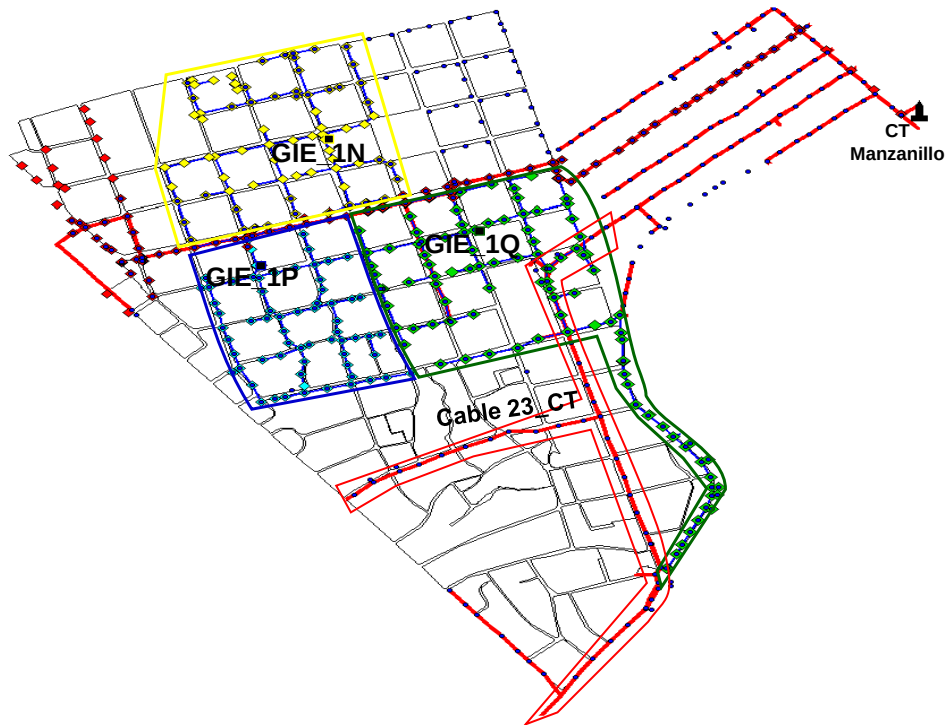
### 3.1. Dimensionamiento de la red

La planta externa de la red de acceso en el municipio Manzanillo de la provincia de Granma está soportada mayoritariamente en la red de cobre en la última milla y fibra óptica para extender el área básica de la oficina central a través de los Gabinetes Inteligentes de Exteriores (GIE), sitios de acceso y Unidades Remotas de Abonado (URA). Está en funcionamiento una sola central principal y un único gabinete flexible de cobre; cuatro sitios de acceso remoto en zonas rurales, tres de ellos enlazados por fibra y uno por radio; seis GIEs con tres URAs en zonas urbanas, estos últimos conectados por fibra óptica.

#### 3.1.1. Descripción de la región de estudio

En la figura 3.1 se presenta un área de análisis en el municipio Manzanillo de la provincia de Granma. En la región existen 3439 localizaciones potenciales de servicios, de ellas, 3268 residenciales y 171 no residenciales. Las 3 áreas de GIE, llamados 1N, 1P

y 1Q, ocupan las zonas con las localizaciones de los postes existentes representados con color amarillo, azul y verde, respectivamente, donde se ofrecen 1676 servicios de voz, 1554 para residenciales y 122 para los no residenciales; aunque existen 71 demandas insatisfechas que incluyen 19 no residenciales y 52 residenciales.



**Figura 3.1.** Región de estudio en el municipio Manzanillo

En la zona se distribuyen los pares de los cables denominados 1N, 1P y 1Q, los cuales corresponden al GIE del mismo nombre, así como el cable 23 del centro telefónico principal de Manzanillo. Los cables de los tres GIEs anteriores se distribuyen en conexión directa, se instalaron hace 10 años, desde el 2006. El cable 23 pertenece a una red de planta externa instalada en 1982, hace 34 años. Ninguno de los tres GIEs soporta el acceso a servicios de banda ancha. Aunque el equipamiento instalado en la CO sí permite el acceso a estos servicios, el estado técnico y la obsolescencia de los pares del cable 23 no permite las transmisiones de alta velocidad.

### 3.1.2. Requerimientos de velocidad

Como parte del desarrollo de la informatización de la sociedad en la provincia Granada y a partir del programa “Conectar 2020” de la UIT, se demanda de ETECSA el incremento de los servicios de telecomunicaciones. Para superar las limitaciones del

par de cobre es necesaria la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión que soporte el desarrollo de las redes de acceso a través de GPON. Teniendo en cuenta las características de dicha tecnología se obtiene la velocidad por usuario como se muestra en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Velocidad de transmisión por usuario para servicios de telecomunicaciones

| <b>Sentido de la transmisión</b> | <b>Velocidad por puerto</b> | <b>Velocidad por usuario</b> |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| descendente                      | 2.4 Gbps                    | 37.5 Mbps                    |
| ascendente                       | 1.2 Gbps                    | 18.75 Mbps                   |

Se considera que se pueden conectar 64 ONT/ONU por cada puerto GPON por lo que la velocidad de transmisión máxima en sentido de descarga es de 37.5 Mbps, la cual satisface los requerimientos de los servicios de voz, video y datos que se pueden ofrecer en el área.

## 3.2. Diseño de la red de acceso óptica

Para la modernización de la planta externa en la región de estudio se propone una arquitectura FTTH/FTTB con la tecnología GPON como solución de acceso para establecer una conexión de fibra por cliente. En el Centro Telefónico principal de Manzanillo se localiza, ya instalada, la OLT MA5600T. La combinación de una OLT que alimente a varias ONT ubicadas en el local del usuario final, mediante 2 niveles de división en la ODN, es una configuración típica que garantiza el acceso a la banda ancha en la región analizada.

El proceso de diseño se realizó con el apoyo de la herramienta FiberPlanIT Designer integrada al QGIS. Se consideraron las características de la tecnología GPON y la arquitectura FTTH. Se utilizó la capa de regiones de parcelas, perteneciente a la cartografía digital de base, sobre ella se localizaron los puntos de demanda. La capa con las líneas centrales de la red de calles del municipio Manzanillo fue extraída de openstreetmap<sup>13</sup>. De la cartografía de la planta externa, se trabajó con la capa de localización de la oficina central, gabinetes de distribución y postes levantados por los especialistas de ETECSA en Granma.

<sup>13</sup> <http://www.openstreetmap.org/>

En la red de alimentación se aplica la estrategia de distribución de cables compartidos para conectar el equipo en la CO con los puntos de distribución (PD), lo que permite reducir los costos por tendido de cables. En la red de distribución se aplica una estrategia de distribución estándar de forma similar a la anterior, para redes aéreas y soterradas. Los servicios de banda ancha se ofrecen a través de una conexión de fibra óptica desde el punto de acometida (PA) hasta el local del cliente. En todos los casos las rutas de cables son optimizadas por software en función del costo.

En la tabla 3.2 se presenta la cantidad de cables de fibra que deben desplegarse en cada tramo de la red de acceso. Se puede apreciar que la localización del divisor óptico pasivo influye en la longitud de los cables en la red de alimentación y de distribución. Por tanto, para disminuir los costos resulta conveniente implementar 2 niveles de división en cascada.

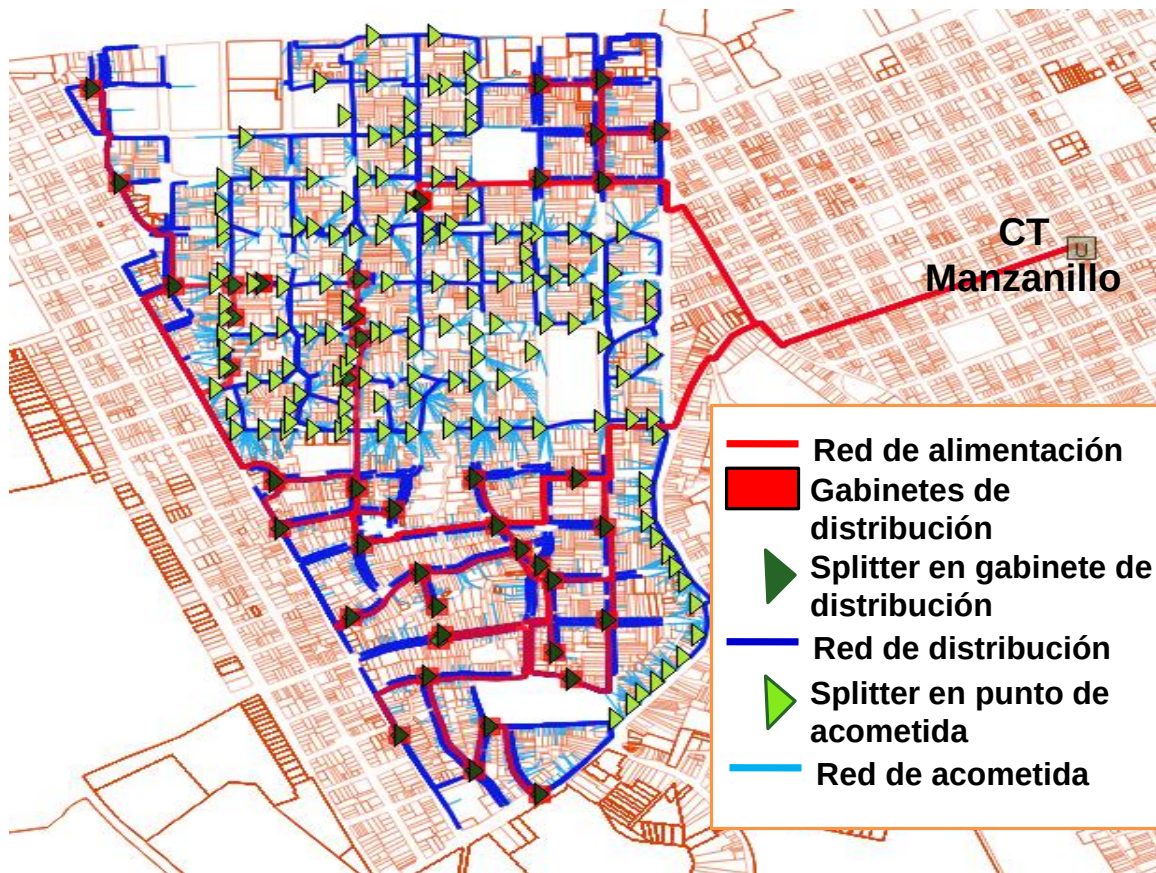
**Tabla 3.2.** Distribución de cables de fibra óptica

| Parámetros                      | Escenario 1                          | Escenario 2                          | Escenario 3                          |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| niveles de división             | 1                                    | 2                                    | 2                                    |
| localización del divisor óptico | en PD                                | 1er nivel en CO<br>2do nivel en PD   | 1er nivel en PD<br>2do nivel en PA   |
| cables de alimentación (m)      | 20718,9                              | 20935,3                              | 18058,5                              |
| cables de distribución (m)      | aéreo: 42934,2<br>soterrado: 87394,6 | aéreo: 43472,8<br>soterrado: 93426,5 | aéreo: 21563,2<br>soterrado: 93255,7 |
| cables de acometida (m)         | aéreo: 44406,4<br>soterrado: 8957,9  | aéreo: 44406,4<br>soterrado: 8957,9  | aéreo: 44406,4<br>soterrado: 8957,9  |

A partir del análisis anterior, en la figura 3.2 se muestra el diseño de la red de acceso óptica propuesto para la zona objeto de estudio basado en el escenario 3. La capacidad de los cables se determinó a partir del agrupamiento de los puntos de demanda. La localización de los divisores ópticos y gabinetes pasivos se realizaron mediante el apoyo de las herramientas QGIS y FiberPlanIT Designer.

La red de alimentación (rojo) conecta la OLT en el Centro Telefónico de Manzanillo con el primer nivel de división compuesto por los grupos de divisores de 1:8 (verde fuerte), localizados en los gabinetes de distribución. La traza de la fibra óptica correspondiente a la red de distribución (azul fuerte) llega hasta el segundo nivel con los grupos de divisores de 1:8 (verde claro), instalados en los puntos de acometida. A partir de este punto se despliega la red de acometida (azul claro) para la conexión final de la ONT

del cliente. En el anexo C se presenta la ubicación de la infraestructura de instalaciones y de la red de cables.



**Figura 3.2.** Diseño de la red de acceso óptica

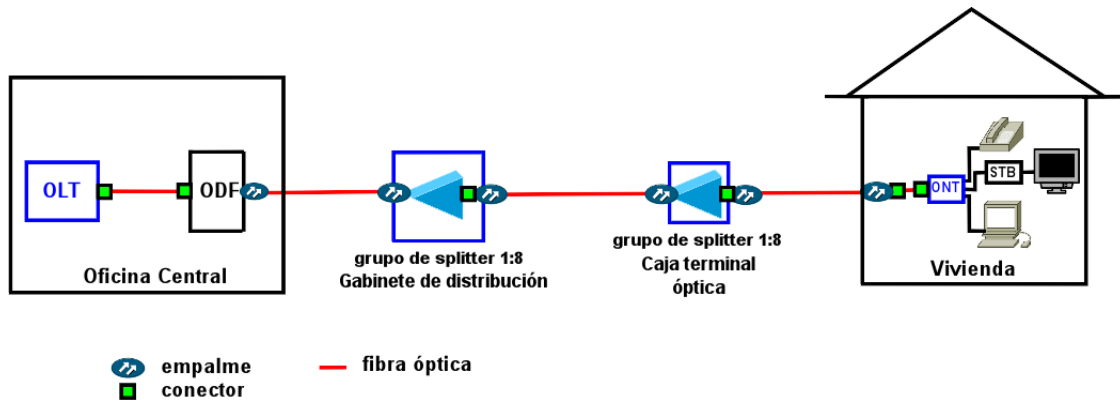
La red de acceso óptica fue diseñada para garantizar los servicios de banda ancha en la región a razón de 37,5 Mbps por punto de demanda. Se utilizan 54 puertos de la OLT que permiten una velocidad de 2,5 Gbps cada uno. Además, se consideró la implementación del esquema de protección tipo B para ofrecer la redundancia en la red de alimentación y de puertos GPON, 50 en total. Por lo cual, son necesarias 7 tarjetas de 16 puertos para alimentar la ODN que garantice la conectividad en todos los puntos de servicios potenciales.

La puesta en funcionamiento de la red GPON con una penetración del 100 % implica una velocidad de transmisión máxima de 126 Gbps, por lo que es necesario un equipamiento en la red de agregación que maneje el tráfico que se generaría. La solución de Huawei, el router NE40E, puede equiparse con tarjetas de línea con una capacidad máxima de 450 Gbps, lo cual garantizaría los requerimientos necesarios en esta parte de la red ante el crecimiento de la demanda de servicios de banda ancha.



### 3.3. Análisis de presupuesto de potencia óptica

Se realizó el cálculo para el enlace de fibra óptica de mayor longitud, pues constituye el caso más crítico con una distancia de 3 km entre la OLT y la ONT/ONU a través de la ruta de cables, como se muestra en la figura 3.3. Se consideraron los requerimientos para la localización de la oficina central, los divisores ópticos pasivos, el equipo terminal y la distribución del cable de fibra óptica. El primer nivel de división se localiza en el gabinete de distribución y el segundo en el punto de acometida donde se instala la caja terminal o de conexión óptica.



**Figura 3.3.** Componentes de la ODN

El SIG permitió la estimación de las distancias de los enlaces ópticos y las rutas potenciales del cable de fibra entre la OLT y cada ONT/ONU. Se debe cumplir con un umbral de pérdidas totales para GPON clase B+ de 28 dB. Se empleó la fibra óptica monomodo y los parámetros para el cable de fibra que cumple con las características de la ITU-T G.652D. Las pérdidas introducidas por los diferentes componentes de la ODN se muestran en la tabla 3.3. En el ejemplo, se utiliza para el cálculo 6 conectores y 8 empalmes (incluye 2 de reserva).

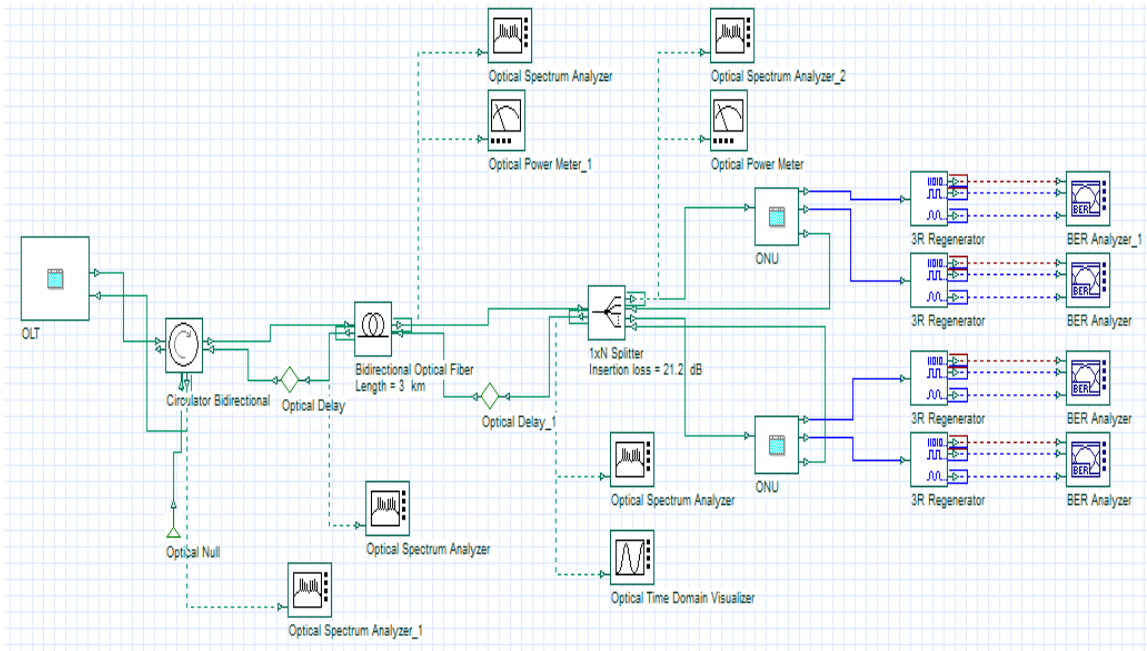
**Tabla 3.3.** Pérdidas introducidas en la red de acceso óptica

| Parámetros                                                                   | Valor                              |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| $\alpha_{FO}$ : coeficiente de atenuación de la fibra óptica G.652D          | 0,4 dB (1310 nm); 0,3 dB (1490 nm) |
| $\alpha_{env.FO}$ : coeficiente de atenuación por envejecimiento de la fibra | 0,05 dB/km                         |
| $L$ : longitud del enlace                                                    | 3 km                               |
| $\alpha_E$ : pérdidas en los empalmes                                        | 0,1 dB                             |
| $\alpha_C$ : pérdidas en los conectores                                      | 0,2 dB                             |
| $M_S$ : margen de seguridad                                                  | 3 dB                               |

Las pérdidas introducidas por la fibra óptica fue de 1,05 dB en descarga y 1,35 dB en subida, 0,8 dB por empalmes, 1,2 dB por los conectores y un margen de seguridad de 3 dB. Para el caso de 2 divisores ópticos en cascada de 2:8 y 1:8, con una atenuación de 10,8 dB y 10,4 dB, respectivamente, se obtuvo que la atenuación total en sentido descendente y ascendente para el caso más crítico, de mayor longitud de la ODN, fue de 27,25 dB y 27,55 dB, respectivamente, siendo menores que el margen de potencia del sistema y cumple con los requerimientos del enlace GPON.

### 3.4. Simulación de la red

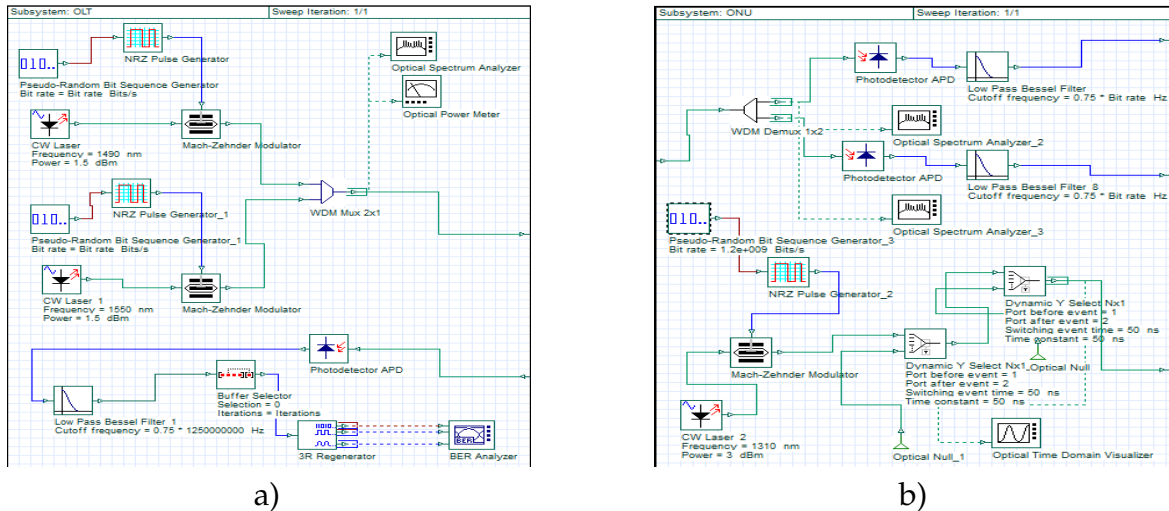
Se realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento de la red mediante la simulación. Se empleó el software OptiSystem v.7.0 y los parámetros teóricos del enlace óptico GPON. Se configuraron los valores de las atenuaciones de la fibra y divisores ópticos detallados anteriormente. Se utilizaron varios módulos con las características específicas de los componentes principales de la red de acceso óptica: OLT, fibra óptica, divisor óptico y ONU. En la figura 3.4 se representa el esquema de simulación. Se configuró la razón de bit de 2,5 Gbps, longitud de secuencia de 1024 bits y 32 muestras por bit.



**Figura 3.4.** Esquema de simulación

El bloque OLT, mostrado en la figura 3.5 (a), está compuesto por 2 transmisores, uno para la transmisión de voz/datos a 1490 nm y otro para el video RF a 1550 nm. Ellos son modelados con un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS, *Pseudo-Random Bit Sequence*), generador de pulsos NRZ, fuente laser CW y modulador *Mach-Zehnder*. Las señales de voz/datos y video se multiplexan a través del multiplexor WDM. Además, la OLT contiene el receptor de la señal a 1310 nm, representado por un fotodiodo de avalancha (APD, *Avalanche PhotoDetector*), filtro de Bessel pasabajo, selector de buffer, regenerador 3R y analizador de BER. Se estableció la potencia del laser de 1.5 dBm y 2 canales de multiplexación de la señal transmitida.

La ODN se representa con el circulator para diferenciar la señal del enlace de descarga y subida, la fibra óptica monomodo bidireccional y un divisor óptico pasivo. Se configuró las pérdidas en la fibra de 0,3 dB/km para la longitud de onda de 1490 nm y 0,4 dB/km para 1310 nm, longitud del enlace de 3 km, dispersión de 16.75 ps/nm/km. El *splitter* representa la atenuación introducida en el enlace por los 2 niveles de división de 21,2 dB.



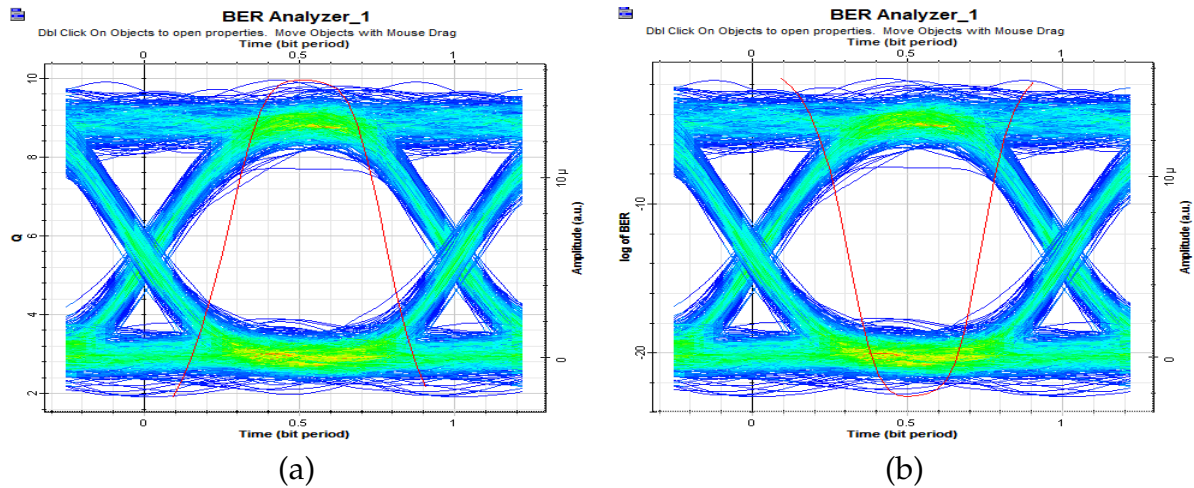
**Figura 3.5.** Componentes del sistema. a) bloque OLT, b) bloque ONU

La ONU del cliente, representada en la figura 3.5 (b), contiene un demultiplexor WDM, 2 fotodiodos APD, uno para cada longitud de onda en el sentido de descarga, filtro de Bessel pasabajo, respectivamente y un transmisor de la señal a 1310 nm. Además, a la salida de cada bloque ONU se utiliza un regenerador 3R y el analizador de BER empleado para obtener el diagrama de ojo. Se especificó la velocidad de transmisión de 1,2 Gbps, la potencia del laser de 3 dBm y los 2 canales para la demultiplexación de la señal recibida en el demultiplexor.

Se consideró la ruta de mayor distancia con 3 km, entre la terminal de línea óptica en la oficina central y el terminal de red óptica en el local del cliente. Además, se utilizaron medidores de potencia óptica, analizadores de espectro, analizadores de BER para visualizar la información a la salida de los diferentes elementos del sistema GPON.

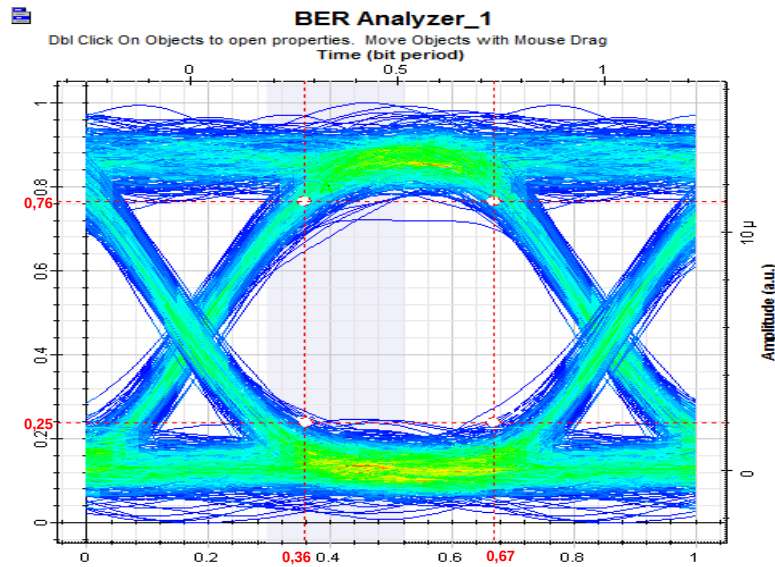
### 3.4.1. Resultados de la simulación

En la simulación se empleó el componente *BER Analyzer* para obtener el factor Q y la BER del sistema diseñado. La recomendación ITU-T G.984.2 refiere el empleo de la BER inferior a  $10^{-10}$ . Los valores de los parámetros factor Q máximo y BER mínima se representan en la figura 3.6 (a) y (b), respectivamente. El diagrama de ojo muestra la calidad del enlace óptico de 2,5 Gbps en el sentido de descarga, con el empleo de la longitud de onda de 1490 nm.



**Figura 3.6.** Diagrama de ojo. a) Factor Q máximo, b) BER mínima

Se obtuvo que para el enlace óptico de 3 km, el factor Q máximo es de 9,95255 y la BER mínima es de  $1,22 \cdot 10^{-23}$ , inferior al valor definido para GPON. La amplitud del patrón BER se muestran en la figura 3.7. Los resultados cumplen con los de la Recomendación G.984.2.



**Figura 3.7.** Amplitud del patrón BER

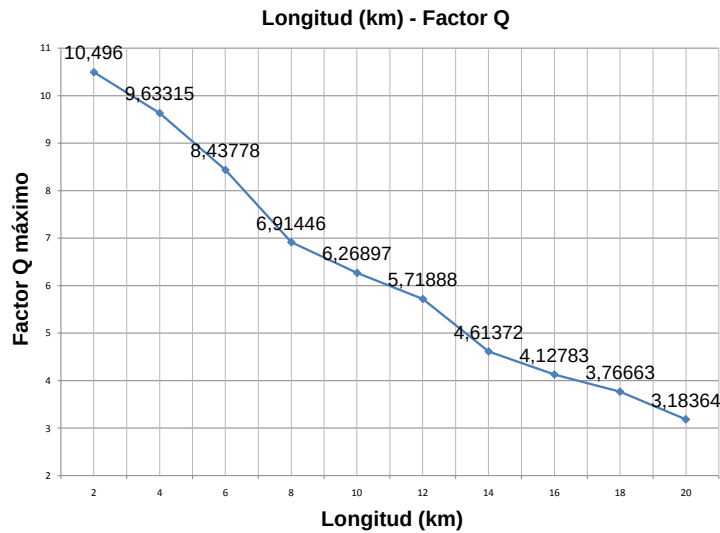
En la tabla 3.4 se observa la disminución del factor Q con el aumento de la distancia de la fibra y la BER se incrementa. Específicamente, para el enlace más distante objeto

de estudio en la presente investigación, el sistema presenta un correcto desempeño.

**Tabla 3.4.** Comportamiento del factor Q y la BER para diferentes longitudes de la fibra óptica

| Longitud de la fibra (km) | Factor Q | BER      |
|---------------------------|----------|----------|
| 2                         | 10,496   | 4,49E-26 |
| 4                         | 9,63315  | 2,87E-22 |
| 6                         | 8,43778  | 1,61E-17 |
| 8                         | 6,91446  | 2,34E-12 |
| 10                        | 6,26897  | 1,81E-10 |
| 12                        | 5,71888  | 5,35E-09 |
| 14                        | 4,61372  | 1,97E-06 |
| 16                        | 4,12783  | 1,82E-05 |
| 18                        | 3,76663  | 8,24E-05 |
| 20                        | 3,18364  | 7,24E-04 |

El comportamiento del factor Q con el aumento de la longitud del enlace obtenido a través de la simulación se presenta en la figura 3.8.



**Figura 3.8.** Comportamiento del factor Q para diferentes longitudes del enlace

En general, los resultados arrojaron que aunque la utilización de 2 divisores ópticos en cascada introduce una considerable pérdida de potencia óptica en el sistema, se cumple con los requerimientos de calidad y razón de error de bit permisible en el enlace GPON.

### 3.5. Valoración económica

En el cálculo de los costos se tuvo en cuenta los siguientes elementos: costo de la red de alimentación, red de distribución, red de dispersión, costo por hogar sin conectar (pasado) y conectado (activado), así como el de instalación, con los cuales se obtuvo la inversión inicial para la red de acceso óptica.

La infraestructura incluye el costo de los postes y soterrados necesarios para el tendido de la fibra óptica aérea y soterrada, respectivamente. De los abonados se tiene en cuenta el precio del equipo local del cliente (CPE, *Costumer Premise Equipment*), razón de adopción de la banda ancha e ingreso promedio por usuario (ARPU, *Average Revenue Per User*). En la ODN se consideró en el tramo de la red de dispersión, las cajas de conexión ópticas en poste y en soterrado de acometida, cables de fibra, empalmes y *splitter*; en la red de distribución, los gabinetes, cables de fibra, empalmes, *splitter* y en la red de alimentación, el costo de empalmes, registros, cables de fibra óptica, tuberías, soterrado, OLT, tarjetas PON y ODF. El costo total del proyecto se puede observar en la tabla 3.5 y el listado detallado en el anexo D. En el anexo E se incluye el costo de inversión por subscriptor, el cual disminuye en la medida en que aumenta la razón de adopción.

**Tabla 3.5.** Costo del proyecto

| 100 % de adopción | Costo por cliente sin conectar (USD) | Costo por cliente conectado (USD) | Costo total (USD) |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Infraestructura   | \$593221,46                          | \$0                               | \$593221,46       |
| Cliente           | \$0                                  | \$708434,00                       | \$708434,00       |
| Acometida         | \$107947,66                          | \$359802,44                       | \$467750,10       |
| Distribución      | \$462556,37                          | \$4108,20                         | \$466664,57       |
| Alimentación      | \$207242,33                          | \$7000,00                         | \$214242,33       |
| Costo total       | \$1370967,83                         | \$1079344,64                      | \$2450312,47      |

Asimismo, se obtuvieron los beneficios que traería la inversión en este proyecto. En el anexo E también se presentan los ingresos para diferentes razones de adopción que representa la cantidad de clientes activados o conectados y el crecimiento proyectado por año durante el tiempo de duración del proyecto. Se calcularon los indicadores financieros para un horizonte de la inversión de 10 años y tasa de descuento del 15 %. El VAN para el período evaluado fue de 1576592,11 pesos y la TIR de 25,33 %. Como el VAN es mayor que cero y la TIR es mayor que la tasa de descuento, entonces el

proyecto es rentable. El período de recuperación de la inversión será de 4 años y 1 mes, por lo cual la inversión es aceptable.

### 3.6. Conclusiones del capítulo

El diseño de la topología de la red de acceso óptica garantiza los requerimientos de velocidad de transmisión para satisfacer los servicios de banda ancha en el área de estudio. El análisis basado en el empleo de la información geográfica, mediante el FiberPlanIT Designer y QGIS, permitió la localización de los elementos de la OSP soportada sobre fibra óptica.

La razón de división y localización de los divisores ópticos pasivos determinan la distribución de la red de cables en la ODN. Se propone el empleo de 2 niveles de división con *splitter* 1:8, localizados en puntos de distribución y de acometida. La ubicación del divisor óptico no repercute significativamente en el cálculo de la atenuación a diferencia de su razón de división.

Se analizó la factibilidad técnica de la red de acceso óptica diseñada. Las pérdidas calculadas para el enlace de mayor longitud son menores de 28 dB, por tanto se satisfacen los requerimientos de potencia necesarios para el adecuado funcionamiento del enlace óptico con transceiver clase B+. El factor Q obtenido es alto de 9,95255 y la BER es baja de  $1,22 \cdot 10^{-23}$  con la cual se cumple con el valor recomendado por norma de  $10^{-10}$  para el sistema GPON.

El análisis económico muestra el alto costo de inversión inicial de la red de acceso óptica. Se calcularon indicadores financieros que contribuyeron a la evaluación de la red diseñada. Se obtuvo que el proyecto es rentable.



## CONCLUSIONES

---

Con el propósito de solucionar la problemática planteada en la presente tesis, se han cumplido los objetivos trazados al comienzo de la investigación, concluyéndose lo siguiente:

- Las tecnologías xDSL poseen la limitante de la disminución de la velocidad de transmisión con el aumento de la distancia del enlace entre la central telefónica y el equipo del cliente. Debido a lo anterior se han desplegado las AON para sustituir el par de cobre por fibra óptica y como alternativa primaria a este tipo de redes han surgido las tecnologías PON. De ellas, la red GPON es la opción elegida para satisfacer los requerimientos de los servicios de banda ancha sobre fibra óptica hasta el local del cliente.
- Se seleccionó el sistema de información geográfica QGIS para el manejo de la cartografía digital. Se empleó un modelo de datos vectorial para modelar los componentes de la OSP de la red de telecomunicaciones en un sitio *brownfield*.
- El diseño de la red de acceso óptica FTTH-GPON permite la modernización de la planta externa de ETECSA en el municipio Manzanillo, al utilizar la fibra óptica como medio de transmisión en la red de alimentación, distribución y acometida e insertar nuevos equipos que permitan mayores velocidades de transmisión en la última milla. Se emplearon 2 niveles de división con splitter 1:8 localizados en gabinetes de distribución y cajas terminales.
- Se eligió el equipamiento de telecomunicaciones del fabricante Huawei, líder en soluciones FTTx-GPON, pues ya existe en funcionamiento en el municipio la OLT MA5600T para la implementación de la red. Se propuso para el cliente la ONT HG8247H.
- Con el apoyo de la herramienta FiberPlanIT Designer integrado al QGIS se contribuyó al proceso de diseño de red, optimizado por software en función del

costo de la red de acceso óptica para la región de estudio.

- El diseño cumple con los requerimientos de presupuesto de potencia del enlace GPON con valores de pérdidas de 27,25 dB en el sentido de descarga. Mediante la simulación se obtuvo una BER baja de  $1,22 \cdot 10^{-23}$  y un factor Q alto de 9,95255, por lo que se satisfacen los requerimientos de calidad para el sistema diseñado.
- El costo de la red es \$2450312,47 USD. Se obtuvo que el VAN fue de 1576592,11 USD y la TIR de 25,33 %, lo cual indica que el proyecto es rentable. La reutilización de los postes y la central telefónica permitieron la reducción del costo de la red.

## RECOMENDACIONES

---

Luego de analizar los resultados alcanzados en la investigación, se recomienda:

- Implementar pruebas pilotos con el equipamiento real que contribuyan a la validación técnica de la red propuesta.
- Evaluar el empleo de nuevas tecnologías PON como solución para la migración de la red de cobre a fibra óptica y la modernización de las redes de fibra existentes, con el apoyo de la cartografía digital de la planta externa de ETECSA.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] M. D. Diouf, A. D. Kora, y O. Ringar, "Evolution to 200G Passive Optical Network," *Computer Technology and Application*, vol. 3, págs. 723–728, 2012. Disponible en <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1304/1304.0722.pdf>
- [2] ITU, "The State of Broadband 2014: broadband for all," Reporte técnico, 2014. Disponible en <http://www.broadbandcommission.org/documents/reports/bb-annualreport2014.pdf>
- [3] R. Zhao, W. Fischer, E. Aker, y P. Rigby, "White Paper: Broadband Access Technologies," Reporte técnico, 2013. Disponible en [http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/DandO\\_White\\_Paper\\_2\\_2013\\_Final.pdf](http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/DandO_White_Paper_2_2013_Final.pdf)
- [4] A. Vergara-Pardillo, "Aplicación del análisis tecno-económico al despliegue de redes de acceso de próxima generación. El caso de la competencia entre plataformas, la regulación y las políticas públicas en España," Tesis de doctorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación Universidad Politécnica de Madrid, 2011. Disponible en <http://oa.upm.es/9837/>
- [5] F. C. Europe, "FTTH Handbook," Reporte técnico, 2012. Disponible en [http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook\\_2014-V6.0.pdf](http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf)
- [6] E. S. Sharma, "A Review of Passive Optical Networks," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, vol. 2, págs. 181–185, 2013. Disponible en <http://ijaiem.org/Volume2Issue5/IJAIEEM-2013-05-31-111.pdf>
- [7] T. Koonen, "Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When?" *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, págs. 911–934, 2006. Disponible en [http://www.ele.uva.es/~lbailon/Docencia/MUI-TIC/80.DRCO/Bibliografia/koonen06\\_acceso.pdf](http://www.ele.uva.es/~lbailon/Docencia/MUI-TIC/80.DRCO/Bibliografia/koonen06_acceso.pdf)

- [8] M. Mahloo, "Transport Solutions for Future Broadband Access Networks," Tesis de doctorado, KTH Royal Institute of Technology, 2015. Disponible en <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:796654/FULLTEXT01.pdf>
- [9] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*, 2014. Disponible en [http://volaya.github.io/libro-sig/https://github.com/volaya/libro-sig/releases/download/v2.0/Libro\\_SIG.pdf](http://volaya.github.io/libro-sig/https://github.com/volaya/libro-sig/releases/download/v2.0/Libro_SIG.pdf)
- [10] A. Mitcsenkov, G. Paksy, y T. Cinkler, "Geography- and infrastructure-aware topology design methodology for broadband access networks (FTTx)," *Photon Netw Commun*, vol. 21, págs. 253–266, 2010. Disponible en <http://link.springer.com/article/10.1007/s11107-010-0297-4>
- [11] A. Mitcsenkov, P. Katzenberger, P. Bakos, y G. Paksy, "Automatic map-based FTTx access network design," en *22nd European Regional Conference of the International Telecommunications Society*, 2011. Disponible en <http://www.econstor.eu/bitstream/10419/52178/1/672544644.pdf>
- [12] Z. M. Matrood, L. E. George, y F. H. Mahmood, "A Simple GIS Based Method for Designing Fiber-Network," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 4, 2014. Disponible en [http://www.ijeit.com/Vol4/Issue2/IJEIT1412201408\\_09.pdf](http://www.ijeit.com/Vol4/Issue2/IJEIT1412201408_09.pdf)
- [13] M. Jensen, J. M. Lopez Guterrez, M. H. Andreassen, y J. M. Pedersen, "Overall Plan for Copper-Fiber Infrastructure Switch-over," *Journal of Infrastructure Systems*, págs. 1–15, 2015. Disponible en [http://vbn.aau.dk/files/206316905/Published\\_version.pdf](http://vbn.aau.dk/files/206316905/Published_version.pdf)
- [14] J. M. Pedersen, G. H. Haraldsson, y M. T. Riaz, "Using Google Earth for Visualization in FTTH Network Planning," en *Image Procesing & Communication Challenges 2*, vol. 84. Springer Berlin Heidelberg, 2010, págs. 379–389. Disponible en [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16295-4\\_44](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16295-4_44)
- [15] M. Kantor, K. Wajda, B. Lannoo, K. Casier, S. Verbrugge, M. Pickavet, L. Wosinska, J. Chen, y A. Mitcsenkov, "General framework for techno-economic analysis of next generation access networks," en *12th International Conference on Transparent Optical Networks*. Munich: IEEE, 2010, págs. 1–4.
- [16] A. Mitcsenkov, M. Kantor, K. Casier, B. Lannoo, K. Wajda, J. Chen, y L. Wosinska, "Geographic model for cost estimation of FTTH deployment: overcoming inaccuracy in uneven-populated areas," en *Proceedings of the*

- Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP) Shanghai*, 2010, págs. 397–398. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Attila\\_Mitscenkov/publication/221706738\\_Computer-aided\\_automatic\\_design\\_of\\_FTTx\\_access\\_networks/links/02e7e5347f11352f26000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Attila_Mitscenkov/publication/221706738_Computer-aided_automatic_design_of_FTTx_access_networks/links/02e7e5347f11352f26000000.pdf)
- [17] UIT, “Conectar 2020: Definir un programa de trabajo mundial para el sector de las TIC,” págs. 1–2, 2014. Disponible en <http://www.itu.int/en/plenipotentiary/2014/newsroom/Documents/backgrounders/pp14-backgrounder-connect-2020-es.pdf>
- [18] O. Szymanczyk, “Capítulo 1. Topologías de las Redes,” págs. 1–56, 2014. Disponible en [http://www.oscarszymanczyk.com.ar/disenio\\_planta\\_externa.html](http://www.oscarszymanczyk.com.ar/disenio_planta_externa.html)
- [19] A. R. Figueiras, *Una panorámica de las telecomunicaciones*, 2002.
- [20] ETECSA, “Norma Obligatoria de Empresa: Red de Distribución de Cables de Cobre de la Planta Exterior,” ETECSA, Ciudad de La Habana, Reporte técnico 1, 2002.
- [21] O. Szymanczyk, “Capítulo 2. Planificación de las Redes,” págs. 1–69, 2014. Disponible en [http://www.oscarszymanczyk.com.ar/disenio\\_planta\\_externa.html](http://www.oscarszymanczyk.com.ar/disenio_planta_externa.html)
- [22] A. Telesis, “DSL White Paper,” págs. 1–22, 2007. Disponible en [http://www.alliedtelesis.com/media/pdf/dsl\\_wp.pdf](http://www.alliedtelesis.com/media/pdf/dsl_wp.pdf)
- [23] ITU-T, “Recommendation ITU-T G.992.5 Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) - Extended bandwidth (ADSL2plus),” Reporte técnico, 2009. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.992.5-200901-I/es>
- [24] —, “Recommendation ITU-T G.993.2 Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2),” Reporte técnico, 2006. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-200602-S/es>
- [25] —, “Recommendation ITU-T G.993.5 Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers,” Reporte técnico, 2015. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.5/en>
- [26] P. Lafata, “Examination of Multiplexing VDSL2 over ADSL2+ Line,” *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, págs. 123–127, 2013. Disponible en <http://www.socsc.ktu.lt/index.php/elt/article/viewFile/3116/2941>

- [27] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.9701 Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification," Reporte técnico, 2014. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9701-201412-I/es>
- [28] F. C. Europe, "FTTH Handbook," Fibre to the Home Council Europe, Reporte técnico, 2012. Disponible en [www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook\\_2014-V6.0.pdf](http://www.ftthcouncil.eu/documents/Publications/FTTH-Handbook_2014-V6.0.pdf)
- [29] A. Telesyn, "Active vs. PON. FTTx Technology Choices," Reporte técnico, 2004.
- [30] N. Ansari y J. Zhang, "PON Architectures," en *Media Access Control and Resource Allocation*, 2013, págs. 11–22. Disponible en [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-3939-4\\_2](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-3939-4_2)
- [31] D. Law, "IEEE 802.3 Industry Connections Feasibility Assessment for the Next Generation of EPON," Reporte técnico March, 2015. Disponible en [http://www.ieee802.org/3/ad\\_hoc/ng PON/ng\\_epon\\_report.pdf](http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ng PON/ng_epon_report.pdf)
- [32] D. Rosabal Montero, "Tecnologías de acceso sobre redes ópticas pasivas," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 4, págs. 1–12, 2011. Disponible en [publicaciones.uci.cu/index.php/SC/article/view/376/381](http://publicaciones.uci.cu/index.php/SC/article/view/376/381)
- [33] E. Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, págs. 597–608, 2012. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Elaine\\_Wong2/publication/230743763\\_Next-Generation\\_Broadband\\_Access\\_Networks\\_and\\_Technologies/links/00b4952e4a6104d537000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Elaine_Wong2/publication/230743763_Next-Generation_Broadband_Access_Networks_and_Technologies/links/00b4952e4a6104d537000000.pdf)
- [34] R. Malhotra y A. K. Garg, "Capacity and delay analysis in Passive Optical Networks (PONs) - A review," *International Journal of Advances in Computing and Information*, págs. 182–187, 2012. Disponible en [www.ijacit.com/articles/twelve/vol1issue2/vol1issue2/EIJACIT120023.pdf](http://www.ijacit.com/articles/twelve/vol1issue2/vol1issue2/EIJACIT120023.pdf)
- [35] M. L. BONILLA, E. MOSCHIM, y F. R. BARBOSA, "ESTUDIO COMPARATIVO DE REDES GPON y EPON," *Scientia et Technica*, págs. 321–326, 2009. Disponible en <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2971>
- [36] J.-i. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, y S. Rodrigues, "Next-Generation PON - Part I: Technology Roadmap and General Requirements," *IEEE Communications Magazine*, págs. 43–49, 2009. Disponible en [http://www.ece.jhu.edu/~cooper/Oct2012/References/1.Intro/NG\\_PON\\_Part\\_I.pdf](http://www.ece.jhu.edu/~cooper/Oct2012/References/1.Intro/NG_PON_Part_I.pdf)

- [37] ITU-T, “Recommendation ITU-T G.987 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms,” 2012.
- [38] —, “Recommendation ITU-T G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics,” Reporte técnico, 2008. Disponible en <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>
- [39] —, “Recommendation ITU-T G.984.2 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification,” 2003. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2-200303-I/en>
- [40] —, “Recommendation ITU-T G.984.5 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band,” 2014. Disponible en <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>
- [41] —, “Recommendation ITU-T G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements,” 2010.
- [42] Y. Zhang, “Implementation of Future Generation Agile Gigabits Passive Optical Network,” *Photonics and Optoelectronics (P&O)*, vol. 2, págs. 105–109, 2013.
- [43] ITU-T, “Recommendation ITU-T G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements,” 2013.
- [44] —, “Recommendation ITU-T G.989.2 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification,” Reporte técnico, 2014. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201412-I/es>
- [45] M. Zotkiewicz, M. Mycek, y A. Tomaszewski, “Profitable areas in large-scale FTTH network optimization,” *Springer*, 2015. Disponible en <https://repo.pw.edu.pl/info.seam?id=WUT6fea911d9b7c4f8cad9d0e516fc72efa>
- [46] J. Hätönen, “The economic impact of fixed and mobile high-speed networks,” *EIB Papers*, vol. 16, págs. 30–59, 2011. Disponible en <http://www.econstor.eu/bitstream/10419/54666/1/68275367X.pdf>
- [47] H. Reynolds, “An Introduction To Geographical Information Systems (GIS),” 1997. Disponible en [http://badpets.net/IntroGIS/GIS\\_Intro.pdf](http://badpets.net/IntroGIS/GIS_Intro.pdf)
- [48] O. B. Madsen y T. M. Riaz, “Planning broadband network infrastructure - a reference model,” 2008. Disponible en [http://vbn.aau.dk/files/16623182/planning\\_broadband\\_infrastructure\\_-\\_a\\_reference\\_model.pdf](http://vbn.aau.dk/files/16623182/planning_broadband_infrastructure_-_a_reference_model.pdf)



- [49] T. M. Riaz y O. B. Madsen, "A Method for Automated Planning of FTTH Access Network Infrastructures," en *Proceedings of IT&T2005*, 2005. Disponible en [vbn.aau.dk/ws/files/4714118/4854\\_a\\_method\\_for\\_automated\\_tahir.doc](http://vbn.aau.dk/ws/files/4714118/4854_a_method_for_automated_tahir.doc)
- [50] M. Jensen y J. M. G. Lopez, "Upper Bound Performance Estimation for Copper Based Broadband Access," en *20th Telecommunications Forum (TELFOR)*. IEEE, 2012, págs. 280–283.
- [51] U. Farooq, S. Bashir, T. Tasneem, A. Saboor, y A. Rauf, "Migration from Copper to Fiber Access Network using Passive Optical Network for Green and Dry Field Areas of Pakistan," *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol. 5, págs. 118–128, 2015.
- [52] T. G. Robertazzi, *Planning Telecommunication Networks*. Wiley-IEEE Press, 1999.
- [53] C. Carballo-González, L. E. Conde del Oso, y C. Anías-Calderón, "Propuesta de soluciones de acceso para la introducción por ETECSA de los servicios de banda ancha en Cuba," en *Informática 2016*, 2016, págs. 1–10.
- [54] H. Alshaer y M. Alyafei, "Planning Rules for Split Ratio Selection in Building GPON-based Access Networks," en *Third International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2011)*. Bangalore: IEEE, 2011, págs. 1–10.
- [55] B. G. Mölleryd, "Development of High-speed Networks and the Role of Municipal Networks," *OECD Science Technology and Industry Policy Papers*, 2015. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1787/5jrql7rvns3-en>
- [56] ITU-T, "Recommendation ITU-T G.652 Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," págs. 1–22, 2009. Disponible en <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-I/en>
- [57] —, "Recommendation ITU-T G.657 Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable for the access network," Reporte técnico, 2012. Disponible en <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-201210-I/en>
- [58] Comsof, "FiberPlanIT Designer," 2015. Disponible en <http://www.fiberplanit.com/>

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

---

ADSL: *Asymmetric Digital Subscriber Line*. Línea de abonado digital asimétrica

AON: *Active Optical Network*. Red óptica activa

APD: *Avalanche PhotoDetector*. Fotodiodo de avalancha

AWG: *Arrayed Waveguide Grating*. Divisor de longitud de onda

BER: *Bit Error Rate*. Razón de error de bit

BoM: *Bill of Material*. Listado de costo de material

CAPEX: *Capital Expenditure*. Gastos de capital

CE: *Coexistence Element*. Elemento de coexistencia

CG: *Channel Group*. Grupo de canales

CO: *Central Office*. Oficina Central

CP: *Channel Pair*. Par de canales de longitudes de onda, de descarga y de subida

CPE: *Costumer Premise Equipment*. Equipo local del cliente

CRS: *Coordinate Reference System*. Sistema de referencia de coordenadas

CT: *Channel Termination*. Terminación de canal

DN: *Distribution Network*. Red de distribución

dN: *drop Network*. Red de acometida o de dispersión

DSL: *Digital Subscriber Line*. Línea abonado digital

DSLAM: *Digital Subscriber Line Access Multiplexer*. Multiplexor localizado en la central telefónica que proporciona a los abonados acceso a los servicios xDSL

EPON: *Ethernet Passive Optical Network*. Red óptica pasiva Ethernet

FN: *Feeder Network*. Red de alimentación

FTTB: *Fiber to the Building*. Fibra hasta el edificio

FTTC: *Fiber to the Curb or Fiber to the Cabinet*. Fibra hasta la acera o fibra hasta el gabinete

FTTH: *Fiber to the Home*. Fibra hasta el hogar

GIS: *Geographic Information System*. Sistema de información geográfica

10G-EPON: *10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network*. Red óptica pasiva Ethernet de 10 gigabit

GPON: *Gigabit-capable Passive Optical Network*. Red Óptica Pasiva con capacidad de gigabit

HDTV: *High Definition Television*. Televisión de alta definición

HFC: *Híbrid Fiber-Coaxial*. Red híbrida de fibra-coaxial

HSI: *High Speed Internet*. Internet de alta velocidad

IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineers*. Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos

ITU: *Internacional Telecommunication Unit*. Unión Internacional de Telecomunicaciones

ITU-T: *ITU Telecommunication Standardization Sector*. Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT

MDF: *Main Distribution Frame*. Panel de distribución principal

MDU: *Multi-Dwelling Unit*. Unidad de múltiples usuarios

MSAN: *Multiservice Access Node*. Nodo de acceso multiservicio

NGOA: *Next Generation Optical Access*. Acceso óptico de próxima generación

NG-PON1: *Next Generation Passive Optical Network phase 1*. Red óptica pasiva de próxima generación fase 1

NG-PON2: *40-Gigabit-capable Passive Optical Network*. Red óptica pasiva con capacidad de 40 gigabit

NT: *Network Terminal*. Terminal de red

OAN: *Optical Access Network*. Red de acceso óptica

ODF: *Optical Distribution Frame*. Panel de distribución óptica

ODN: *Optical Network Distribution*. Red de distribución óptica

ODS: *Optical Distribution Segment*. Segmento de distribución óptico

OLT: *Optical Line Terminal*. Terminal de línea óptica

ONU: *Optical Network Unit*. Unidad de red óptica

ONT: *Optical Network Terminal*. Terminal de red óptica

OPEX: *Operational Expenditure*. Gastos de operaciones

OSP: *OutSide Plant*. Planta externa

P2P: *Point to Point*. Punto a punto

P2MP: *Point to Multi Point*. Punto a multipunto

PON: *Passive Optical Network*. Red óptica pasiva

POS: *Passive Optical Splitter*. Divisor óptico pasivo

PRBS: *Pseudo-Random Bit Sequence*. Generador de secuencia binaria pseudoaleatoria

PtP WDM: *Point-to-Point Wavelength Division Multiplexing*. Multiplexación de división de longitud de onda punto a punto

QoS: *Quality of Service*. Calidad de Servicio

RE: *Reach Extender*. Dispositivo para la extensión del alcance de la red óptica

RN: *Remote Node*. Nodo remoto

ROI: *Return of Inversion*. Retorno de la inversión

TDMA: *Time Division Multiple Access*. Acceso múltiple por división en el tiempo

TWDM: *Time and Wavelength Division Multiplexing*. Multiplexación de división de longitud de onda y de tiempo

VDSL: *Very high bit rate Digital Subscriber Line*. Línea de abonado digital de muy alta tasa de transferencia

VoIP: *Voice over IP*. Voz sobre IP

WBF: *Wavelength Blocking Filter*. Filtro de bloqueo de longitud de onda

WDM: *Wavelength Division Multiplexing*. Multiplexación por división de longitud de onda

WDM1r: *Wavelength Division Multiplexor 1 revised (coexistence device)*. Filtro WDM que

puede localizarse en la central telefónica para combinar o separar las longitudes de onda de las señales GPON y los sistemas NGA

WM: *Wavelength Multiplexor*. Multiplexor de longitud de onda

XG-GPON: *10 Gigabit-Gigabit capable passive optical network*. Red óptica pasiva con capacidad de 10 gigabit

# ANEXO A

## Tecnologías de banda ancha soportadas sobre par de cobre

---

**Tabla A.1.** Tecnologías soportadas sobre par de cobre

| Elementos             | ADSL2+               | VDSL2                   | G.fast                                      |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| Estándares            | ITU-T G.992.5        | ITU-T G.993.2           | ITU-T G.7201                                |
| Ancho de banda        | 2.2 Mhz              | 30 Mhz                  | 150 MHz                                     |
| Velocidad de descarga | 24 Mbps              | 100 Mbps                | 1 Gbps                                      |
| Velocidad de subida   | 1,2 Mbps             | 100 Mbps                | 200 Mbps                                    |
| Alcance               | 5,5 km               | 1,5 km                  | 500 m                                       |
| Servicios soportados  | POTS, ISDN, Internet | POTS, ISDN, triple play | POTS, ISDN, triple play, telemedicina, HDTV |

# ANEXO B

## Tecnologías de acceso ópticas

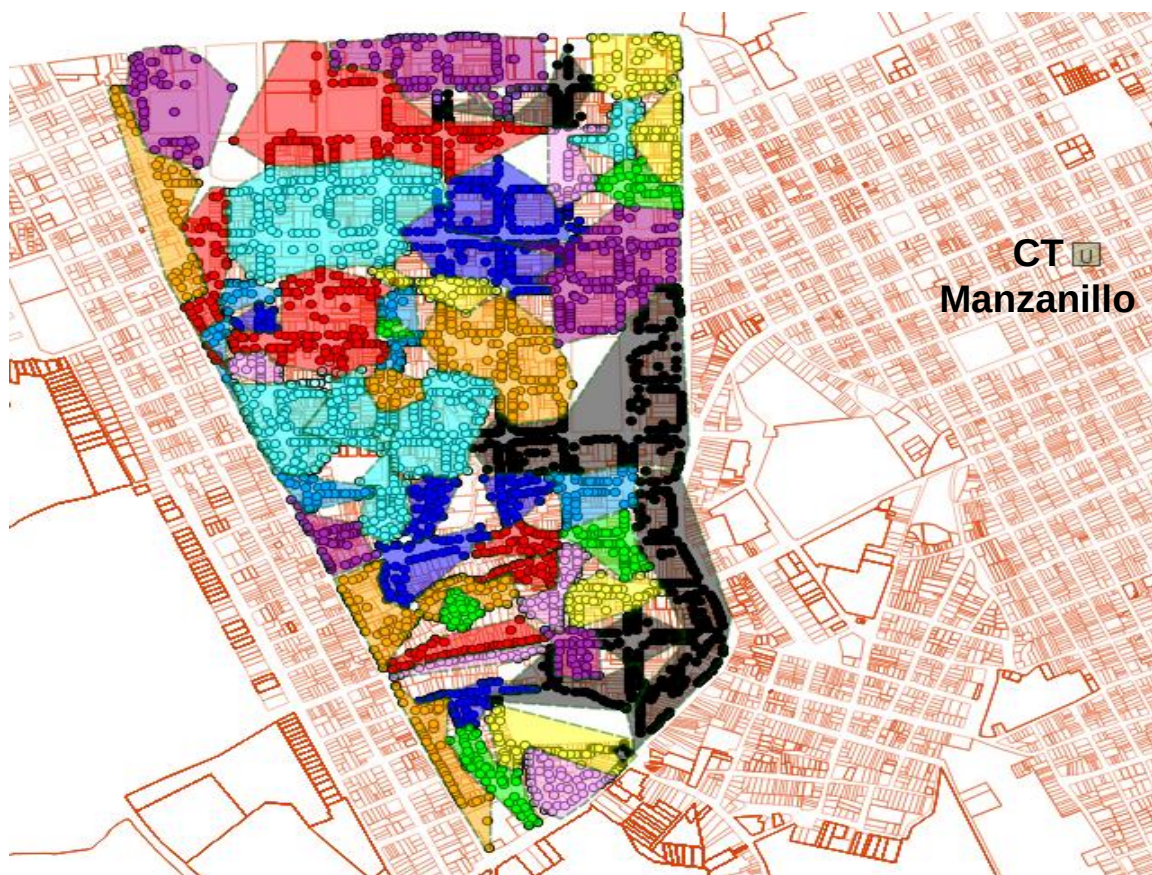
**Tabla B.1.** Características de las tecnologías de acceso ópticas

| Parámetros                             | GPON                                                                                                                              | XG-PON                                                                             | TWDM PON                                                                                                                                                          | PtP WDM PON                                                                                                                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estándares                             | ITU-T G.984.x                                                                                                                     | ITU-T G.987.x                                                                      | ITU-T G.989.x                                                                                                                                                     | ITU-T G.989.x                                                                                                                       |
| Banda de longitud de onda de operación | descendente:<br>1480-1500 nm<br>sobre una sola fibra y<br>1260-1360 nm<br>cuando emplea dos fibras<br>ascendente:<br>1260-1360 nm | descendente:<br>1575-1580 nm<br>ascendente:<br>1260-1280 nm                        | descendente:<br>1596-1603 nm<br>ascendente: banda<br>ancha: 1524-1544 nm<br>banda reducida:<br>1528-1540 nm<br>banda estrecha:<br>1532-1540 nm                    | descendente/<br>ascendente:<br>espectro compartido<br>1603-1625 nm<br>espectro ensanchado<br>1524-1625 nm                           |
| Velocidad de transmisión               | descendente/<br>ascendente:<br>2.4/1.2 Gbps<br>2.4/2.4 Gbps                                                                       | descendente/<br>ascendente:<br>XG-PON1 -<br>10/2.5 Gbps<br>XG-PON2 -<br>10/10 Gbps | descendente/<br>ascendente:<br>9.95328/2.48832 Gbps<br>descendente/<br>ascendente:<br>9.95328/9.95328 Gbps<br>descendente/<br>ascendente:<br>2.48832/2.48832 Gbps | descendente/<br>ascendente:<br>clase 1:<br>1.2288 a 1.25 Gbps<br>clase 2:<br>2.4576 a 2.666 Gbps<br>clase 3:<br>9.8304 a 11.09 Gbps |
| Distancia típica del enlace óptico     | 20 km                                                                                                                             | 40 km                                                                              | 40 km y puede alcanzar 60 km con RE                                                                                                                               |                                                                                                                                     |
| Razón de división (usuarios por ODN)   | 1:64                                                                                                                              | 1:64                                                                               | 1:256                                                                                                                                                             |                                                                                                                                     |

# ANEXO C

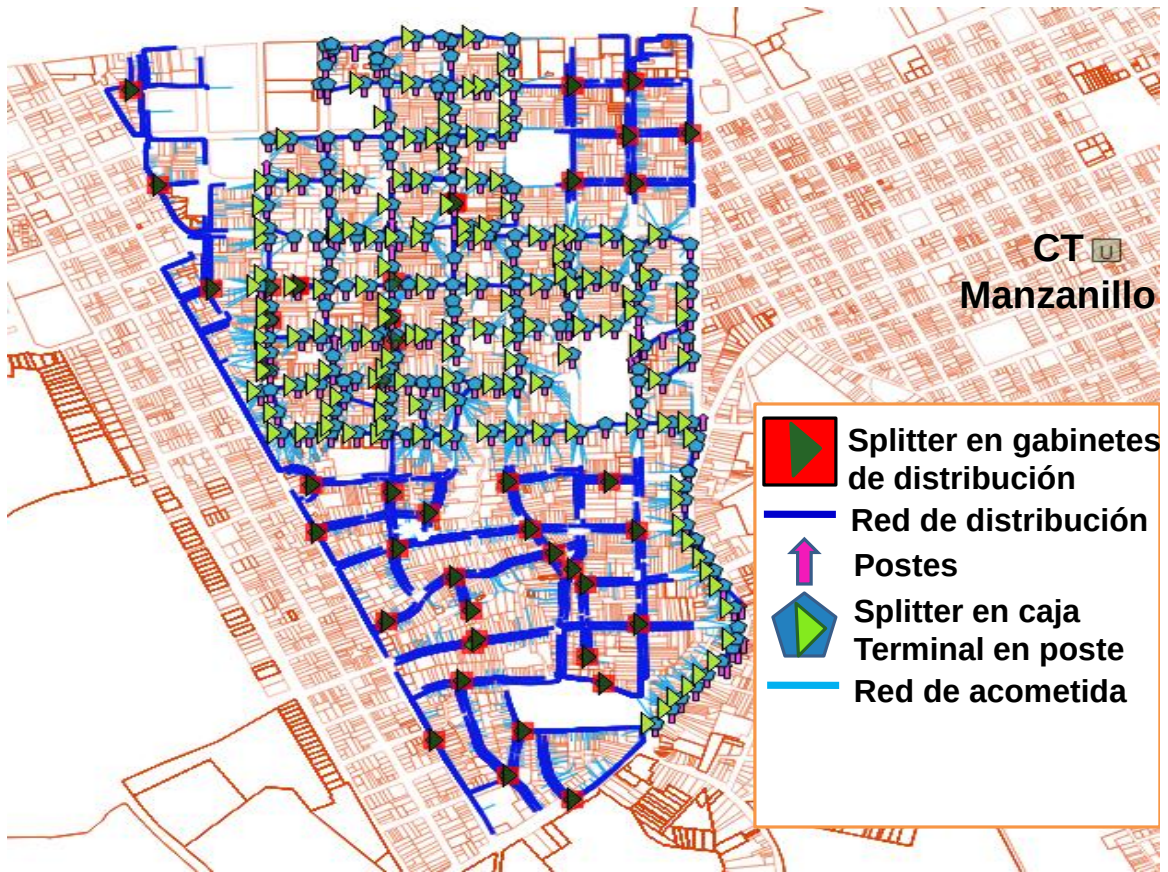
## Diseño de red de acceso óptica con GIS

---

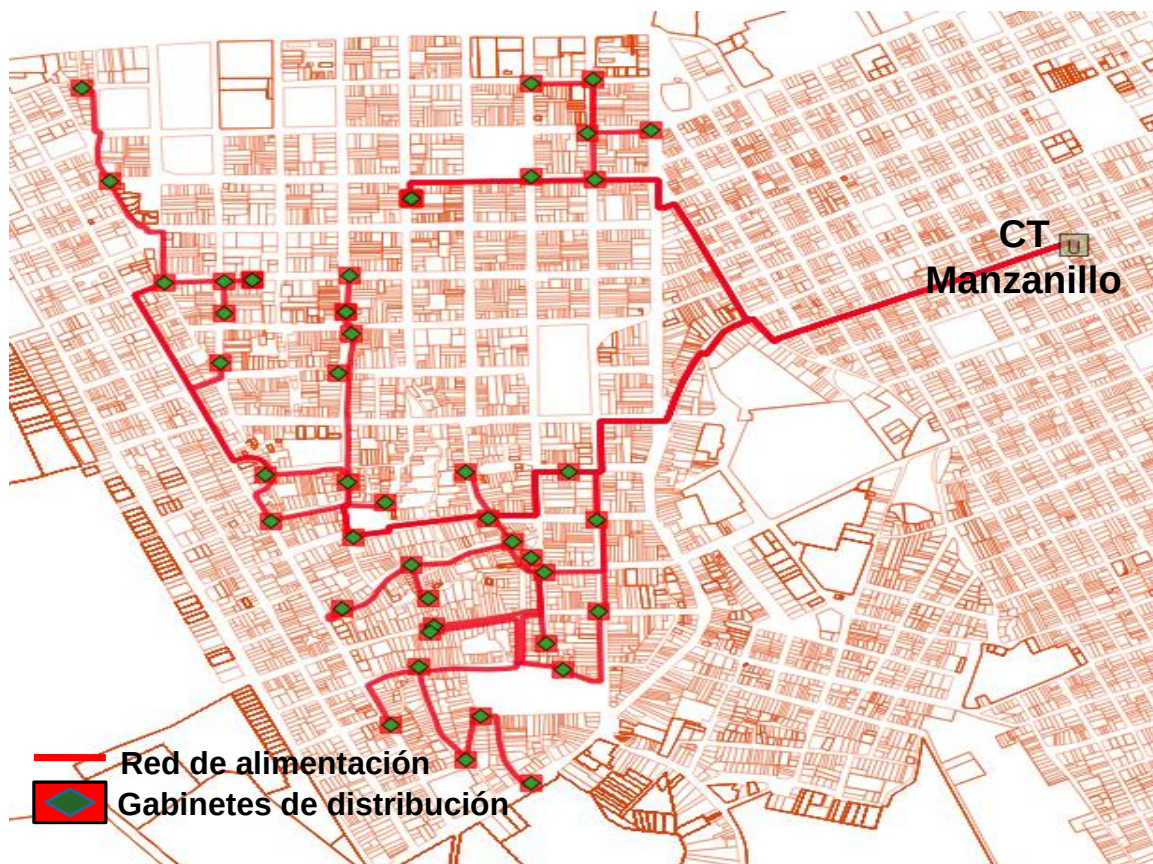


**Figura C.1.** Grupos de clientes potenciales





**Figura C.2.** Red de fibra de acometida y de distribución



**Figura C.3.** Red de fibra de alimentación

# ANEXO D

## Listado de materiales

| Material                              | Costo unitario (USD) | Instalación (USD) | Cantidad | Costo (USD) | Unidad |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------|----------|-------------|--------|
| Cable aéreo 12FO                      | \$1,61               | \$2,00            | 775      | \$2627,11   | metro  |
| Cable aéreo 24FO                      | \$1,47               | \$2,00            | 20788,2  | \$72134,91  | metro  |
| Cable aéreo 2FO                       | \$0,77               | \$2,00            | 44406,4  | \$123005,66 | metro  |
| Caja de terminal óptica (aérea)       | \$32,39              | \$20,00           | 234      | \$12259,26  | equipo |
| CPE_PON                               | \$166                | \$40,00           | 3439     | \$708434,00 | equipo |
| Gabinetes                             | \$1750               | \$1100,00         | 54       | \$153900,00 | equipo |
| Cable 12FO                            | \$1,39               | \$1,00            | 934325,9 | \$170043,76 | metro  |
| Cable 24FO                            | \$0,97               | \$1,00            | 49,5     | \$97,44     | metro  |
| Cable 2FO                             | \$0,81               | \$1,00            | 8957,9   | \$16213,75  | metro  |
| Cable 48FO                            | \$2,46               | \$1,00            | 2365,5   | \$8184,52   | metro  |
| Cable 96FO                            | \$4,00               | \$1,00            | 13373,3  | \$66866,44  | metro  |
| Caja de conexión óptica (en registro) | \$15,54              | \$50,00           | 1460     | \$95688,40  | equipo |
| Ductos (12 tubos)                     | \$1,10               | \$1,25            | 17872,3  | \$41999,88  | metro  |
| Ductos (2 tubos)                      | \$0,30               | \$1,00            | 8957,9   | \$11645,24  | metro  |
| Ductos (3 tubos)                      | \$1,50               | \$1,25            | 4884,3   | \$13431,73  | metro  |
| Ductos (7 tubos)                      | \$3                  | \$1,25            | 2787,2   | \$11845,56  | metro  |
| Registro de mano                      | \$100                | \$100,00          | 2        | \$400,00    | equipo |
| Registro                              | \$300                | \$300,00          | 1        | \$600,00    | equipo |
| ODF                                   | \$1629,77            | \$100,00          | 55       | \$95137,35  | equipo |

|                                         |         |          |         |                     |        |
|-----------------------------------------|---------|----------|---------|---------------------|--------|
| Tarjetas de 16 puertos GPON             | \$900   | \$100,00 | 7       | \$7000,00           | equipo |
| Empalmes                                | -       | \$5,00   | 11597   | \$57985,00          | metro  |
| Divisores ópticos 1:8                   | \$16,70 | -        | 505     | \$8433,50           | equipo |
| Alimentación y distribución (soterrado) | -       | \$40,00  | 14804,5 | \$592179,27         | metro  |
| Acometida (soterrado)                   | -       | \$20,00  | 9010    | \$180199,68         | metro  |
|                                         |         |          |         |                     |        |
| <b>Costo total</b>                      |         |          |         | <b>\$2450312,47</b> |        |

# ANEXO E

## Costo e ingresos por clientes conectados

---

En la tabla E.1 figura el costo de inversión por cliente para diferentes razones de adopción.

**Tabla E.1.** Costo por cliente

| Razón de adopción | Costo por cliente sin conectar (USD) | Costo de despliegue por cliente conectado (USD) | Costo total por cliente conectado (USD) |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 5 %               | \$383,44                             | \$7711,34                                       | \$8327,63                               |
| 6 %               | \$381,64                             | \$6371,21                                       | \$6959,65                               |
| 15 %              | \$389,18                             | \$2598,81                                       | \$3106,31                               |
| 20 %              | \$381,02                             | \$1907,34                                       | \$2401,93                               |
| 30 %              | \$380,45                             | \$1269,04                                       | \$1750,94                               |
| 50 %              | \$382,77                             | \$765,76                                        | \$1236,23                               |
| 100 %             | \$386,40                             | \$386,40                                        | \$851,02                                |

En la tabla E.2 se presentan los ingresos para diferentes razones de adopción.

**Tabla E.2.** Ingresos para diferentes razones de adopción

| Razón de adopción | Cantidad de clientes conectados | Ingreso mensual (CUC) | Ingreso anual (CUC) |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|
| 5 %               | 172                             | \$12041,25            | \$144495            |
| 6 %               | 206                             | \$14449,5             | \$173394            |
| 15 %              | 516                             | \$36123,75            | \$433485            |
| 20 %              | 688                             | \$48165               | \$577980            |
| 30 %              | 1031                            | \$72247,5             | \$866970            |
| 50 %              | 1720                            | \$120412,5            | \$1444950           |
| 100 %             | 3439                            | \$240825              | \$2889900           |

Se analizaron las tarifas vigentes de servicios por acceso conmutado analógico y por la red digital de servicios integrados (RDSI), así como de conectividad nacional sobre IP para personas jurídicas. No obstante, al no contar con los costos para clientes residenciales (R), fue necesario fijar una tarifa mensual de 30 CUC por el paquete de servicios de voz, video y datos a través de una conexión de fibra óptica; lo que permitió obtener un ARPU anual de 360 CUC y general de 1176480 CUC.

Para los abonados no residenciales (NR) se asumió el costo mensual por cliente de 835 CUC, valor actual por la velocidad mínima requerida por los servicios de banda ancha, con lo que se logra un ingreso anual de 10020 CUC y general de 1713420 CUC. Los costos por servicio podrán disminuir con la implementación de la nueva red de acceso GPON y en la medida que se incorporen nuevos clientes.

Se calculó el ARPU anual máximo mediante la suma de los ingresos anuales por clientes residenciales y no residenciales para obtener un valor de 2889900 CUC. Si se considera una razón de adopción del 50 %, la cual indica que se tienen contratos con la mitad de los abonados en el área, el ingreso máximo planificado es de 1444950 CUC. Los ingresos anuales calculados de acuerdo con la cantidad de usuarios potenciales se presenta en la tabla E.3. La tasa de cambio considerada es de 1 CUC = 1 USD.

**Tabla E.3. Ingresos por año**

|                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| <b>Ingreso máximo (CUC)</b>        | \$2889900                |
| <b>Razón de adopción máxima</b>    | 50 %                     |
| <b>Ingresos planificados (CUC)</b> | \$1444950                |
| <b>Proyección por Año</b>          | <b>Ingresos por años</b> |
| <b>1 (4 %)</b>                     | 115596                   |
| <b>2 (6 %)</b>                     | 288990                   |
| <b>3 (10 %)</b>                    | 577980                   |
| <b>4 (10 %)</b>                    | 866970                   |
| <b>5 (9 %)</b>                     | 1127061                  |
| <b>6 (3 %)</b>                     | 1213758                  |
| <b>7 (3 %)</b>                     | 1300455                  |
| <b>8 (3 %)</b>                     | 1387152                  |
| <b>9 (3 %)</b>                     | 1473849                  |
| <b>10 (3 %)</b>                    | 1560546                  |