

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E INGENIERÍA DE UNA RED FTTH COMO
MEDIO DE COMUNICACIÓN PARA REDES SMART GRIDS
O REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES EN EL SISTEMA
DE DISTRIBUCIÓN DE LA EBSA ZONA PUERTO BOYACÁ**

Trabajo de grado presentado por:

ASTRID LORENA ROA AVILA

Para optar al título de:

INGENIERA ELECTRÓNICA

Tunja, Boyacá Colombia

2025

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E INGENIERÍA DE UNA RED FTTH COMO
MEDIO DE COMUNICACIÓN PARA REDES SMART GRIDS
O REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES EN EL SISTEMA
DE DISTRIBUCIÓN DE LA EBSA ZONA PUERTO BOYACÁ**

Trabajo de grado presentado por:

Astrid Lorena Roa Avila

Director:

M.Sc. Cristian David Parra Camacho

Codirectores:

M.Sc. Angélica María Salazar Madrigal

Ph.D. William Fabián Chaparro Becerra

Director empresa

Jorge Arturo Mojica Caceres

Tunja, Boyacá Colombia
2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mi familia, que ha sido mi mayor fuente de amor, apoyo y fortaleza.

A mis padres, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la honestidad, y por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba.

Esta meta alcanzada es también de ustedes.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo permanente. A mis padres, Margoth Yadira Ávila González y Juan de Jesús Roa Calderón, y a Inés González, quien ha también ha sido una fuente de apoyo importante en este proceso. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Santo Tomás, al programa de Ingeniería Electrónica y a los docentes por brindarme la formación académica y humana necesaria para el desarrollo de este trabajo de grado.

De manera especial, agradezco a mis directores, Cristian David Parra Camacho, Angélica María Salazar Madrigal y William Fabián Chaparro Becerra, por su orientación, dedicación y acompañamiento en cada etapa del proyecto, así como por sus observaciones y sugerencias que contribuyeron significativamente al resultado final.

Agradezco igualmente a la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA) y, de manera especial, a la dirección de operación, en particular a la coordinación de telemática, liderada por el ingeniero Jorge Mojica, quien fue mi tutor durante este proceso, y al ingeniero Dilvar Puerto. A ambos les agradezco sus enseñanzas y consejos respecto a la vida laboral. Gracias a ellos, fue posible el acceso a la información y a los insumos técnicos necesarios para el diseño de la red FTTH propuesta para la zona de Puerto Boyacá.

Índice general

1	Introducción	14
1.1	Planteamiento del problema	15
1.2	Hipótesis	16
1.3	Justificación	16
2	Objetivos	18
2.1	Objetivo General	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	Marco teórico	19
3.1	Red eléctrica de distribución	19
3.1.1	Equipos de maniobra y protección en redes de media tensión . . .	19
3.1.1.1	Reconectores automáticos	19
3.1.2	Indicadores de continuidad del servicio: SAIDI y SAIFI	20
3.2	Smart Grids	21
3.2.1	GPRS	21
3.3	Fibra óptica	21
3.3.1	Introducción	21
3.3.2	Principios de la fibra óptica	22
3.3.3	Ancho de banda	22
3.3.4	Tipos de fibra óptica	22
3.3.4.1	Fibra monomodo	23
3.3.4.2	Fibra multimodo	23
3.3.5	Pérdidas o atenuaciones	24
3.3.5.1	Pérdida de la fibra	24
3.3.6	Arquitecturas FTTx	24
3.3.7	Tecnologías y estándares xPON	25
3.3.8	Cables de fibra óptica en redes FTTH	26
3.3.8.1	Fibra ADSS	26
3.3.8.2	Códigos de color según estándares	27
3.3.9	Componentes de una red PON (FTTH)	28
3.3.9.1	OLT	28
3.3.9.2	ONT / ONU	28
3.3.9.3	ODN	28
3.3.9.4	ODF	28
3.3.9.5	Conectores	29
3.3.9.6	Splitters ópticos	30
3.3.9.7	Empalme o fusión	31
3.3.10	Clases de red en sistemas PON	31

3.3.11	Presupuesto óptico y atenuación máxima del enlace	31
4	Metodología	33
4.1	Fase 1: Análisis de condiciones técnicas y geográficas de los reconectores	33
4.2	Fase 2: Diseño de la red FTTH y cálculo de atenuaciones	34
4.3	Fase 3: Selección de la tecnología PON y componentes técnicos	35
4.4	Caso de estudio: zona de Puerto Boyacá	36
5	Resultados	37
5.1	Resultados Fase 1:	37
5.1.1	Resultados del análisis del trayecto	37
5.1.1.1	Caracterización de reconectores y tramos	37
5.1.1.2	Distancias subestación-reconector	40
5.1.1.3	Distancias entre postes	41
5.1.1.4	Definición de spans y longitud para presupuesto óptico	43
5.1.1.5	Selección de herrajes de retención y amortiguadores	44
5.2	Resultados Fase 2:	45
5.2.1	Planos de distribución	45
5.2.1.1	Explicación de Convenciones	45
5.2.2	Planos unifilares	49
5.2.2.1	Explicación de Convenciones	49
5.2.3	Resultados del diseño óptico	52
5.2.3.1	Dimensionamiento de fusiones, conectores y splitters	52
5.2.3.2	Explicación de la herramienta de cálculo	53
5.2.3.3	Presupuesto óptico	55
5.3	Resultados Fase 3:	55
5.3.1	Resultados de la arquitectura de la red	56
5.3.1.1	Selección de la tecnología xPON	56
5.3.1.2	Selección de equipos OLT y ONT	56
5.3.2	Cantidad de materiales	60
5.3.2.1	Longitud total de fibra óptica	60
5.3.2.2	Herrajes de retención y amortiguadores	60
5.3.2.3	Splitters ópticos	61
5.3.2.4	Muflas, NAP y CTO	61
5.3.2.5	OLT, ONT, ODF y SFP	62
5.3.2.6	Consolidado de los materiales	63
5.3.2.7	Aportes del proyecto	64
	Conclusiones	65
	Referencias	66

Índice de figuras

Figura 3.1.1	Gabinete de control del reconector	20
Figura 3.3.1	Estructura interna de la fibra óptica	22
Figura 3.3.2	Fibra monomodo	23
Figura 3.3.3	Fibra multimodo	23
Figura 3.3.4	Diferentes versiones de redes FTTx	24
Figura 3.3.5	Componentes cable ADSS	27
Figura 3.3.6	Colores fibras individuales	27
Figura 3.3.7	Colores por el tipo de fibra	28
Figura 3.3.8	Conectores	29
Figura 3.3.9	Pérdidas máximas splitters balanceados	30
Figura 3.3.10	Pérdidas máximas splitters desbalanceados 1	30
Figura 3.3.11	Pérdidas máximas splitters desbalanceados 2	30
Figura 5.1.1	Red media tensión Pto. Boyacá	38
Figura 5.1.2	Diagrama unifilar líneas y subestaciones	38
Figura 5.1.3	Tramos Puerto Boyacá	42
Figura 5.2.1	Postes.	46
Figura 5.2.2	Reconector	46
Figura 5.2.3	Subestación	46
Figura 5.2.4	Splitters	47
Figura 5.2.5	Empalme	47
Figura 5.2.6	Empalme con splitter	47
Figura 5.2.7	Caja terminal óptica de poste (CTO)	47
Figura 5.2.8	Caja NAP	48
Figura 5.2.9	Marquilla de fibra óptica	48
Figura 5.2.10	Plano general de la red FTTH propuesta para la subestación Puerto Boyacá.	49
Figura 5.2.11	Marquilla de fibra óptica unifilar	50
Figura 5.2.12	Cables por hilo unifilar	50
Figura 5.2.13	Tipos de splitters unifilar	50
Figura 5.2.14	Tipos de splitters unifilar	51
Figura 5.2.15	Tipos de splitters unifilar	51
Figura 5.2.16	Caja terminal óptica de poste (CTO)	51
Figura 5.2.17	Plano unifilar de la red FTTH propuesta para la subestación Puerto Boyacá.	52
Figura 5.2.18	Interfaz de la calculadora desarrollada para el cálculo del presupuesto óptico	53
Figura 5.2.19	Funcionamiento de la calculadora desarrollada para el cálculo del presupuesto óptico.	54
Figura 5.3.1	OLT Huawei	57

Figura 5.3.2	SFP-GPON-SMF-UPC-Class C+	57
Figura 5.3.3	ONT Fiber to home	59

Índice de tablas

Tabla 5.1.1 Clasificación de reconectores y tramos de la zona Puerto Boyacá.	39
Tabla 5.1.2 Enumeración de tramos.	40
Tabla 5.1.3 Distancias subestación–reconector para la S/E Pto. Boyacá. . . .	41
Tabla 5.1.4 Ejemplo de distancias medidas entre postes para fibra ADSS 24 H de la S/E Pto. Boyacá.	42
Tabla 5.1.5 Rangos de longitud de vano y span de diseño asignado.	43
Tabla 5.1.6 Resumen de spans y longitud total de fibra por subestación. . . .	43
Tabla 5.1.7 Resumen de distancias y reservas de fibra ADSS por reconector S/E Pto. Boyacá.	44
Tabla 5.1.8 Rangos de longitud de vano y cantidad de amortiguadores por vano.	44
Tabla 5.1.9 Ejemplo de tabla dinámica para el conteo de herrajes de retención y amortiguadores en el tramo SE LA PERLA SPAN 24 H.	45
Tabla 5.2.1 Resumen de splitters por reconector para la S/E Puerto Boyacá.	53
Tabla 5.2.2 Presupuesto óptico S/E Puerto Boyacá-03.	55
Tabla 5.3.1 Cuadro comparativo de OLT.	58
Tabla 5.3.2 Cuadro comparativo de ONT	59
Tabla 5.3.3 Longitud total de fibra ADSS 24 hilos por span de diseño.	60
Tabla 5.3.4 Número de amortiguadores y herrajes de retención por subestación y tramo.	60
Tabla 5.3.5 Cantidad de splitters por subestación, tramo y tipo.	61
Tabla 5.3.6 Cantidad de muflas, NAP y CTO por subestación y tramo.	62
Tabla 5.3.7 Cantidad de OLT, ODF y ONT por subestación y tramo.	62
Tabla 5.3.8 Consolidado de materiales y equipos de la red FTTH propuesta. .	63

Anexos

Anexo A. Tablas de distancias subestación-reconectador

Anexo B. Base de datos de distancias entre postes

Anexo C. Calculadora presupuesto óptico

Anexo D. Presupuesto óptico

Anexo E. PDF Planos y unifilares

Planos

- SE Castillo PLANO
- SE La perla PLANO
- SE Okal PLANO
- SE Puerto Boyacá PLANO
- SE Puerto Serviez PLANO
- SE VELAZQUEZ PLANO

Unifilares

- PLANO UNIFILAR_SE El castillo
- PLANO UNIFILAR_SE La perla
- PLANO UNIFILAR_SE El okal
- PLANO UNIFILAR_SE El Pto.Boyacá
- PLANO UNIFILAR_SE El Pto.Serviez
- PLANO UNIFILAR_SE El Velazquez

Lista de abreviaturas y símbolos

Fibra óptica

EBSA	Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P.
ADSS	<i>All-Dielectric Self-Supporting</i> : cable autoportado totalmente dieléctrico.
PON	<i>Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva.
xPON	Familias de tecnologías de redes ópticas pasivas (PON en sus distintas variantes).
GPON	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva con capacidad gigabit.
XG-PON	<i>10 Gigabit-capable Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva con capacidad de 10 Gbit/s.
XGS-PON	<i>10 Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva simétrica de 10 Gbit/s.
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva Ethernet.
APON	<i>ATM Passive Optical Network</i> : red óptica pasiva basada en ATM.
ODN	<i>Optical Distribution Network</i> : red de distribución óptica.
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> : terminal de línea óptica.
ONT	<i>Optical Network Terminal</i> : terminal de red óptica.
ONU	<i>Optical Network Unit</i> : unidad de red óptica.
ODF	<i>Optical Distribution Frame</i> : unidad de distribución óptica.
CTO	Caja Terminal Óptica, punto final de distribución de la red óptica en poste o fachada.
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i> : módulo óptico enchufable de pequeño factor de forma.
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i> : reflectómetro óptico en el dominio del tiempo.

FTTH	<i>Fiber To The Home</i> : fibra hasta el hogar.
FTTB	<i>Fiber To The Building/Business</i> : fibra hasta el edificio o negocio.
FTTC	<i>Fiber To The Curb</i> : fibra hasta la acera o armario de distribución cercano.
FTTK	<i>Fiber To The Kerb</i> : fibra hasta el borde de acera (variante de FTTC).
FTTCAB	<i>Fiber To The Cabinet</i> : fibra hasta el gabinete de distribución.
FTTx	<i>Fiber To The X</i> : fibra hasta el punto <i>X</i> .

Redes eléctricas inteligentes

MT	Media Tensión.
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i> : índice de duración media de interrupciones del sistema.
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i> : índice de frecuencia media de interrupciones del sistema.
S/E	Subestación eléctrica.

Comunicaciones y normas

TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> : servicio general de paquetes por radio.
Mbps	<i>Megabits per second</i> : megabits por segundo.
Gbps	<i>Gigabits per second</i> : gigabits por segundo (unidad de tasa de transmisión).
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i> .
HTML	<i>HyperText Markup Language</i> : lenguaje de marcado para páginas web.
DWG	Formato de archivo de dibujo nativo de AutoCAD.
KMZ	Formato comprimido de archivos KML utilizado por Google Earth.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> : organización internacional de normalización.
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> : Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> : Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i> .

TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i> : Asociación de la industria de telecomunicaciones.
------------	--

Símbolos y unidades

L	Longitud total de la fibra del enlace [km].
α	Atenuación específica de la fibra [dB/km].
M	Margen de seguridad del enlace [dB].
dB	Decibelio: unidad adimensional usada para expresar pérdidas/ganancias.
km	Kilómetro: unidad de longitud.
m	Metro: unidad de longitud.
μm	Micrómetro: unidad de longitud (10^{-6} m), usada para diámetros de núcleo/revestimiento de fibra.

Resumen

En este proyecto se aborda la necesidad de modernizar la infraestructura de comunicación para las redes eléctricas inteligentes (Smart grids) de la EBSA en la zona de Puerto Boyacá. Actualmente, el monitoreo de los reconectores de línea de media tensión se realiza mediante tecnología GPRS, la cual presenta limitaciones significativas en la transmisión, lo que impacta la eficiencia operativa y la calidad del servicio. Como solución, se propone el diseño e ingeniería de una red de fibra óptica FTTH (Fiber to Home), una tecnología que ofrece comunicación con mayor confiabilidad para la operación de la red eléctrica.

Se incluyen varias etapas, dentro de las cuales están: validar diversas tecnologías para la implementación de Smart Grid, establecer un diseño técnicamente viable y confiable para la gestión de fallas en los circuitos a través de los reconectores, los cuales deberán activarse de manera automática o con gestión remota; el diseño debe contemplar que el sistema sea escalable y con una confiabilidad tal que dé cumplimiento al marco regulatorio vigente para el sector eléctrico, siendo un referente para la modernización de las comunicaciones de las diferentes topologías de la distribución eléctrica del departamento de Boyacá.

Palabras Clave: Fibra óptica, PON, Atenuaciones, diseño

Abstract

In this project, the need to modernize the communication infrastructure for EBSA's smart grids in the Puerto Boyacá area is addressed. Currently, monitoring of medium-voltage line reclosers is carried out using GPRS technology, which presents significant limitations in data transmission and affects operational efficiency and quality of service. As a solution, the design and engineering of an FTTH (Fiber to the Home) optical fiber network is proposed, a technology that offers more reliable communications for power system operation.

The project includes several stages, among which are: evaluating different technologies for smart grid implementation; establishing a technically viable and reliable design for fault management in the circuits through reclosers, which must be activated automatically or via remote control; and ensuring that the design considers a scalable system with a level of reliability that complies with the current regulatory framework for the electrical sector, serving as a benchmark for the modernization of communications in the different distribution network topologies in the department of Boyacá.

Keywords: Optical fiber, PON, attenuations, design

Capítulo 1

Introducción

Las Smart Grids requieren infraestructuras de comunicación capaces de soportar el monitoreo, control y operación en tiempo real de dispositivos como los reconectores de media tensión. Para responder a estas exigencias, resulta necesario implementar soluciones de telecomunicaciones robustas, de alta capacidad y con amplia disponibilidad operativa.

El presente proyecto aborda el diseño e ingeniería de una red de fibra óptica FTTH como medio de comunicación para los reconectores ubicados en la zona de distribución de la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA) en Puerto Boyacá, con el fin de habilitar la transmisión confiable de información entre estos dispositivos y los sistemas de supervisión y control de la empresa. La propuesta integra criterios técnicos, geográficos, normativos y operativos, con el propósito de garantizar que la infraestructura diseñada sea viable, escalable y acorde con las necesidades reales de la red de media tensión.

El desarrollo de este trabajo se estructura en tres fases. En la primera fase se realiza un análisis técnico y geográfico de los reconectores, para identificar sus condiciones de operación, su ubicación en la red, los circuitos asociados y las distancias reales desde las subestaciones. Este estudio permite caracterizar el escenario físico donde será desplegada la infraestructura óptica y constituye la base matemática para los cálculos de tendido, reservas y empalmes.

En la segunda fase se lleva a cabo el diseño de la red FTTH, tomando como insumo los datos físicos recopilados. Para ello, se establecen spans, se define el tipo de cable a utilizar, se determinan los herrajes y amortiguadores requeridos, y se elaboran planos de planta y planos unifilares en AutoCAD. También se efectúan los cálculos del presupuesto óptico considerando atenuación del cable, pérdidas por fusiones, conectores, splitters y margen de seguridad, de modo que cada enlace cumpla con las potencias mínimas exigidas por la tecnología seleccionada.

La tercera fase corresponde a la selección de la tecnología PON (xPON) y de los equipos de campo y cabecera. A partir de la revisión de alternativas GPON, XG-PON y XGS-PON, así como de la comparación de distintas OLT y ONT disponibles en el mercado, se eligen los dispositivos más apropiados según capacidad, alcance, clase óptica, compatibilidad y condiciones de operación en ambientes eléctricos. Esta fase

concluye con la definición de los materiales que reúnen todos los elementos necesarios para la implementación de la solución.

Los resultados obtenidos permiten formular una propuesta integral de ingeniería que no solo resuelve la comunicación entre reconectadores y subestaciones, sino que también proyecta una infraestructura óptica preparada para la expansión futura de la red y para la transición hacia una red eléctrica inteligente. De esta manera, el proyecto contribuye al fortalecimiento de la operación del sistema de distribución de la EBSA en Puerto Boyacá y sienta las bases para nuevas estrategias de automatización y telecontrol.

1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años, se ha evidenciado el incremento del consumo del sistema energético mundial, lo que ha impulsado la evolución de los sistemas eléctricos hacia redes más avanzadas: las redes eléctricas inteligentes o Smart Grids (UPME, 2016). Estas redes se caracterizan por integrar tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y, como resultado, se obtienen redes más gestionables y seguras, lo que contribuye a un suministro energético más confiable y sostenible. (Meza Segura et al., 2023)

El incremento masivo del uso de energía requiere sistemas aptos para realizar un monitoreo permanente con tiempos de respuesta rápidos para la toma de decisiones operativas. En este contexto, los reconectadores de línea desempeñan un papel importante, ya que permiten el restablecimiento del suministro de energía eléctrica al usuario cuando se presentan fallas temporales (Ortega et al., 2016). El interés de mantener una comunicación constante con estos dispositivos radica en su capacidad para discriminar las fallas temporales de las permanentes.

La Empresa de Energía de Boyacá S.A E.S.P (EBSA), en la actualidad, emplea tecnologías de comunicación GPRS (general packet radio service) para el monitoreo de los reconectadores de línea instalados en la red de distribución de media tensión (MT). Sin embargo, este tipo de tecnología presenta limitaciones significativas en términos de velocidad de transmisión, estabilidad de conexión, interferencias electromagnéticas y problemas de cobertura y confiabilidad (Sánchez, 2005)

Estas limitaciones impactan directamente en la eficiencia operativa, la calidad del servicio y la sostenibilidad de la red eléctrica. Ante este escenario, el uso de la fibra óptica, específicamente FTTH (Fiber to the home), emerge como una alternativa viable al permitir una comunicación más estable, de alta velocidad (hasta 1 Gbps o más), baja latencia, y resistencia frente a interferencias electromagnéticas, así como una mayor confiabilidad de las conexiones con los reconectadores o equipos susceptibles de ser automatizados, supervisados o gestionados remotamente. Estas características son importantes para mantener la red de distribución eléctrica (Algar, 2023)

Dada la complejidad de un sistema de distribución, se hace necesario enfocarse en una zona específica de toda la red que opera la Empresa de Energía de Boyacá. En este sentido, se decidió trabajar en la zona de Puerto Boyacá, debido a que allí se está llevando a cabo actualmente el proyecto sobre la implementación de la fibra óptica. Por

eso surge la necesidad de diseñar una red FTTH para mejorar la comunicación de los reconectores de línea en la red de media tensión de EBSA y su implementación en la zona Puerto Boyacá.

Considerando tanto las limitaciones operativas de la tecnología GPRS como la necesidad de una comunicación confiable y en tiempo casi real para la supervisión y control de los reconectores, se hace necesario plantear una solución basada en fibra óptica que permita optimizar el desempeño del sistema de comunicaciones. En consecuencia, el presente trabajo se orienta por la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar una red de comunicaciones FTTH, bajo criterios y trazados adecuados, para los reconectores de la red de media tensión de los circuitos conectados a las subestaciones de la zona de Puerto Boyacá de la EBSA?

1.2. Hipótesis

El diseño de una red de comunicaciones FTTH, bajo criterios técnicos adecuados de planificación, dimensionamiento y trazado, permitirá mejorar la velocidad de transmisión, reducir la latencia y aumentar la confiabilidad en la comunicación de los reconectores de la red de media tensión en la zona de Puerto Boyacá, superando las limitaciones técnicas presentadas por la tecnología GPRS actualmente utilizada por la EBSA.

1.3. Justificación

La demanda de la energía eléctrica se ha ido intensificando en los últimos años, lo cual ha impulsado la evolución de los sistemas eléctricos hacia modelos más inteligentes y eficientes. En este ámbito, las Smart Grids se han convertido en un medio moderno para las redes de distribución eléctrica, integrando tecnologías avanzadas de monitoreo, automatización y comunicación. Estas redes requieren infraestructuras de telecomunicaciones sólidas y rápidas, capaces de responder de una manera ágil ante incidentes del sistema y de mantener una gestión eficiente de la red (Iberdrola, n.d.)

Con lo anterior, implica un desafío para la infraestructura física, sino que también exige un manejo adaptable de la información a través de las TIC. La capacidad de recolectar, transmitir y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real es crucial para la toma de decisiones que aseguren la calidad del suministro y la rápida respuesta ante las fallas. Las comunicaciones forman una parte importante del funcionamiento de las Smart grids, ya que facilitan la interconexión entre los centros de control y los dispositivos (Chen et al., 2010).

El empleo de una red FTTH, adapta la necesidad de comunicación del sistema eléctrico, ya que esta tecnología ofrece alta capacidad de transmisión, baja latencia, mayor estabilidad frente a las interferencias electromagnéticas. Estas características son esenciales para garantizar una comunicación continua y eficaz, lo cual es lo esencial para el funcionamiento de una Smart grid. Además, estas redes están basadas en tecnologías PON, específicamente xPON, y ofrecen capacidades de transmisión simétricas y asimétricas de alta velocidad (1,25 Gbps) en ambas direcciones de transmisión.

Igualmente, ofrecen una cobertura de red más amplia, ya que pueden proporcionar servicios de hasta 60 km de distancia central, lo que permite llegar a áreas geográficas remotas. (Algar, 2023)

Este proyecto se centra en el diseño e ingeniería de una red de fibra óptica para la comunicación de una red eléctrica inteligente, abordando aspectos técnicos fundamentales, como el análisis del entorno (georreferenciación), elección de componentes, cálculo de pérdidas y la elaboración de planos. Todo esto se realizará bajo criterios técnicos y cumplimientos normativos, con el objetivo de estructurar una alternativa sólida y adaptable a las necesidades futuras del sistema de distribución eléctrico.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar una red de fibra óptica FTTH para los reconfiguradores de la red de media tensión de los circuitos conectados a las subestaciones de la zona de Puerto Boyacá de EBSA.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar las condiciones técnicas y geográficas de los reconfiguradores de línea en la zona de puerto Boyacá, a partir de la georreferenciación de la infraestructura existente.
- Diseñar la red FTTH, calculando las atenuaciones para garantizar la correcta transmisión de datos.
- Seleccionar tecnología de la familia xPON y los componentes técnicos apropiados para su implementación en el diseño.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Red eléctrica de distribución

La red eléctrica de distribución es la encargada de transportar la energía eléctrica desde las subestaciones de transformación hasta los usuarios finales, pasando por distintos niveles de tensión y configuraciones de red. A diferencia del sistema de transmisión, que opera a tensiones elevadas para el transporte a larga distancia, la red de distribución funciona normalmente en el rango de media tensión (entre 4 kV y 35 kV) y baja tensión en su etapa final, donde se conecta directamente a los consumidores residenciales, comerciales e industriales. (Solís & Arcos, 2018)

3.1.1. Equipos de maniobra y protección en redes de media tensión

Para garantizar la operación segura y confiable de la red de distribución, se emplean diversos equipos de maniobra y protección tales como interruptores automáticos, seccionadores, fusibles, seccionalizadores y reconectadores. Estos dispositivos permiten detectar y despejar fallas como cortocircuitos o contactos a tierra, limitar la extensión de las interrupciones y proteger transformadores, líneas y cargas conectadas al sistema. (Trashorras, 2013)

Entre todos estos elementos los reconectadores automáticos juegan un papel fundamental en la mejora de la continuidad del servicio, especialmente en líneas aéreas de media tensión expuestas a fallas transitorias.

3.1.1.1. Reconectadores automáticos

Un reconector automático es un interruptor de alta tensión capaz de abrir el circuito cuando se detecta una falla y volver a cerrarlo de forma automática después de un intervalo de tiempo predeterminado, con el fin de verificar si la falla ha desaparecido. A diferencia de un interruptor convencional que permanece abierto hasta la intervención manual, el reconector ejecuta una o varias secuencias de apertura y cierre (reintentos), lo que permite restablecer el servicio rápidamente en caso de fallas transitorias y reducir el número de interrupciones prolongadas para los usuarios. (Barros, 2024)

Los reconectores que utiliza la EBSA son automáticos OSM de Noja Power. Estos utilizan el gabinete de control RC10 y RC15, el cual alberga un relé de protección, medida, monitores y control e indicación, el módulo de alimentación, módulo interfaz Switchgear (SIM) encargado de ejecutar las funciones de protección y automatización. Desde el punto de vista de las comunicaciones, el RC incorpora múltiples puertos (Ethernet, RS232, USB), así como opciones de conectividad con módem móvil.(Noja Power, n.d.)

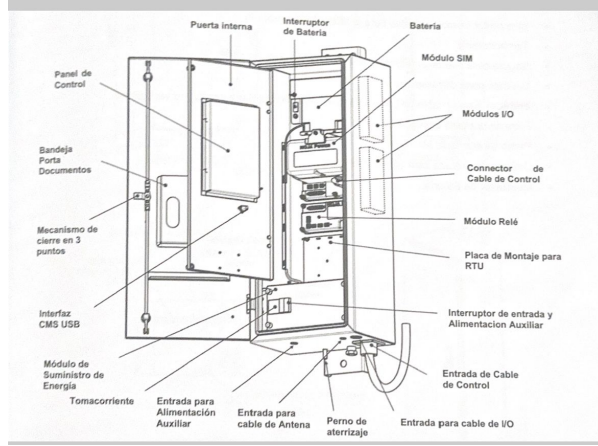


Figura 3.1.1: Gabinete de control del reconector

Fuente: (Noja Power, n.d.)

3.1.2. Indicadores de continuidad del servicio: SAIDI y SAIFI

La confiabilidad de la red de distribución se evalúa habitualmente mediante índices normalizados que cuantifican la frecuencia y la duración de las interrupciones del suministro eléctrico que experimentan los usuarios. Los indicadores más utilizados a nivel internacional se encuentran el *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) y el *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI), definidos en la norma IEEE 1366 como índices de confiabilidad para sistemas de distribución. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022)

El SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) representa la duración promedio total de las interrupciones que sufre un cliente durante un período determinado, normalmente un año. Se expresa en unidades de tiempo y se calcula como: (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022)

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum \text{Minutos de interrupción de los clientes}}{\text{Número total de clientes atendidos}} \quad (3.1.1)$$

Por su parte, el SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) mide la frecuencia media con la que un cliente experimenta interrupciones sostenidas del suministro en el mismo período de referencia. Se expresa en interrupciones por cliente y año y se define como: (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022)

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum \text{Número total de clientes interrumpidos}}{\text{Número total de clientes atendidos}} \quad (3.1.2)$$

Un valor bajo de SAIFI indica que los clientes sufren pocas interrupciones a lo largo del año, mientras que un SAIDI reducido refleja que, cuando ocurren dichas interrupciones, su duración media es corta. Por ello, estos índices se emplean como métricas clave para evaluar el impacto de las fallas en la red de media tensión y para justificar inversiones en automatización.

3.2. Smart Grids

Una “Smart Grid” es un sistema de energía eléctrica que integra tecnologías de información y comunicaciones para permitir la supervisión en tiempo-real, la gestión inteligente y la optimización del sistema de distribución, incluyendo generación, transmisión y consumo. Según Huawei Enterprise:

“The smart grid is an innovative power system based on information and communication technology. ... On the smart grid, the bidirectional flow of current and information is ensured from the power plant to the user side.” (Huawei Technologies, 2024)

3.2.1. GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) surge como una evolución de las redes GSM para superar las limitaciones de los servicios de datos basados en conmutación de circuitos. En GSM clásico, cuando se establece una conexión de datos, la red reserva un canal físico de manera continua para ese usuario, aunque solo se envíen pequeños volúmenes de información de forma esporádica, lo que resulta poco eficiente en aplicaciones interactivas o de tráfico transitorio, como la navegación web o el envío de pequeños paquetes de telemetría. Con GPRS, en cambio, el acceso a la red de paquetes se lleva directamente hasta el usuario móvil mediante protocolos como TCP/IP y la información se transmite en forma de paquetes que se encaminan salto a salto a través de nodos específicos de la red llamados GSN. De esta forma, los recursos de radio solo se ocupan durante el envío efectivo de los paquetes y se liberan inmediatamente después, permitiendo que el mismo canal sea compartido dinámicamente por múltiples usuarios y mejorando notablemente la eficiencia en el uso de la red para servicios de datos. (Sánchez, 2005)

3.3. Fibra óptica

3.3.1. Introducción

La fibra óptica es un medio de transmisión que guía pulsos de luz a través de un filamento extremadamente delgado de vidrio o plástico. Su capacidad para transportar información depende de principios ópticos como la refracción, la reflexión interna total y la propagación de ondas electromagnéticas en el espectro infrarrojo, donde el material presenta sus menores niveles de pérdida. Gracias a estas propiedades, la fibra puede transmitir datos a altas velocidades con un nivel mínimo de atenuación, lo que la convierte en una alternativa muy superior a los cables metálicos. (Gómez López et al.,

2015)

Con el avance de la tecnología, se han desarrollado fibras con distintos diámetros de núcleo, perfiles de índice de refracción y características de dispersión, lo que permite su adaptación a múltiples aplicaciones. Entre las particularidades más relevantes se encuentran su gran ancho de banda, baja interferencia electromagnética, alta estabilidad frente a variaciones de temperatura y posibilidad de cubrir grandes distancias.(Gómez López et al., 2015)

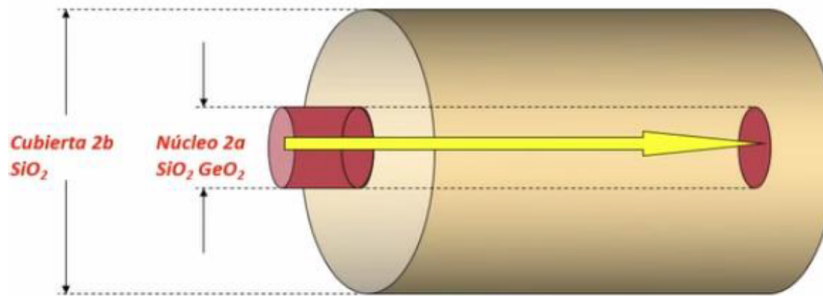


Figura 3.3.1: Estructura interna de la fibra óptica

Fuente: (Chaparro Becerra, 2025)

3.3.2. Principios de la fibra óptica

Los sistemas de comunicación por fibra óptica operan transmitiendo información mediante pulsos de luz. Para lograrlo, se emplea un fotoemisor, dispositivo encargado de transformar las señales eléctricas en radiación luminosa. Esta luz viaja a través de un medio óptico que actúa como guía para la propagación. Finalmente, en el extremo receptor se utiliza un fotodetector, cuya función es convertir nuevamente la señal luminosa en impulsos eléctricos para su procesamiento. (Altamar & Puerta, 2021)

3.3.3. Ancho de banda

El ancho de banda de una señal corresponde al intervalo de frecuencias que contiene la información transmitida, y se define como la diferencia entre su componente de mayor frecuencia y la de menor frecuencia. Para que un sistema de comunicaciones pueda transportar adecuadamente dicha información, el ancho de banda del canal debe ser lo suficientemente amplio para permitir el paso íntegro de todas las componentes relevantes de la señal.(Tomasi, 2003)

3.3.4. Tipos de fibra óptica

La fibra óptica maneja dos tipos de fibra para la transmisión de datos, donde se encuentra la fibra monomodo y multimodo; cada una de ellas maneja ventajas y desventajas con respecto a la otra:

3.3.4.1. Fibra monomodo

Las fibras ópticas monomodo se caracterizan por tener un núcleo de diámetro extremadamente reducido, lo que permite la propagación de un único modo o trayectoria de la luz. Este núcleo, que habitualmente oscila entre $8\text{ }\mu\text{m}$ y $10\text{ }\mu\text{m}$, requiere un acoplamiento muy preciso de la señal luminosa, ya que la luz debe ingresar de forma altamente confinada para mantenerse guiada adecuadamente. (Prieto, 2014)



Figura 3.3.2: Fibra monomodo
Fuente: (Chaparro Becerra, 2025)

3.3.4.2. Fibra multimodo

Las fibras ópticas multimodo se caracterizan por disponer de un núcleo con un diámetro considerablemente mayor en comparación con las fibras monomodo, lo que permite la propagación simultánea de múltiples modos de transmisión. El núcleo suele presentar dimensiones cercanas a $50\text{ }\mu\text{m}$ o $62,5\text{ }\mu\text{m}$, facilitando el acoplamiento de la luz en diferentes trayectorias. Debido a este mayor tamaño, pueden emplearse fuentes emisoras de menor complejidad, como LEDs, así como conectores más simples, lo que reduce significativamente los costos de instalación y mantenimiento. (Prieto, 2014)

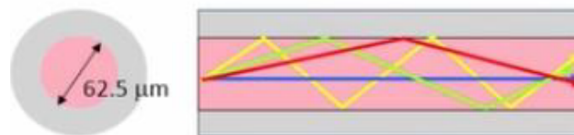


Figura 3.3.3: Fibra multimodo
Fuente: (Chaparro Becerra, 2025)

Además, las fibras multimodo, según el sistema ISO, se clasifican según su ancho de banda; las fibras pueden ser OM1, OM2 o OM3.

- OM1: Fibra $62,5/125\text{ }\mu\text{m}$ de índice gradual, puede soportar hasta Gigabit Ethernet (1 Gbit/s), y suelen utilizar LEDs como emisores de luz o medio de transmisión de la señal.
- OM2: Fibra $50/125\text{ }\mu\text{m}$ de índice gradual, puede soportar Gigabit Ethernet, y suelen utilizar LEDs como emisores de luz o medio de transmisión de la señal.
- OM3: Fibra $50/125\text{ }\mu\text{m}$ de índice gradual, puede soportar 10 Gigabit Ethernet (300 m), y suelen utilizar láser como emisores de luz o medio de transmisión de la señal.

3.3.5. Pérdidas o atenuaciones

3.3.5.1. Pérdida de la fibra

Una de las características más importantes de los cables de fibra óptica es la pérdida de potencia que sufre la señal a medida que se propaga a lo largo del enlace. Esta reducción de potencia se conoce como atenuación y se expresa habitualmente en dB. La atenuación total de un tramo de fibra puede calcularse a partir de la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada mediante la expresión

$$A_{\text{tot}}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \right) \quad (3.3.1)$$

donde P_{ent} es la potencia óptica que ingresa al cable y P_{sal} la potencia que se recibe a la salida. Debido a que la atenuación representa una pérdida, su valor es normalmente positivo.

En el diseño se suele especificar la atenuación como una magnitud por unidad de longitud, en dB/km, lo que permite estimar fácilmente la pérdida para diferentes distancias. (Tomasi, 2003) En el estándar establecido por la ITU-T G.652, la cual habla de las características de las fibras y los cables ópticos monomodo, se establece que el coeficiente de atenuación máximo, para una longitud de onda de 1310 nm a 1625 nm, es de 0,40 dB/km. (International Telecommunication Union, 2024)

3.3.6. Arquitecturas FTTx

En las redes de fibra óptica existen varias arquitecturas o redes llamadas Fiber to the x (FTTx), las cuales describen hasta dónde llega la información en una red de acceso. Estas redes, consideradas de banda ancha, tienen la capacidad de transportar gran cantidad de datos o información a velocidades elevadas.

Existen diferentes niveles de alcance, y se selecciona según costos, capacidad, distancia y tipo de servicio. Todas las redes FTTx admiten una configuración lógica de red en árbol, estrella, bus o en anillo, y en todas ellas hay posibilidad de utilizar elementos activos dependiendo de la localización de los usuarios finales. (Acevedo, 2023)

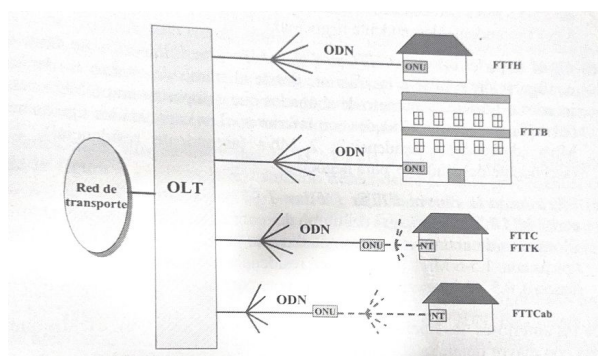


Figura 3.3.4: Diferentes versiones de redes FTTx

Fuente: (Capmany Francoy, 2007)

FTTH

Se trata de llegar con fibra hasta el hogar, directamente desde la central. Es la alternativa más directa ya que no emplea segmentos de cable conductor. Requiere transmisión completamente óptica de forma descendente y ascendente.(Capmany Francoy, 2007)

FTTB

Se trata de llegar con fibra hasta el interior de un edificio residencial o de negocio, existe una única terminal para todo el edificio, de forma que lo restante es cobre (coaxial).(Capmany Francoy, 2007)

FTTC o FTTK

Se trata de compartir una ONT y el tendido de fibra por parte de varios abonados (manzanas o zonas residenciales pequeñas).(Capmany Francoy, 2007)

FTTCab

Se trata de una arquitectura similar a la anterior, pero el tramo de cobre de la ODN es mucho mayor.(Capmany Francoy, 2007)

3.3.7. Tecnologías y estándares xPON

Cuando se habla de tecnologías xPON, se refiere a una red óptica pasiva (Passive Optical Network). En las redes de fibra óptica existen varias arquitecturas o redes llamadas Fiber to the x (FTTx), las cuales describen hasta dónde llega la información en una red de acceso. Estas redes, consideradas de banda ancha, tienen la capacidad de transportar gran cantidad de datos o información a velocidades elevadas.(Acevedo, 2023)

Estas redes constituyen una de las tecnologías más utilizadas en despliegues de acceso de banda ancha, particularmente en arquitecturas FTTH. Los estándares que definen su funcionamiento han sido desarrollados principalmente por dos organismos: la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).(Radicelli et al., 2019)

APON

El estándar APON fue el primer sistema PON formalizado en la recomendación ITU-T G.983, la letra A proviene de ATM (Asynchronous Transfer Mode). Opera con velocidades simétricas de 155 Mbps en sentido upstream y downstream. Su principal limitación es la baja capacidad de transmisión y la falta de mecanismos eficientes para servicios broadcast.(Radicelli et al., 2019)

GPON

GPON es una de las tecnologías más difundidas actualmente. Está definida en las recomendaciones ITU-T G.984.1 a G.984.4, donde se establecen las características

generales, parámetros de la ODN y el protocolo de gestión OMCI.

Esta tecnología permite velocidades simétricas de 2.5 Gbps o modos asimétricos de 2.5 Gbps downstream y 1.25 upstream. Su arquitectura emplea multiplexación por división de tiempo y asignación dinámica de ancho de banda, lo que la convierte en un estándar flexible y eficiente para servicios Triple Play, alcanzando distancias de hasta 37 km. (Radicelli et al., 2019)

XG-PON

Definido en la recomendación ITU-T G.987, XG-PON extiende la capacidad de GPON mediante el incremento de la velocidad de transmisión. Opera con tasas de 10 Gbps downstream y 2.5 Gbps upstream. Este estándar fue diseñado para coexistir con GPON en la misma infraestructura ODN, facilitando procesos de migración en operadores con despliegues previos. (Radicelli et al., 2019)

XSG-PON

XGS-PON es una evolución de XG-PON que incorpora transmisión simétrica de alta capacidad, proporcionando 10 Gbps tanto en sentido *upstream* como *downstream*. Esta tecnología fue estandarizada por la UIT-T dentro de la serie ITU-T G.9807.x, y fue concebida para satisfacer la creciente demanda de servicios de banda ancha ultrarrápida en aplicaciones residenciales, empresariales e industriales. (Neset, 2017)

EPON

EPON está definido por el estándar IEEE 802.3ah y se caracteriza por transportar tráfico Ethernet de forma nativa. Soporta velocidades simétricas de 1.25 Gbps y una arquitectura relativamente simple. EPON presenta ventajas como optimización del tráfico IP y fácil interoperabilidad entre equipos. (Radicelli et al., 2019)

3.3.8. Cables de fibra óptica en redes FTTH

En las redes FTTH, el cable de fibra óptica no solo actúa como medio de transmisión, sino también como elemento estructural de la red de acceso. Dependiendo del entorno de instalación (red eléctrica aérea, fachada, ductos, interior de edificio), se emplean diferentes tipos de cable con características mecánicas específicas.

3.3.8.1. Fibra ADSS

La fibra *All-Dielectric Self-Supporting* (ADSS) es un tipo de cable óptico diseñado para ser autoportante, es decir, capaz de sostener su propio peso entre apoyos sin necesidad de elementos metálicos de mensajería. Este cable se caracteriza por una construcción totalmente dieléctrica, resistente a la intemperie y a campos electromagnéticos, lo que permite su despliegue en las mismas infraestructuras de la red eléctrica de media y alta tensión (postes o torres) sin riesgo de interferencias. La combinación de elementos de refuerzo no metálicos y cubiertas protectoras hace posible cubrir vanos de cientos de metros, por lo que la fibra ADSS se utiliza habitualmente en los tramos de alimentación o distribución de las redes FTTH. (Furukawa, 2016)



Figura 3.3.5: Componentes cable ADSS
Fuente: (Trashorras, 2013)

3.3.8.2. Códigos de color según estándares

Para facilitar la identificación durante la instalación y operación de la red, la codificación por colores de las fibras y de las cubiertas exteriores se encuentra normalizada. La norma TIA/EIA-598 establece una secuencia de doce colores para la identificación de las fibras individuales dentro de un cable o tubo holgado: azul, naranja, verde, marrón, pizarra (gris), blanco, rojo, negro, amarillo, violeta, rosa y aguamarina. A partir de la fibra número trece, la secuencia se repite añadiendo franjas o variaciones sobre los mismos colores. (Telecommunications Industry Association, 2018)

Colores para Fibras Individuales (según estándar TIA-598-C)			
Posición	Color	Posición	Color
1	Azul	13	Azul con línea negra
2	Naranja	14	Naranja con línea negra
3	Verde	15	Verde con línea negra
4	Marrón	16	Marrón con línea negra
5	Gris	17	Gris con línea negra
6	Blanco	18	Blanco con línea negra
7	Rojo	19	Rojo con línea negra
8	Negro	20	Negro con línea amarilla
9	Amarillo	21	Amarillo con línea negra
10	Violeta	22	Violeta con línea negra
11	Rosa	23	Rosa con línea negra
12	Turquesa	24	Turquesa con línea negra

Figura 3.3.6: Colores fibras individuales
Fuente: (Anchondo, 2019)

Igualmente se define colores de cubierta para indicar el tipo de fibra: las fibras monomodo se asocian típicamente a cubiertas amarillas, mientras que las fibras multimodo emplean cubiertas naranjas y las multimodo optimizadas para láser utilizan cubiertas de color aguamarina. Esta codificación permite reconocer rápidamente el tipo de fibra instalada y reduce errores durante la conectorización, el empalme y la operación de la red. (Anchondo, 2019)

Tipo de Fibra por color del Cable (según estándar TIA-598-C)
Fibra óptica Monomodo (OS1, OS2)
Fibra óptica Multimodo (OM1, OM2)
Fibra óptica Multimodo 50/125 μm 10 Gb optimizada para laser (OM3, OM4)
Color en desuso para fibra óptica Multimodo
Fibra óptica Monomodo de polarización mantenida

Figura 3.3.7: Colores por el tipo de fibra
Fuente: (Anchondo, 2019)

3.3.9. Componentes de una red PON (FTTH)

3.3.9.1. OLT

La Terminal de Línea Óptica (OLT, por sus siglas en inglés) es el equipo ubicado en la central del operador que actúa como punto de terminación de la red óptica pasiva. Su función principal es proporcionar y gestionar la comunicación con múltiples equipos de usuario a través de la red de distribución óptica. La OLT realiza la conversión entre señales eléctricas y ópticas y gestiona el registro de las ONT/ONU, la supervisión del estado del enlace y la asignación de recursos en sentido ascendente y descendente. (Cisco Systems, 2023)

3.3.9.2. ONT / ONU

La Unidad de Red Óptica (ONU) y la Terminal de Red Óptica (ONT) corresponden al equipo ubicado en el extremo del usuario. En la práctica, ambos términos se utilizan de forma casi intercambiable: ONT es el término empleado por la UIT-T, mientras que ONU se usa con más frecuencia en el ámbito IEEE y en redes EPON. Este dispositivo se encarga de terminar la fibra óptica en las instalaciones del abonado, recibir la señal óptica procedente de la OLT a través de la ODN y realizar la conversión a interfaces eléctricas o lógicas para la entrega de servicios. (Cisco Systems, 2023)

3.3.9.3. ODN

La Red de Distribución Óptica (ODN) comprende toda la infraestructura pasiva que enlaza la OLT con las ONT/ONU. Está formada por los cables de fibra óptica, empalmes, splitters ópticos pasivos, conectores, cajas de distribución y demás elementos que permiten transportar la señal óptica desde la central hasta el usuario final. (Cisco Systems, 2023)

3.3.9.4. ODF

El Marco de Distribución Óptica (ODF, Optical Distribution Frame) es un elemento físico de infraestructura utilizado para organizar, terminar y gestionar de manera ordenada los cables de fibra óptica en centrales, salas de equipos o cuartos de comunicaciones. En el ODF se concentran las entradas de los cables troncales y las

salidas hacia la ODN o hacia otros equipos, permitiendo realizar empalmes, emparejamientos mediante latiguillos (patch cords) y labores de operación y mantenimiento de forma estructurada. (Cisco Systems, 2023)

3.3.9.5. Conectores

Los conectores ópticos son elementos mecánicos que permiten unir y desconectar de forma rápida dos fibras ópticas, garantizando una alineación precisa del núcleo para minimizar pérdidas de señal. Su función es fundamental en redes de acceso como FTTH, ya que facilitan la instalación, mantenimiento y conexión de equipos como OLT, ONT y splitters. (Keiser, 2021)

Los conectores más utilizados en redes ópticas son los siguientes:

- **SC (Subscriber Connector):** Es uno de los conectores más comunes en despliegues GPON y FTTH. Utiliza un mecanismo tipo push-pull y se encuentra en versiones SC/UPC (azul) y SC/APC (verde), siendo esta última la preferida por su baja reflectancia.
- **LC (Lucent Connector):** De tamaño reducido, se emplea principalmente en equipos de alta densidad, puertos SFP y OLT de nueva generación. Ofrece un acoplamiento estable y un formato compacto.
- **ST (Straight Tip):** Conector de mecanismo tipo bayoneta, tradicionalmente utilizado en fibra multimodo. Ha sido desplazado por SC y LC, pero aún aparece en instalaciones antiguas.
- **FC (Ferrule Connector):** Conector roscado con una fijación muy resistente a vibraciones, por ello se utiliza en aplicaciones sometidas a movimiento. También se utiliza en los instrumentos de precisión (como los OTDR).

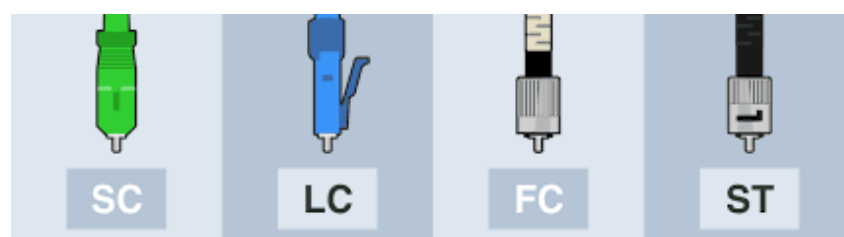


Figura 3.3.8: Conectores

Fuente: (Promax, 2019)

En cuanto a su desempeño, los conectores presentan pérdidas por inserción máximas de 0,5 dB. En aplicaciones PON suele utilizarse SC/APC debido a su excelente comportamiento frente a reflexiones, lo que garantiza una mayor estabilidad del enlace óptico. (International Telecommunication Union, 2025)

3.3.9.6. Splitters ópticos

Los splitters ópticos son componentes pasivos que realizan la división de la señal óptica en una red PON. Existen dos tipos: los balanceados y los desbalanceados. Son utilizados principalmente en redes ópticas FTTx/PON.

Balanceados: Son constituidos por una fibra de entrada y N fibras de salida, las cuales dividen la potencia de la señal óptica proporcionalmente, caracterizados como splitters equilibrados. (Lightera, 2022)

Parámetro	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64
Banda Óptica Pasante	PLC: 1260~1650 FBT: 1260~1360nm e 1480~1650nm					
Pérdida de Inserción Máxima (dB) *	3,7	7,1	10,5	13,7	17,1	20,5

Figura 3.3.9: Pérdidas máximas splitters balanceados
Fuente: (Lightera, 2022)

Desbalanceados: Son constituidos por una fibra de entrada y 2 fibras de salida, las cuales dividen la potencia de la señal óptica de forma asimétrica entre ellas. Es decir, la potencia de la señal óptica puede ser dividida en proporciones diferentes de acuerdo con la necesidad de cada aplicación. (Lightera, 2021)

Parámetros	01/99	02/98	05/95	10/90	15/85	20/80
Paso de Banda Óptica	1260~1360 e 1480~1650nm					
Pérdida Máxima de Inserción (dB)	21,6	18,7	14,6	11,0	9,6	7,9
	x	x	x	x	x	x
	0,30	0,4	0,5	0,7	1,0	1,4

Figura 3.3.10: Pérdidas máximas splitters desbalanceados 1
Fuente: (Lightera, 2021)

Parámetros	25/75	30/70	35/65	40/60	45/55
Paso de Banda Óptica	1260~1360 e 1480~1650nm				
Pérdida Máxima de Inserción (dB)	6,95	6	5,35	4,7	4,15
	x	x	x	x	x
	1,7	1,9	2,3	2,7	3,15

Figura 3.3.11: Pérdidas máximas splitters desbalanceados 2
Fuente: (Lightera, 2021)

Ambos dispositivos emplean un código de colores normalizado para identificar puertas y relaciones de división: en los divisores desbalanceados se usa el color azul para la rama de mayor potencia y naranja para la de menor potencia, además de distintos colores de cinta para indicar la relación (negro para 10/90, rojo para 30/70, violeta para

25/75, entre otros), mientras que en los balanceados las salidas se etiquetan con la secuencia azul, naranja, verde, marrón, gris, blanco, rojo y negro, repitiéndose en bloques en configuraciones de mayor número de salidas.(Lightera, 2021, 2022)

3.3.9.7. Empalme o fusión

Un empalme de fibra óptica es una unión permanente entre dos fibras que tiene como objetivo dar continuidad al enlace óptico, garantizando la menor pérdida posible de potencia y una reflexión mínima. A diferencia de los conectores, los empalmes no están pensados para ser desconectados de forma frecuente. Existen principalmente dos tipos: el empalme por fusión, en el que las fibras se alinean y se unen mediante calor, alcanzando pérdidas muy bajas; y el empalme mecánico, en el que las fibras se sujetan dentro de un dispositivo de alineación, con pérdidas ligeramente mayores pero con un proceso de instalación más sencillo y rápido. (Keiser, 2021)

Para los cálculos del diseño, la UIT-T recomienda un coeficiente de atenuación máximo de 0,15 dB por empalme. (International Telecommunication Union, 2025)

3.3.10. Clases de red en sistemas PON

En los sistemas PON, la UIT-T define distintas clases de red basadas en el presupuesto de pérdida óptica permitido entre la OLT y las ONT/ONU. Estas clases tienen en cuenta la atenuación de la fibra, las pérdidas por conectores, empalmes y splitters, y sirven como referencia de diseño para garantizar un nivel mínimo de potencia en el receptor.

Para el caso de las xPON se establecen las clases A, B y C, así como sus versiones mejoradas B+ y C+. Cada clase se caracteriza por un rango de pérdida total admitida entre la OLT y la ONT; por ejemplo, valores típicos citados en la literatura técnica sitúan la clase B+ en un rango aproximado de 13 a 28 dB, mientras que la clase C+ admite pérdidas mayores, del orden de 17 a 32 dB, permitiendo así mayores distancias o relaciones de división más elevadas en la red de distribución.(International Telecommunication Union, 2019)

3.3.11. Presupuesto óptico y atenuación máxima del enlace

En un sistema de fibra óptica, el presupuesto óptico representa la atenuación máxima que puede admitir el enlace entre el transmisor y el receptor sin perder la comunicación. Este presupuesto se obtiene a partir de las especificaciones de potencia de transmisión y sensibilidad del receptor:

$$P_p = P_{TX} - S_{RX} \quad (3.3.2)$$

donde P_{TX} es la potencia óptica mínima de transmisión (dBm) y S_{RX} es la sensibilidad mínima del receptor (dBm). (Banda Libre, 2022)

Para comprobar si un enlace cumple este presupuesto, es necesario estimar la atenuación total que introduce la red óptica. Para calcular la atenuación total del enlace se utiliza la expresión:

$$TA = n \cdot C + c \cdot J + L \cdot a + M \quad (3.3.3)$$

donde n es el número de conectores, C la pérdida de un conector (dB), c el número de empalmes, J la pérdida de un empalme (dB), L la longitud total del cable (km), a la atenuación de la fibra (dB/km) y M un margen adicional para tener en cuenta eventos impredecibles (curvaturas, envejecimiento, etc.), que suele tomarse en torno a 3 dB. (Cisco Systems, 2024)

En el caso de redes FTTH, a esta expresión se añaden las pérdidas debidas a los splitters ópticos, que pueden representarse mediante un término adicional A_{split} :

$$TA_{\text{FTTH}} = n \cdot C + c \cdot J + L \cdot a + A_{\text{split}} + M \quad (3.3.4)$$

La condición de diseño para que el enlace sea viable es que la atenuación total no supere el presupuesto óptico disponible:

$$TA_{\text{FTTH}} \leq P_p \quad (3.3.5)$$

De esta forma, el presupuesto óptico P_p define la atenuación máxima admisible del enlace, mientras que TA_{FTTH} recoge todas las pérdidas contribuidas por la fibra, conectores, empalmes, divisores ópticos y el margen de seguridad. (Cisco Systems, 2024)

Capítulo 4

Metodología

Este proyecto se centra en el diseño e ingeniería de una red de fibra óptica FTTH, como medio de comunicación para una Smart Grid en la zona de distribución de EBSA en Puerto Boyacá. Se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, enmarcado en un estudio de caso, en el cual la infraestructura eléctrica existente y los reconectores de media tensión se convierten en el escenario técnico sobre el cual se formula la solución de comunicaciones.

La metodología se organiza en tres fases, cada una de ellas alineada con un objetivo específico del proyecto:

- **Fase 1:** Analizar las condiciones técnicas y geográficas de los reconectores de línea en la zona de Puerto Boyacá, a partir de la georreferenciación de la infraestructura existente.
- **Fase 2:** Diseñar la red FTTH, calculando las atenuaciones para garantizar la correcta transmisión de datos.
- **Fase 3:** Seleccionar la tecnología PON y los componentes técnicos apropiados para su implementación en el diseño.

De manera transversal a estas fases, se realizó una revisión documental especializada sobre fibra óptica, redes FTTH, tecnologías PON y Smart Grids, así como de normas y recomendaciones técnicas, que sirvió como insumo para la definición de parámetros de diseño, valores de atenuación y criterios de selección tecnológica.

4.1. Fase 1: Análisis de condiciones técnicas y geográficas de los reconectores

En esta fase se aborda el análisis de las condiciones técnicas y geográficas de los reconectores de línea en la zona de Puerto Boyacá, a partir de la georreferenciación de la infraestructura existente. El propósito es construir una base sólida de información espacial y técnica que sirva de entrada para el diseño de la red FTTH.

Las actividades principales de esta fase son:

1. **Recopilación de información de la red de media tensión (MT):** A partir del plano general en formato DWG de la red de distribución de MT y del diagrama unifilar suministrados por la empresa, se realizó la identificación de los reconectores de línea presentes en la zona de estudio. Para cada reconector, se determinaron el circuito al que pertenece, el nombre del tramo, la subestación asociada y el nivel de tensión.
2. **Georreferenciación de subestaciones, tramos y reconectores:** Los planos suministrados fueron configurados con la geoubicación de AUTOCAD, con el fin de obtener la ubicación geográfica de subestaciones, tramos de línea y reconectores. Sobre esta base se delimitaron los tramos de interés y se agruparon los reconectores según la subestación a la que se encuentran asociados.
3. **Medición de distancias subestación-reconector:** Para cada subestación se generaron archivos DWG independientes, sobre los cuales se trazaron polilíneas desde la subestación hasta cada reconector, empleando herramientas de medición para obtener la longitud de cada recorrido. Estas distancias corresponden al trayecto físico subestación-reconector y permiten estimar la longitud de fibra necesaria para la interconexión.
4. **Levantamiento de distancias entre postes y caracterización de vanos:** Los archivos DWG se exportaron a KMZ para identificar la ubicación de los postes y la distancia entre vanos consecutivos. Con esta información se elaboró una base de datos donde se registran, para cada poste, sus coordenadas, la distancia acumulada y la distancia entre postes. A partir de las distancias reales entre postes se definieron los vanos y se establecieron los spans de diseño del cable ADSS, siguiendo rangos de longitud y recomendaciones técnicas de la empresa.

Como producto de esta fase se obtiene una caracterización detallada de los reconectores y de la infraestructura de soporte (subestaciones, circuitos, tramos y postes), así como las distancias subestación-reconector y las distancias entre postes, que constituyen la base cuantitativa para el diseño óptico de la red FTTH.

4.2. Fase 2: Diseño de la red FTTH y cálculo de atenuaciones

La segunda fase corresponde al diseño de la red FTTH y al cálculo de las atenuaciones para garantizar la correcta transmisión de datos. A partir de la información geográfica y estructural obtenida en la Fase 1, se definen las rutas de fibra óptica, la ubicación de elementos pasivos y se calcula el presupuesto óptico de cada enlace.

Las actividades desarrolladas en esta fase incluyen:

1. **Definición de la arquitectura de la red y rutas de fibra:** Con base en la ubicación de subestaciones y reconectores, y en las distancias previamente calculadas, se definieron las rutas de fibra óptica entre la cabecera (subestación) y

cada reconectador. Mediante el uso de AutoCAD se elaboraron los planos de distribución de la red, representando las trayectorias del cable de fibra sobre la infraestructura de MT, la ubicación de splitters, cajas de empalme, cajas terminales ópticas (CTO) y puntos de reserva.

2. **Estructuración de vanos:** A partir de la base de datos de distancias entre postes, se establecieron los spans de diseño del cable ADSS y se definieron los vanos.
3. **Dimensionamiento de fusiones, conectores y splitters:** Para cada reconectador se elaboró una tabla de dimensionamiento de elementos ópticos pasivos, en la cual se contabilizan las fusiones en la fibra central, en la fibra de trayecto y en la fibra asociada a los splitters; la cantidad de conectores requeridos; y el número y tipo de splitters involucrados (balanceados y desbalanceados según las relaciones de división necesarias).
4. **Cálculo del presupuesto óptico y verificación de márgenes:** Integrando las longitudes de cada enlace, las atenuaciones por kilómetro de la fibra, las pérdidas por fusiones, conectores y splitters, así como un margen de seguridad, se calculó el presupuesto óptico individual de cada tramo. Para facilitar este proceso, se desarrolló una calculadora en HTML que implementa las fórmulas descritas en el marco teórico y permite obtener de forma automática la pérdida total y el margen disponible. Los resultados del cálculo se comparan con el presupuesto óptico disponible para la tecnología de la familia xPON de referencia, verificando que los márgenes sean positivos y por tanto, que los enlaces diseñados sean viables.

Como resultado de esta fase se obtiene el diseño detallado de la red FTTH, con sus recorridos, elementos pasivos dimensionados y el presupuesto óptico verificado para cada enlace entre la subestación y los reconectores.

4.3. Fase 3: Selección de la tecnología PON y componentes técnicos

La tercera fase aborda la selección de la tecnología de la familia xPON y de los componentes técnicos apropiados para su implementación en el diseño, a partir de los requerimientos funcionales y de los resultados del presupuesto óptico obtenidos en la Fase 2.

Las actividades principales de esta fase son:

1. **Evaluación de tecnologías xPON:** Con base en la revisión documental y en las necesidades de la red de distribución de EBSA en la zona de Puerto Boyacá, se evaluaron diferentes tecnologías de acceso óptico de la familia xPON. La evaluación consideró criterios de capacidad máxima de transmisión, alcance, clases ópticas disponibles, compatibilidad con los presupuestos ópticos calculados y disponibilidad comercial de equipos.
2. **Selección de la tecnología de referencia:** A partir de la evaluación anterior y de los resultados del cálculo del presupuesto óptico, se seleccionó la tecnología que ofrece un compromiso adecuado entre capacidad, alcance, margen óptico disponible

y madurez tecnológica. Se consideró, además, la posibilidad de utilizar tecnologías de mayor velocidad en puertos específicos de la OLT cuando las condiciones de diseño o la proyección de crecimiento lo requieran.

3. **Selección de equipos OLT y ONT:** Se realizó una comparación de diferentes modelos de OLT disponibles en el mercado, priorizando soluciones compactas adecuadas para su instalación en el rack de comunicaciones de la subestación y que dispongan de puertos capaces de operar cualquier tecnología xPON mediante módulos SFP intercambiables. De manera similar, se definieron perfiles de ONT para instalación en los reconectores, garantizando la compatibilidad con la tecnología seleccionada y con las interfaces requeridas por los sistemas de control.
4. **Definición preliminar de materiales y arquitectura de la solución:** Finalmente, se consolidó una propuesta de arquitectura de red que integra la tecnología xPON seleccionada, los equipos OLT y ONT/ONU, los cables de fibra óptica, herrajes, cajas ópticas y demás componentes pasivos. Esta definición se plasma en una ingeniería de detalle que sirve de base para la lista de materiales.

De este modo, la Fase 3 cierra el ciclo metodológico al traducir el diseño óptico en una solución tecnológica concreta, coherente con las necesidades operativas de EBSA y con la visión de transición hacia una smart Grids soportada en una infraestructura de comunicaciones FTTH.

4.4. Caso de estudio: zona de Puerto Boyacá

El estudio de caso se desarrolla sobre la zona de distribución de la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA) en el municipio de Puerto Boyacá, donde se cuenta con una red de media tensión que integra varias subestaciones y reconectores. Esta área constituye el escenario real sobre el cual se aplica la metodología descrita en las fases anteriores.

En primer lugar, se caracteriza la infraestructura eléctrica existente, identificando las subestaciones involucradas, los circuitos de distribución asociados y la localización de los reconectores que requieren un canal de comunicación para su integración a la Smart Grid. A partir de la información suministrada por EBSA (planos), se delimita el alcance geográfico del proyecto y se establecen los tramos de interés para el diseño de la red FTTH.

Posteriormente, se detallan las rutas propuestas de tendido de fibra óptica entre las subestaciones y los reconectores, considerando las estructuras de apoyo existentes. De este modo se definen los tramos principales de fibra ADSS, los puntos de derivación hacia los reconectores, así como la ubicación preliminar de elementos como splitters, cajas de empalme y cajas terminales ópticas (CTO).

Finalmente, se integran estos elementos en los planos y esquemas unifilares elaborados en AutoCAD, donde se representan la numeración de tramos, la identificación de postes, la ubicación de empalmes y la asignación de hilos de fibra para cada reconnector.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el diseño e ingeniería de la red FTTH propuesta para la zona Puerto Boyacá en el sistema de distribución de la EBSA. Los resultados se organizan en cinco ejes principales: análisis del trayecto, diseño óptico, planos de la red, arquitectura de la solución y cuantificación de materiales.

A continuación, se presentan los resultados asociados a cada fase.

5.1. Resultados Fase 1:

En esta fase, se recopilan y presentan los resultados del análisis de la información de la red MT, la identificación de reconectores, la asociación de estos a las subestaciones y la determinación de las distancias físicas necesarias para el diseño de la red FTTH. Estos resultados responden al objetivo de caracterizar las condiciones técnicas y geográficas de los reconectores de línea en la zona de estudio.

5.1.1. Resultados del análisis del trayecto

5.1.1.1. Caracterización de reconectores y tramos

A partir del plano general DWG de la red de distribución de MT suministrado por la empresa, se realizó la identificación de los reconectores de línea presentes en la zona (Figura 5.1.1), con el apoyo del diagrama unifilar (Figura 5.1.2), se determinó el circuito y el nombre del tramo al que pertenece cada dispositivo y la subestación al cual se encuentra asociado.

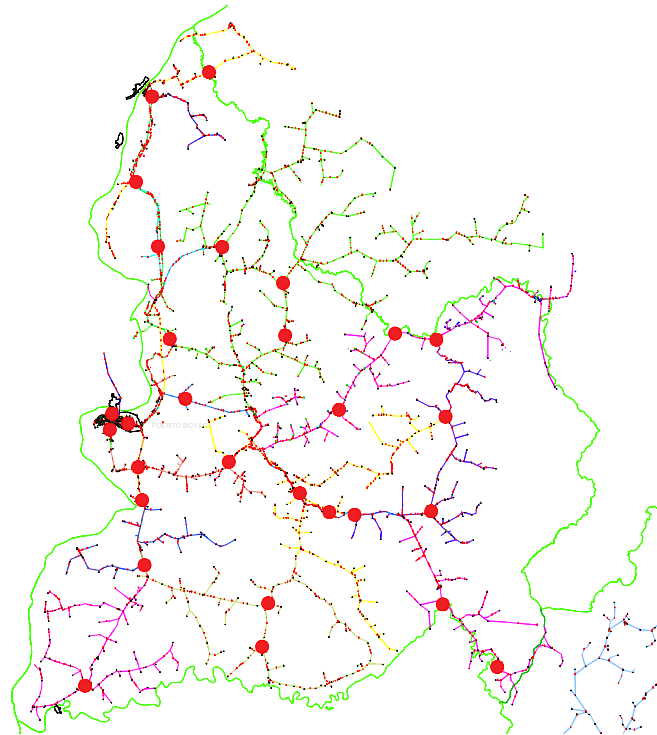


Figura 5.1.1: Red media tensión Pto. Boyacá
Fuente: EBSA

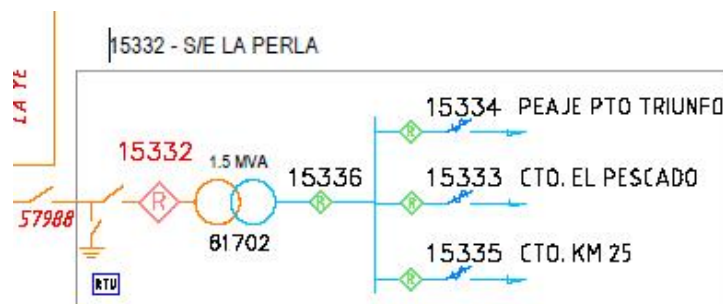


Figura 5.1.2: Diagrama unifilar líneas y subestaciones
Fuente: EBSA

Como resultado de este procedimiento, se obtuvo un listado consolidado de 42 reconectores. Para cada reconector, se registró el circuito, un identificador asignado (ID), el código del reconector, el nombre del tramo donde se encuentra y el nivel de tensión.

En la Tabla 5.1.1 se presenta la clasificación general de los reconectores y tramos considerados en el diseño.

Tabla 5.1.1: Clasificación de reconectores y tramos de la zona Puerto Boyacá.

No. tramo	No. Reconector	Circuito	ID	Reconector	Tramo	Nivel de tensión (kV)
1	1	15302	R-01	15302-20	Pueblo nuevo	13,2
1	2	15302	R-02	15302-16	Pueblo nuevo	13,2
1	3	15302	R-03	15302-5	Pueblo nuevo	13,2
1	4	15340	R-04	15340-5	La paz	13,2
1	5	15340	R-05	15340-16	La paz	13,2
1	6	15340	R-06	15340-15	La paz	13,2
1	7	15303	R-07	15303-5	Centro	13,2
1	8	15303	R-08	15303-15	Centro	13,2
1	9	15303	R-09	15303-20	Centro	13,2
1	10	15304	R-10	15304-5	Dos y medio	13,2
1	11	15344	R-11	15344-20	Peaje pto triunfo	13,2
1	12	15344	R-12	15344-5	Peaje pto triunfo	13,2
1	13	15305	R-13	15305-15	Cto Pto la perla	34,5
1	14	15334	R-14	15334-5	Peaje pto triunfo	34,5
1	15	15331	R-15	15331-15	Cto Velázquez rural	34,5
2	16	15333	R-16	15333-17	Cto. El pescado	13,2
2	17	15333	R-17	15333-20	Cto. El pescado	13,2
2	18	15335	R-18	15335-5	Cto. Km 25	13,2
2	19	15335	R-19	15335-15	Cto. Km 25	13,2
3	20	15313	R-20	15313-20	Pto. Serviez	13,2
3	21	15313	R-21	15313-5	Pto. Serviez	13,2
3	22	15314	R-22	15314-5	Zambito	13,2
4	23	15308	R-23	15308-23	Palagua	13,2
4	24	15346	R-24	15346-16	Cto pto serviez rural	34,5
4	25	15346	R-25	15346-15	Cto pto serviez rural	34,5
4	26	15260	R-26	15260-20	Rosa verde	13,2
5	27	15404	R-27	15404-15	Puerto romero	13,2
5	28	15404	R-28	15404-7	Puerto romero	13,2
5	29	15405	R-29	15405-6	Bombay	13,2
5	30	15405	R-30	15405-7	Bombay	13,2
6	31	15307	R-31	15307-20	El marfil	13,2
6	32	15308	R-32	15308-18	Palagua	13,2
6	33	15308	R-33	15308-5	Palagua	13,2
6	34	15308	R-34	15308-6	Palagua	13,2
6	35	15315	R-35	15315-20	Pto pinzón	13,2
6	36	15315	R-36	15315-5	Pto pinzón	13,2
6	37	15315	R-37	15315-18	Pto pinzón	13,2
6	38	15307	R-38	15307-21	El marfil	13,2
6	39	15307	R-39	15307-6	El marfil	13,2
6	40	15307	R-40	15307-7	El marfil	13,2
6	41	15331	R-41	15401-5	S/E Velázquez	13,2
6	42	15331	R-42	15411-15	S/E Velázquez	34,5

Igualmente, se enumeraron los tramos de la red con el fin de facilitar su identificación y referencia en los planos y unifilares. Esta asignación de numeración se presenta en la Tabla 5.1.2.

Tabla 5.1.2: Enumeración de tramos.

No. TRAMO	TRAMO	ID	Circuito	No. Tramo para plano
1	Pueblo nuevo	R-01	15302	03
	Pueblo nuevo	R-02	15302	
	Pueblo nuevo	R-03	15302	
	La paz	R-04	15340	
	La paz	R-05	15340	
	La paz	R-06	15340	
	Centro	R-07	15303	01
	Centro	R-08	15303	
	Centro	R-09	15303	
	Dos y medio	R-10	15344	01
	Dos y medio	R-11	15344	
	Peaje pto triunfo	R-12	15334	02
	Cto Pto la perla	R-13	15305	
	Peaje pto triunfo	R-14	15334	
	Cto Velazquez rural	R-15	15331	
2	Cto. El pescado	R-16	15333	01
	Cto. El pescado	R-17	15333	02
	Cto. Km 25	R-18	15335	
	Cto. Km 25	R-19	15335	
3	Pto. Serviez	R-20	15313	01
	Pto. Serviez	R-21	15313	02
	Zambito	R-22	15314	
4	Palagua	R-23	15308	01
	Cto pto serviez rural	R-24	15346	
	Cto pto serviez rural	R-25	15346	
	Rosa verde	R-26	15620	
5	Puerto romero	R-27	15404	01
	Puerto romero	R-28	15404	
	Bombay	R-29	15405	02
	Bombay	R-30	15405	
6	El marfil	R-31	15307	01
	Palagua	R-32	15308	03
	Palagua	R-33	15308	
	Palagua	R-34	15308	
	Pto pinzon	R-35	15315	02
	Pto pinzon	R-36	15315	
	Pto pinzon	R-37	15315	
	El marfil	R-38	15307	01
	El marfil	R-39	15307	
	El marfil	R-40	15307	
	S/E Velazquez	R-41	15331	
	S/E Velazquez	R-42	15331	

Esta organización permitió tener una visión estructurada de la red de media tensión y constituyó el inicio para la definición de las rutas de fibra óptica.

5.1.1.2. Distancias subestación-reconector

Con la identificación de reconectores, se agruparon según la subestación a la que están asociados. Para facilitar el análisis, se segmentaron en seis subestaciones: S/E Pto. Boyacá, S/E La perla, S/E Velazquez, S/E Pto. Serviez, S/E Okal y S/E Castillo, generando un archivo *DWG* independiente para cada uno. Esta separación permitió

trabajar de forma más ordenada en el trazado de la red.

Sobre cada archivo se trazaron polilíneas desde la subestación hasta cada reconector, empleando la herramienta SULIPO en AutoCAD para medir la longitud de cada recorrido. En esta etapa, las distancias corresponden al trayecto físico subestación–reconector, sin distinguir aún el tipo de cable empleado, con el objetivo de contar con la distancia real de tendido necesaria para el diseño óptico.

En la Tabla 5.1.3 se presentan, a modo de ejemplo, las distancias subestación–reconector obtenidas para la S/E Pto. Boyacá. Las tablas completas de distancias para las seis subestaciones se incluyen en el Anexo A, donde se detallan los valores individuales para cada tramo de la red.

Tabla 5.1.3: Distancias subestación–reconector para la S/E Pto. Boyacá.

ID	Circuito	Reconector	Tramo	Nivel de tensión (kV)	Distancia a subestación (m)	Distancia a subestación (km)
R-01	15302	15302-20	Pueblo nuevo	13,2	2746	2,746
R-02	15302	15302-16	Pueblo nuevo	13,2	2893	2,893
R-03	15302	15302-5	Pueblo nuevo	13,2	3049	3,049
R-04	15340	15340-5	La paz	13,2	571	0,571
R-05	15340	15340-16	La paz	13,2	918	0,918
R-06	15340	15340-15	La paz	13,2	1131	1,131
R-07	15303	15303-5	Centro	13,2	2246	2,246
R-08	15303	15303-15	Centro	13,2	2340	2,340
R-09	15303	15303-20	Centro	13,2	3262	3,262
R-10	15344	15344-5	Dos y medio	13,2	4112	4,112
R-11	15334	15334-20	Peaje pto triunfo	13,2	6391	6,391
R-12	15305	15305-15	Cto Pto la perla	34,5	6855	6,855
R-13	15334	15334-5	Peaje pto triunfo	34,5	12308	12,308
R-14	15331	15331-15	Cto Velázquez rural	34,5	5892	5,892
R-15	15344	15344-6	Dos y medio	13,2	926	0,926

Estas tablas resumen los resultados de estas mediciones, indicando para cada reconector la subestación asociada, el nivel de tensión y la distancia entre la subestación y el dispositivo, expresada en metros y kilómetros. En el anexo A estas tablas se encuentran en la hoja llamada Dist. subestación-Reco.

Igualmente está información constituye la base cuantitativa para el cálculo de longitudes de fibra, reservas y presupuestos ópticos.

5.1.1.3. Distancias entre postes

Para detallar aún más el diseño, los archivos *DWG* se exportaron en Google Earth Pro, obteniendo así la ubicación geográfica de los postes y la distancia entre vanos consecutivos. Con esta información se elaboró una base de datos donde se registran, para cada poste, la distancia acumulada y la distancia entre postes.

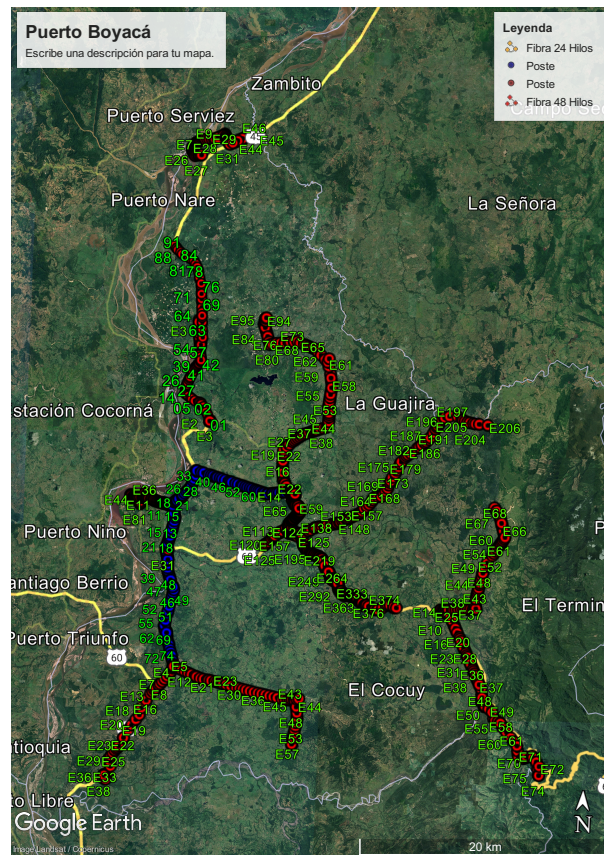


Figura 5.1.3: Tramos Puerto Boyacá
Fuente: Autora

En la Tabla 5.1.4 se muestra un fragmento de las distancias entre postes obtenidas para una fibra ADSS de 24 hilos de la S/E Pto. Boyacá. La base de datos completa de distancias entre postes para todos los circuitos analizados se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.1.4: Ejemplo de distancias medidas entre postes para fibra ADSS 24 H de la S/E Pto. Boyacá.

Poste	Distancia acumulada (km)	Distancia entre postes (m)
E1	0.031	30.61
E2	0.098	67.58
E3	0.166	68.07
E4	0.240	73.28
E5	0.259	19.32
E6	0.326	66.86
E7	0.366	40.04
E8	0.444	78.74
E9	0.524	79.03
E10	0.599	75.55
E11	0.680	80.56
E12	0.768	87.96

5.1.1.4. Definición de spans y longitud para presupuesto óptico

A partir de las distancias reales entre postes obtenidas para cada circuito, se estableció el span de diseño del cable ADSS. Para ello, se definieron rangos de longitud de vano y un span asociado, de acuerdo con las recomendaciones técnicas de la empresa (Tabla 5.1.5). Con base en la distancia máxima registrada en cada tramo, se asignó un span de 450, 600, 800, 1000 o 1200 m.

Estos valores se sistematizaron en el Anexo B, el cual contiene la tabla detallada de la distancia entre postes, span asignado y los datos utilizados posteriormente para el cálculo de herrajes y amortiguadores.

Tabla 5.1.5: Rangos de longitud de vano y span de diseño asignado.

Rango de longitud del vano [m]	Span de diseño asignado [m]
0 – 450	450
451 – 600	600
601 – 800	800
801 – 1000	1000
1001 – 1200	1200

La Tabla 5.1.6 consolida estos spans de diseño y la longitud total de fibra por subestación. Estas longitudes corresponden a valores acumulados del tendido y por lo tanto no representan la distancia efectiva empleada en el presupuesto óptico.

Tabla 5.1.6: Resumen de spans y longitud total de fibra por subestación.

Subestación	Tipo	Dist. máx. (m)	Span (m)	Long. fibra (km)
SE PTO BOYACÁ – LA PERLA – 01	ADSS 24 H	134,2	450	0,4985
SE PTO BOYACÁ – VELAZQUEZ – 02	ADSS 24 H	87,96	450	0,7676
SE PTO BOYACÁ PUEBLO 03	ADSS 24 H	101,29	450	5,0187
SE LA PERLA 15333-01	ADSS 24 H	465,19	600	14,1562
SE LA PERLA 15335-02	ADSS 24 H	715,33	800	11,236
SE CASTILLO SPAN	ADSS 24 H	362,59	450	2,527
SE OKAL 15405-02	ADSS 24 H	700,43	800	12,151
SE OKAL 15404-01	ADSS 24 H	577,37	600	16,0583
SE PTO SERVIEZ 15314-02	ADSS 24 H	206,41	450	6,0665
SE PTO SERVIEZ 15313-01	ADSS 24 H	120,5	450	1,5826
SE VELAZQUEZ 1315-02	ADSS 24 H	688,48	800	20,4996
SE VELAZQUEZ 15307-01	ADSS 24 H	333,52	450	2,6511
SE VELAZQUEZ 15308-03	ADSS 24 H	601,05	800	20,2357

Como estas longitudes no permiten calcular el presupuesto óptico, se construyó un proceso adicional en el que, para cada tramo, se determinó la distancia física efectiva entre la subestación y cada reconector. Este cálculo considera:

- La longitud acumulada de cada vano
- El número de empalmes (agregando 500 m de reserva por empalme),
- El número de splitters (agregando 3 m de reserva por cada uno).

Un ejemplo de estos cálculos se puede evidenciar en la Tabla 5.1.7. Toda esta información procesada se encuentra en el Anexo A, y constituye la base utilizada en el

cálculo del presupuesto óptico de cada enlace y se encuentran en la hoja denominada Dist. total.

Tabla 5.1.7: Resumen de distancias y reservas de fibra ADSS por reconector S/E Pto. Boyacá.

ID	Circuito	Reconector	Tramo	Fibra ADSS 48 H	Fibra ADSS 24 H	Total Fibra ADSS (m)	N° Empalme	Distancia con reservas (m)	N° de Splitter	Distancia con reservas splitter (m)	Distancia Total (km)
R-01	15302	15302-20	Pueblo nuevo	0	2745,2	2745,2	1	3245,2	6	3263,2	3,2632
R-02	15302	15302-16	Pueblo nuevo	0	2692,7	2692,7	1	3192,7	6	3210,7	3,2107
R-03	15302	15302-5	Pueblo nuevo	0	3048,5	3048,5	1	3548,5	6	3566,5	3,5665
R-04	15340	15340-5	La paz	0	571	571	0	571	1	574	0,574
R-05	15340	15340-16	La paz	0	917,1	917,1	0	917,1	2	923,1	0,9231
R-06	15340	15340-15	La paz	0	1116,52	1116,52	0	1116,52	3	1125,52	1,12552
R-07	15303	15303-5	Centro	0	2231,2	2231,2	1	2731,2	5	2746,2	2,7462
R-08	15303	15303-15	Centro	0	2325,5	2325,5	1	2825,5	5	2840,5	2,8405
R-09	15303	15303-20	Centro	0	3261,2	3261,2	1	3761,2	7	3782,2	3,7822
R-10	15344	15344-5	Dos y medio	3612,9	498,5	4111,4	1	4611,4	2	4617,4	4,6174
R-11	15334	15334-20	Peaje pto triunfo	6390,4	0	6390,4	1	6890,4	2	6896,4	6,8964
R-12	15305	15305-15	Cto Pto la perla	6854,3	0	6854,3	1	7354,3	3	7363,3	7,3633
R-13	15334	15334-5	Peaje pto triunfo	12307,3	0	12307,3	3	13807,3	4	13819,3	13,8193
R-14	15331	15331-15	Cto velazquez rural	5891,8	0	5891,8	1	6391,8	2	6397,8	6,3978
R-15	15344	15344-6	Dos y medio	157,8	767,6	925,4	0	925,4	2	931,4	0,9314

5.1.1.5. Selección de herrajes de retención y amortiguadores

Una vez definidos los spans de diseño para cada tramo, se procedió a determinar los herrajes y amortiguadores requeridos en el tendido de la red. La asignación de estos elementos se realizó a partir de la longitud de cada vano y del span asociado, siguiendo las directrices de la empresa.

En primer lugar, para cada vano se seleccionó el herraje de retención correspondiente al span de diseño. Debido a que el proyecto emplea exclusivamente cable ADSS, todos los apoyos requieren herrajes de retención, instalados en ambos extremos del vano. Así, el número total de herrajes en un circuito depende directamente de la cantidad de vanos que lo conforman.

En paralelo, la cantidad de amortiguadores por vano se determinó a partir de los rangos de longitud establecidos por la empresa (Tabla 5.1.8). Cada vano recibe un número de amortiguadores acorde con su longitud, con el fin de controlar las vibraciones eólicas y asegurar la estabilidad mecánica del tendido.

Tabla 5.1.8: Rangos de longitud de vano y cantidad de amortiguadores por vano.

Rango de longitud del vano [m]	Cantidad de amortiguadores por vano
0 – 250	2
251 – 500	4
501 – 700	6
701 – 1000	8
1001 – 1250	10
≥ 1251	12

Como apoyo al dimensionamiento de herrajes y amortiguadores, en la base de datos (Anexo B) se construyeron tablas dinámicas por tramo. En ellas se agrupan los vanos según el tipo de herraje y se obtienen el conteo de herrajes de retención, la suma de amortiguadores y el total de herrajes requeridos. A modo de ejemplo, en la Tabla 5.1.9 se presenta la tabla dinámica correspondiente al tramo SE LA PERLA SPAN 24 H.

Tabla 5.1.9: Ejemplo de tabla dinámica para el conteo de herrajes de retención y amortiguadores en el tramo SE LA PERLA SPAN 24 H.

Tipo de herraje [m]	Conteo de herrajes	Suma de amortiguadores	Total de herrajes
450	57	174	114
600	2	8	4
Total general	59	182	118

La aplicación de estos criterios permitió obtener, para cada subestación, el número total de herrajes de retención y amortiguadores necesarios para el tendido del cable ADSS. Estas tablas dinámicas se encuentran en el Anexo B.

5.2. Resultados Fase 2:

En esta fase se presentan los resultados asociados al diseño de la red FTTH y al cálculo de atenuaciones, con el fin de garantizar la correcta transmisión de datos. Incluye los planos de la red, las convenciones utilizadas, así como el dimensionamiento de los elementos ópticos pasivos y la verificación de la viabilidad de los enlaces mediante el cálculo del presupuesto óptico.

5.2.1. Planos de distribución

Con base en las rutas definidas y en el análisis de spans, se elaboraron los planos de distribución de la red en AutoCAD. En ellos se representan:

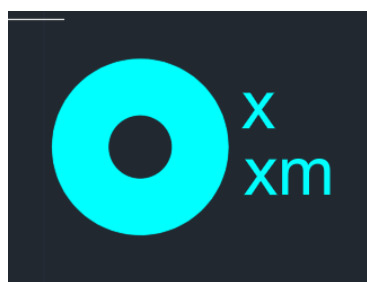
- Las trayectorias del cable de fibra óptica sobre la infraestructura de media tensión.
- La ubicación de las subestaciones, reconectores y puntos de reserva.
- La ubicación de splitters, CTO y demás elementos.

5.2.1.1. Explicación de Convenciones

Para el desarrollo de los planos se definieron las siguientes convenciones gráficas y de rotulado.

Infraestructura EBSA

Poste En el caso de los postes se manejan dos tipos, como se observa en la Figura 5.2.1. Cada poste se identifica mediante un número consecutivo y el valor de su altura expresada en metros.



(a) Poste 1



(b) Poste 2

Figura 5.2.1: Postes.
Fuente: Autora.

Reconector El reconector se representa mediante un símbolo que incluye, en la parte superior, el código asignado por la EBSA y, en la parte inferior, el identificador (ID) del equipo.



Figura 5.2.2: Reconector
Fuente: Autora.

Subestación La subestación se identifica mediante un símbolo que incorpora el nombre de la subestación correspondiente.



Figura 5.2.3: Subestación
Fuente: Autora.

Empalmes y CTO

Splitters Los splitters se identifican en la parte superior por el número del splitter y el tramo al que pertenecen. En la parte inferior se consigna la sigla EBSA, seguida nuevamente del número de splitter y del tramo correspondiente.



Figura 5.2.4: Splitters
Fuente: Autora.

Empalme Los empalmes se identifican en la parte superior por el número de empalme y el tramo al que pertenecen. En la parte inferior se indica EBSA, seguida del número de empalme, el tramo correspondiente y el número de hilos de la fibra sobre la cual se realiza el empalme.



Figura 5.2.5: Empalme
Fuente: Autora.

Empalme con splitter El empalme con splitter corresponde al elemento que integra, en un mismo punto, la función de empalme y la de división mediante splitters, combinando la identificación de ambos elementos.

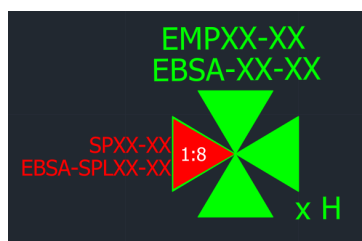


Figura 5.2.6: Empalme con splitter
Fuente: Autora.

Caja terminal óptica de poste (CTO) La caja terminal óptica de poste (CTO) corresponde al punto donde se ubica el splitter final 10/90. Su rotulado incluye, en la parte superior, el número de CTO seguido del tramo; en la parte central, la sigla EBSA y el circuito al que pertenece el reconectador; y en la parte inferior, el número de splitter seguido del tramo.



Figura 5.2.7: Caja terminal óptica de poste (CTO)
Fuente: Autora.

Caja nap La caja NAP se identifica por la numeración asignada al tramo y contiene los splitters que se disponen en cascada dentro del ODN.



Figura 5.2.8: Caja NAP
Fuente: Autora.

Convenciones de tendido de fibra

Tendido aéreo Para el tendido aéreo, la marquilla de la fibra se estructura de la siguiente forma: en la parte superior se consigna EBSA, seguida de FO, el número de hilos, el nombre del tramo y el número de tramo. En la parte inferior se indican los hilos del cable y los hilos libres del tramo, la longitud del tramo y la sigla ADSS, que corresponde al tipo de fibra.

Esta marquilla se aplica a los dos tipos de fibra utilizados en el proyecto, únicamente varía el color según el tipo de fibra.

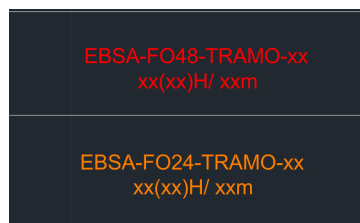


Figura 5.2.9: Marquilla de fibra óptica
Fuente: Autora.

En la Figura 5.2.10 se muestra un ejemplo del plano general de la subestación de Puerto Boyacá.

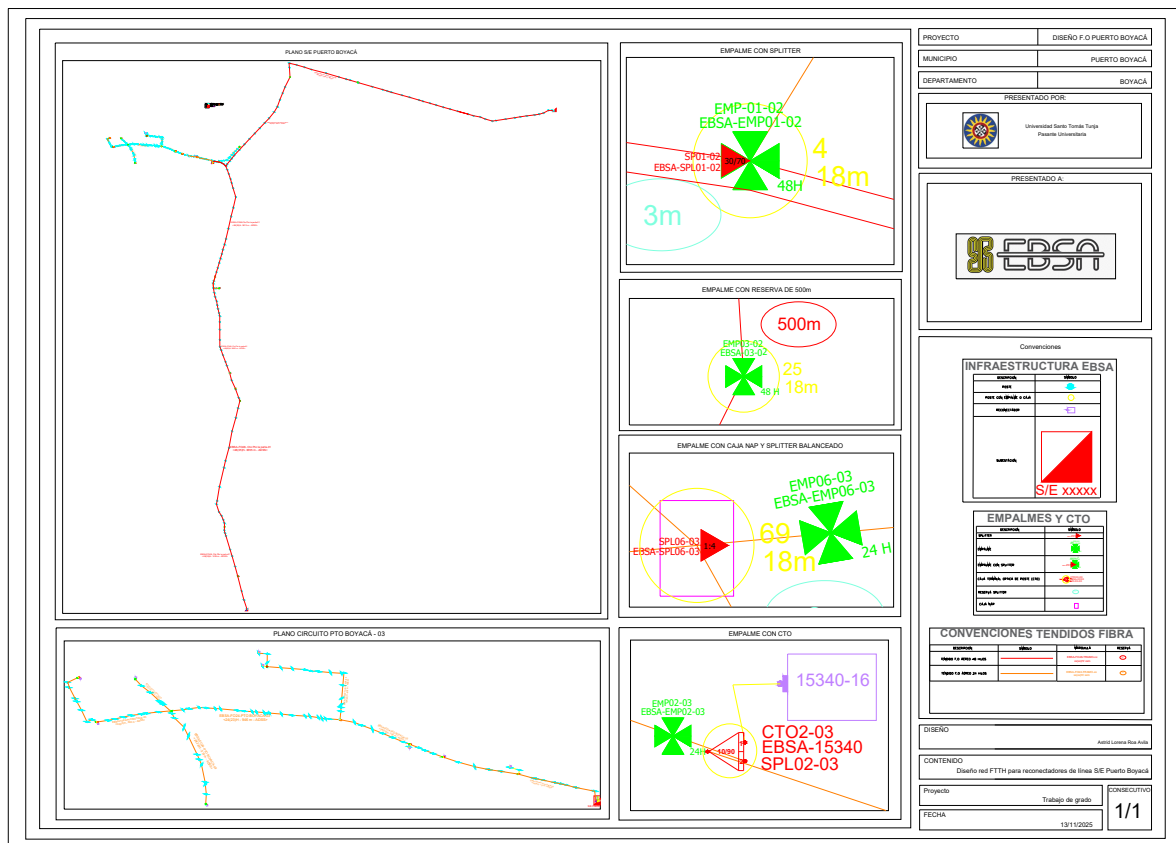


Figura 5.2.10: Plano general de la red FTTH propuesta para la subestación Puerto Boyacá.

Fuente: Autora

5.2.2. Planos unifilares

Adicionalmente, se elaboraron planos unifilares que representan la arquitectura de la red de comunicaciones. En estos esquemas se relacionan la ubicación y el uso de los hilos por cada tramo a utilizar.

5.2.2.1. Explicación de Convenciones

Para el desarrollo de los unifilares se definieron las siguientes convenciones gráficas y de rotulado.

Marquillas

Tendido aéreo Para el tendido aéreo, la marquilla de la fibra se estructura de la siguiente forma: en la parte superior se consigna EBSA, seguida de FO, el número de hilos, el nombre del tramo y el número de tramo. En la parte inferior se indican los hilos del cable y los hilos libres del tramo, la longitud del tramo y la sigla ADSS, que corresponde al tipo de fibra.

Esta marquilla se aplica a los dos tipos de fibra utilizados en el proyecto, únicamente varía el color según el tipo de fibra.

MARQUILLA
EBSA-FO48-TRAMO-xx <xx(xx)H- xx m - ADSS>
EBSA-FO24-TRAMO-xx <xx(xx)H - xx m - ADSS>

Figura 5.2.11: Marquilla de fibra óptica unifilar
Fuente: Autora.

Cables Para identificar los cables por los hilos, se dibujo con sus respectivos colores, como se muestra en la Figura 5.2.12

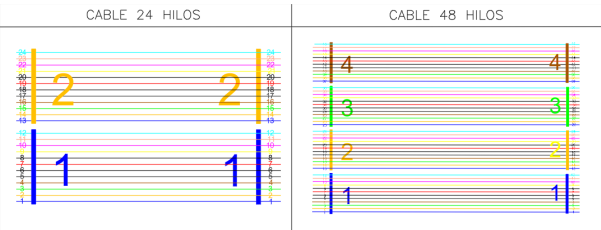


Figura 5.2.12: Cables por hilo unifilar
Fuente: Autora.

Splitters Los splitters se identifican por el número del splitter y el tramo al que pertenecen. Igualmente, hay tres tipos:

- Desbalanceado hacia el lado izquierdo
- Desbalanceado al lado derecho
- Splitter balanceado 1:4

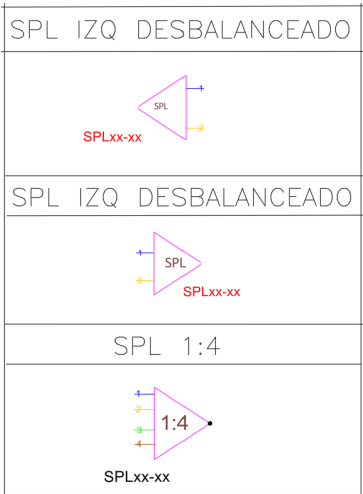


Figura 5.2.13: Tipos de splitters unifilar
Fuente: Autora.

Central Este bloque sirve para identificar la central de donde salen las fibras ópticas, aquí es donde se ubica el OLT.



Figura 5.2.14: Tipos de splitters unifilar

Fuente: Autora.

Empalme Los empalmes se identifican en la parte superior del rectángulo por el número de empalme y el tramo al que pertenecen. En la parte inferior se indica EBSA, seguido del número de empalme y del tramo correspondiente.

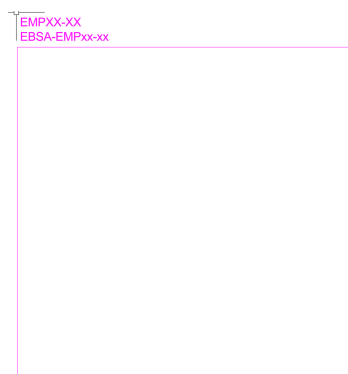


Figura 5.2.15: Tipos de splitters unifilar

Fuente: Autora.

Caja terminal óptica de poste (CTO) La caja terminal óptica de poste (CTO) corresponde al punto donde se ubica el splitter final 10/90. Su rotulado incluye, en la parte superior, el número de CTO seguido del tramo; en la parte central, la sigla EBSA y el circuito al que pertenece el reconector.



Figura 5.2.16: Caja terminal óptica de poste (CTO)

Fuente: Autora.

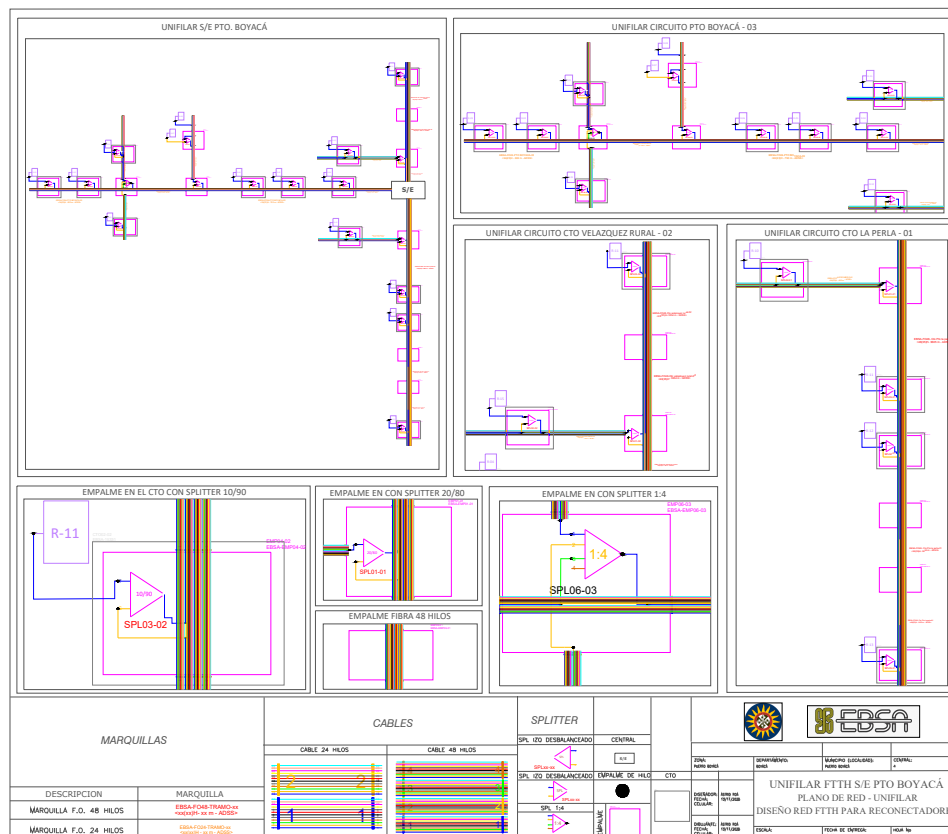


Figura 5.2.17: Plano unifilar de la red FTTH propuesta para la subestación Puerto Boyacá.

Fuente: Autora

Cabe resaltar que los planos de distribución y los planos unifilares completos de cada subestación se presentan en formato PDF en el Anexo E, donde se incluye un archivo independiente por subestación.

5.2.3. Resultados del diseño óptico

En esta sección se presentan los resultados del diseño óptico de la red, incluyendo el dimensionamiento de fusiones, conectores y splitters, así como el cálculo del presupuesto óptico y la verificación del margen permitido para la tecnología xPON seleccionada.

5.2.3.1. Dimensionamiento de fusiones, conectores y splitters

Con las longitudes de fibra definidas para cada enlace, se elaboró una tabla de dimensionamiento de elementos ópticos pasivos. Para cada reconector, se contabilizaron:

- El número de fusiones en la fibra central, en la fibra de trayecto y en la fibra asociada a los splitters, obteniendo el total de fusiones por enlace.
- La cantidad de conectores requeridos.
- El número y tipo de splitters involucrados en el camino óptico (balanceados 1:2 , 1:4 , 1:8 y desbalanceados 1:2 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, según el caso).

En la Tabla 5.2.1 resume estos valores para los reconectores de la subestación Pto. Boyacá, constituyendo la base para el cálculo de las pérdidas por empalmes, conectores y dispositivos de división óptica. Para una mejor visualización de los mismos, se encuentran en el Anexo D, en la hoja denominada Fusiones y conectores.

Tabla 5.2.1: Resumen de splitters por reconector para la S/E Puerto Boyacá.

SUBESTACIÓN	RECONECTOR	F. central	F. trayecto	F. Splitter	Total fusiones	Conectores	1:2 (50/50)		1:2 (10/90)		1:2 (20/80)	
							50 %	50 %	10 %	90 %	20 %	80 %
S/E Puerto Boyacá	R-01	1	10	3	14	3	0	0	1	3	0	1
	R-02	1	10	3	14	3	0	0	1	3	0	1
	R-03	1	10	3	14	3	0	0	1	3	0	1
	R-04	1	2	3	4	3	0	0	1	1	0	0
	R-05	1	4	3	6	3	0	0	1	2	0	0
	R-06	1	4	3	8	3	0	0	1	2	0	0
	R-07	1	8	3	12	3	1	1	0	0	1	0
	R-08	1	8	3	12	3	1	1	0	0	1	0
	R-09	1	12	3	16	3	0	0	0	3	0	1
	R-10	1	2	3	6	3	0	0	1	1	1	0
	R-11	1	2	3	6	3	0	0	1	1	0	1
	R-12	1	4	3	8	3	0	0	1	1	0	1
	R-13	1	3	3	12	3	0	0	1	2	0	1
	R-14	1	3	3	7	3	0	0	1	0	0	0
	R-15	1	2	3	6	3	0	0	1	0	0	0

5.2.3.2. Explicación de la herramienta de cálculo

Con el fin de automatizar el proceso de cálculo del presupuesto óptico, se desarrolló una herramienta en HTML que implementa las fórmulas descritas en el marco teórico. La calculadora permite ingresar los parámetros de cada enlace y obtener de forma automática la pérdida total y el margen disponible frente al presupuesto óptico de la tecnología seleccionada.

La interfaz de la herramienta se muestra en la Figura 5.2.18. El usuario ingresa la longitud total de fibra, la atenuación por kilómetro del cable, el número de fusiones y conectores, así como el tipo y cantidad de splitters involucrados en el enlace. Adicionalmente, se incluye el margen de seguridad y las potencias de transmisión y recepción de la OLT y la ONT.

Figura 5.2.18: Interfaz de la calculadora desarrollada para el cálculo del presupuesto óptico

Fuente: Autora

A partir de estos datos, la herramienta calcula la pérdida total del enlace como la suma de la atenuación de la fibra y las pérdidas debidas a fusiones, conectores y splitters. Posteriormente, compara este valor con el presupuesto óptico disponible para la tecnología xPON seleccionada y determina el margen crítico del enlace. Si el margen es positivo, el enlace se considera viable; en caso contrario, requiere ajustar la configuración (por ejemplo, reducir el número de splitters o la longitud de la ruta).

Validación de Datos
 Revisa que todos los datos estén completos y sean correctos antes de calcular el presupuesto óptico.

Datos Básicos

ID del Reconector: R-32
 Nombre: 15308-18
 Margen de Seguridad: 3 dB

Equipos de Red

Presupuesto Descendente: 30.0 dB
 Presupuesto Ascendente: 30.5 dB

Fibra Óptica

Distancia: 9.311 km
 Atenuación: 0.4 dB/km

Componentes

Conectores: 3 unidades
 Empalmes: 6 unidades

Splitters

Estado: Habilitados
 Configurados: 1 tipo

Resumen de Validación
 Todos los datos son válidos

Configuración Lista
 Reconector: R-32 (15308-18)
 Enlace: 9.311 km con atenuación 0.4 dB/km
 Componentes: 3 conectores, 6 empalmes
 Splitters: 1 tipo configurados
 Margen: 3 dB

Historial de Cálculos por Reconector

ID	Nombre	Distancia (km)	Conectores	Fusiones	Splitters	Margen Seguridad (dB)	Pérdida Total (dB)	Presupuesto Óptico (dB)	Estado	Acciones
R-32	15308-18	9.311	3	6	1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 1: 1.1 dB)	3	20.1	30	Viable Margen: 9.9 dB (Desbalanceado)	Editar Eliminar
R-33	15308-5	14.3	3	11	1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 1: 1.1 dB), 1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Desbalanceado 30/70 (Rama 1: 0.6 dB)	3	29.6	30	Viable Margen: 0.4 dB (Desbalanceado)	Editar Eliminar

Figura 5.2.19: Funcionamiento de la calculadora desarrollada para el cálculo del presupuesto óptico.

Fuente: Autora

Si bien en la literatura y en portales especializados se dispone de múltiples calculadoras de presupuesto óptico en línea, estas presentaron varias limitaciones para los objetivos de este proyecto. En primer lugar, muchas de ellas están asociadas a fabricantes específicos, por lo que ciertos parámetros (como pérdidas por conectores, fusiones o dispositivos) se encuentran fijados a las características de equipos propios de la marca, reduciendo la flexibilidad para ajustarlos a las condiciones reales de la red de EBSA. En segundo lugar, varias herramientas resultan poco intuitivas o excesivamente complejas de usar. Finalmente, la mayoría de estas calculadoras no contemplan explícitamente el uso de splitters desbalanceados, elemento clave en la arquitectura propuesta.

Por estas razones, se optó por desarrollar una calculadora propia en HTML, que permite modificar de manera directa los valores de atenuación, pérdidas por fusión y conector, así como las pérdidas asociadas a splitters balanceados y desbalanceados, según la necesidad del usuario o los datos de cada fabricante. De este modo, la herramienta se adapta a las particularidades de la red FTTH diseñada y facilita la evaluación de diferentes escenarios de configuración de los enlaces.

El programa de la calculadora se incluye en el Anexo C, donde se documentan las funciones utilizadas para el cálculo y la validación de los datos de entrada.

5.2.3.3. Presupuesto óptico

A partir de la información anterior, se calculó el presupuesto óptico individual de cada tramo. Para ello, se consideraron los siguientes ítems:

- Atenuación de la fibra en función de la longitud total del enlace en el cual están las reservas de fibra por empalmes y por splitters.
- Pérdidas por fusiones y conectores, tomando los valores indicados por el estándar.
- Pérdidas asociadas a cada splitter, de acuerdo con su relación de división.
- Margen de seguridad de 3 dB.

En la Tabla 5.2.2 se presentan los resultados obtenidos para la subestación Puerto Boyacá tramo 03 como un ejemplo representativo. Para cada reconector, se indica la distancia en kilómetros, el número de conectores y fusiones, la configuración de splitters utilizada, la pérdida total del enlace, el presupuesto óptico disponible para la tecnología xPON considerada y el margen crítico resultante, junto con el estado de viabilidad del enlace.

Tabla 5.2.2: Presupuesto óptico S/E Puerto Boyacá-03.

ID	Nombre	Distancia (km)	Conectores	Fusiones	Splitters	Margen Seg. (dB)	Pérdida Total (dB)	Presupuesto Óptico (dB)	Margen Crítico (dB)	Estado
R-04	15340-5	0,574	3	4	1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 1: 11 dB)	3	16.3	35.5	19.2	Viable
R-05	15340-16	0,9231	3	6	1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 1: 11 dB), 1x 1:2 Desbalanceado 10/90 (Rama 2: 0.7 dB)	3	17.5	35.5	18.0	Viable
R-06	15340-15	1,12552	3	8	1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 1: 11 dB), 1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB)	3	18.6	35.5	16.9	Viable
R-07	15303-5	2,7462	3	12	3x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Balanceado (50/50) (3.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 1: 7.9 dB)	3	21.1	35.5	14.4	Viable
R-08	15303-15	2,8405	3	12	3x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Balanceado (50/50) (3.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 1: 7.9 dB)	3	21.1	35.5	14.4	Viable
R-01	15302-20	3,2632	3	14	1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 1: 11 dB), 3x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 2: 1.4 dB), 1x 1:4 Balanceado (7.1 dB)	3	29.5	35.5	6.0	Viable
R-03	15302-5	3,5665	3	14	1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 1: 11 dB), 3x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 2: 1.4 dB), 1x 1:4 Balanceado (7.1 dB)	3	29.6	35.5	5.9	Viable
R-02	15302-16	3,2107	3	14	1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 1: 11 dB), 3x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 2: 1.4 dB), 1x 1:4 Balanceado (7.1 dB)	3	29.5	35.5	6.0	Viable
R-09	15303-20	3,7822	3	16	1x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 1: 11 dB), 4x 1:2 Desb. 10/90 (Rama 2: 0.7 dB), 1x 1:2 Desb. 20/80 (Rama 2: 1.4 dB), 1x 1:4 Balanceado (7.1 dB)	3	30.7	35.5	4.8	Viable

En todos los casos analizados, el margen crítico obtenido fue positivo, por lo que los enlaces diseñados resultan viables desde el punto de vista óptico, una vez ajustados los valores de potencia de la OLT y las ONT de acuerdo con las especificaciones finales de los equipos. Estos datos se pueden visualizar en el Anexo D, en la hoja denominada presupuesto óptico.

5.3. Resultados Fase 3:

En esta fase se presentan los resultados relacionados con la selección de la tecnología xPON y de los componentes técnicos necesarios para su implementación en el diseño propuesto. Esta fase se apoya en los requerimientos de distancia y pérdidas obtenidos en la Fase 2, así como en la revisión técnica de alternativas disponibles en el mercado.

5.3.1. Resultados de la arquitectura de la red

5.3.1.1. Selección de la tecnología xPON

Con base en el análisis teórico presentado en el marco teórico y en los requerimientos de la red de distribución de la EBSA en la zona de Puerto Boyacá, se evaluaron diferentes tecnologías de acceso óptico de la familia xPON. La selección se realizó considerando criterios de capacidad de transmisión, alcance, clases ópticas disponibles, compatibilidad con la infraestructura prevista y disponibilidad comercial de los equipos.

A partir de esta evaluación, se seleccionó la tecnología GPON como solución para la red FTTH propuesta, al ofrecer un compromiso adecuado entre capacidad, presupuesto óptico, madurez tecnológica y alineación con las necesidades de comunicación de los reconectores en la red de media tensión.

Los resultados del presupuesto óptico presentados en las secciones anteriores se calcularon tomando como referencia las especificaciones de potencia asociadas a la tecnología seleccionada.

5.3.1.2. Selección de equipos OLT y ONT

La selección de los equipos de la red óptica se realizó a partir de los requisitos funcionales y de distancia establecidos en el diseño. En particular, se requiere un equipo de cabecera capaz de operar principalmente en GPON, con la posibilidad de habilitar tecnologías de mayor velocidad en algunos puertos para aquellos enlaces cuyo presupuesto óptico sea más exigente o se necesite para una evolución en el futuro, así como unidades de terminación óptica ONT adecuadas para la instalación en los reconectores de media tensión.

Resultados de la selección del OLT Con base en lo anterior, se realizó una tabla comparativa en la cual se hace un análisis respecto a diferentes OLT que hay en el mercado. Una de las características más importantes que debe tener es que sea compacta para que se pueda colocar en el rack de comunicaciones. Esto se puede observar en la Tabla 5.3.1

Con base en estos criterios, se seleccionó como equipo de cabecera una OLT compacta tipo pizza box, el modelo **Huawei MA5801-FL04-H1**, que dispone de puertos FlexPON y permite operar tanto en GPON, XG-PON o XGSPON mediante el uso de módulos SFP intercambiables. Esta característica permite adaptar la tecnología en función de las necesidades de cada enlace, sin modificar la arquitectura física de la red.



Figura 5.3.1: OLT Huawei

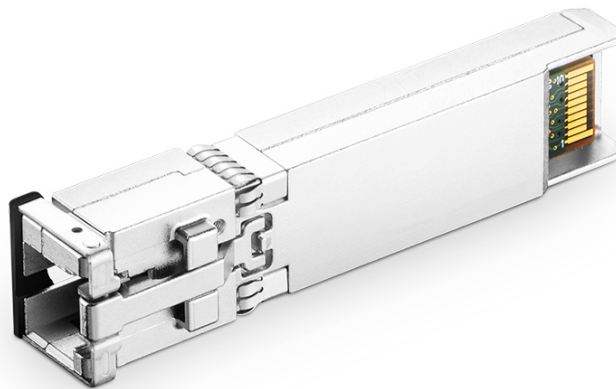


Figura 5.3.2: SFP-GPON-SMF-UPC-Class C+

Tabla 5.3.1: Cuadro comparativo de OLT.

Marca Modelo	/	Tecnología (xPON)	Distancia máx.	Potencia TX	Sensibilidad RX	Compatibilidad con SFP (versatilidad)	Compatibilidad ONT	Ciberseguridad
Furukawa 3508		GPON (Clase B+, C+, C++)	20 km lógica / 60 km física	Depende del módulo SFP	Depende del módulo SFP	Soporta módulos SFP GPON estándar ITU	Sí, aunque recomienda Furukawa	Radius, TACACS, ACLs, protección DoS, 802.1x
Huawei MA5801-FL04		FlexPON (GPON, XG(S)-PON, Combo)	20–60 km según módulo	Depende del módulo SFP	Depende del módulo SFP	Alta, soporta varios tipos de SFP de Huawei	Generalmente sí, aunque prioriza propios	Seguridad carrier-grade (AAA, ACLs, protección L2/L3)
Huawei MA5801-GP08		GPON (B+, C+, C++)	20–60 km según módulo	Depende del módulo SFP	Depende del módulo SFP	Versátil, módulos SFP Huawei compatibles	Compatible con ITU, pero recomienda Huawei	QoS avanzado, ACLs, redundancia tipo B/C
TP-Link P7001-08	DS-	GPON	20 km	Clase C+	Clase C+	SFP GPON estándar (TP-Link asegura compatibilidad)	Compatible con ONT de terceros (ITU G.984)	Basado en gestión centralizada y ACL
TP-Link P7001-04	DS-	GPON	20 km	Clase C+	Clase C+	Igual que el modelo de 8 puertos	Sí, interoperable con ONTs estándar ITU	Seguridad media (ACL, VLAN)
Ubiquiti UFiber OLT (8 puertos)		GPON (Clase B+)	20 km	1.5–5 dBm	–28 dBm	Usa módulos SFP GPON propios, limitando compatibilidad	Sí, pero mejor con ONT Ubiquiti	Seguridad básica (ACL, VLAN); menos robusta que Huawei
Ubiquiti UFiber OLT-4		GPON (Clase B+)	20 km	1.5–5 dBm	–28 dBm	Igual que el modelo de 8 puertos	Compatible con ONT estándar ITU	Seguridad similar, pero más sencilla

Resultados de la selección de ONT En el extremo de campo, cada reconector requiere una unidad de terminación óptica que permita convertir la señal PON en interfaces eléctricas adecuadas para el sistema de control y comunicaciones del equipo. Por eso, se realizó una tabla comparativa en la cual se hace un análisis respecto a diferentes ONT que hay en el mercado. Una de las características más importantes de este equipo es que sea de tipo industrial, ya que va a estar dentro del gabinete del reconector y debe tener la fuente de alimentación de 12 voltios para conectarlo a la batería de este. Este análisis se puede observar en la Tabla 5.3.2

Tabla 5.3.2: Cuadro comparativo de ONT

Marca / Modelo	Tecnología (xPON)	Distancia máx. (km)	Potencia TX (dBm)	Sensibilidad RX (dBm)	Compatibilidad con OLT (versatilidad)	Ciberseguridad
X800-04GT	XPON (EPON / GPON)	20	0-4	≤ -30	EPON/GPON SC/PC, soporte DDMI, gestión OMCI/SNMP	Autenticación MAC, VLAN, control de flujo y tormentas
FiberHome						
AN5121-4G	GPON (Clase B+)	20	1.5-5	< -28	GPON SC/UPC, protección tipo B, gestión OMCI/Web	AES-128, ACL, 802.1x, firewall, supresión de tormentas
Huawei						
EG8010H	GPON (Clase B+)	20	–	-27	GPON SC/APC, GEM/TCONT flexible, gestión OMCI/Web	Filtrado MAC, QoS, control de tasa (802.1p, WRR)
Huawei OptiXstar						
EN8010Ts-20	XGS-PON (N1/N2/E1)	Según diseño XGS-PON	–	-28	XGS-PON 10G, SC/APC, OMCI, soporte 10G simétrico	Filtrado MAC, QoS, limitación de broadcast, CoC

Con base en estos criterios, se seleccionó como equipo una ONT industrial, el modelo **X800-04GT de Fiber to Home**, que dispone de una temperatura de operación de hasta 75° y una fuente de alimentación DC 12 a 57V.



Figura 5.3.3: ONT Fiber to home

5.3.2. Cantidad de materiales

A partir de los planos de distribución y de los planos unifilares descritos, se elaboró una serie de tablas con el fin de cuantificar los materiales y equipos necesarios para la implementación en el diseño de la red FTTH propuesta. Estas tablas permiten consolidar en un solo lugar la longitud de fibra óptica requerida, el número de herrajes y amortiguadores, la cantidad de splitters balanceados y desbalanceados, así como los elementos de terminación y los equipos activos.

5.3.2.1. Longitud total de fibra óptica

En la tabla 5.3.3, consolida la longitud de cable de fibra óptica requerida por tipo de fibra. Esta información se emplea para dimensionar el metraje total de cable ADSS requerido en el proyecto.

Tabla 5.3.3: Longitud total de fibra ADSS 24 hilos por span de diseño.

Tipo de fibra	Total fibra (km)
FIBRA ADSS 24 HILOS SPAN 450	19,112
FIBRA ADSS 24 HILOS SPAN 600	30,2145
FIBRA ADSS 24 HILOS SPAN 800	64,1223

5.3.2.2. Herrajes de retención y amortiguadores

En la tabla 5.3.4 presenta el número de herrajes de retención y amortiguadores necesarios para el tendido del cable ADSS. A partir del número de vanos por tramo y del span de diseño, se considera un herraje de retención en cada extremo del vano, es decir, dos herrajes por vano. De este modo, la tabla resume tanto los totales por rango de span como el total global de herrajes y amortiguadores que deben incluirse en la lista de materiales.

Tabla 5.3.4: Número de amortiguadores y herrajes de retención por subestación y tramo.

Subestación	Tramo	Nº amortiguadores	Nº herrajes de retención		
			450	600	800
CASTILLO	CASTILLO 01	42	36	0	0
LA PERLA	15333-01	182	114	4	0
LA PERLA	15335-02	140	66	8	10
OKAL	15405-02	170	138	2	2
OKAL	15404-01	192	142	8	0
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - LA PERLA -01	14	14	0	0
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - VELAZQUEZ -02	24	24	0	0
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ-03	208	208	0	0
PTO SERVIEZ	15314-02	92	92	0	0
PTO SERVIEZ	15313-01	56	56	0	0
VELAZQUEZ	15315-02	252	182	2	6
VELAZQUEZ	15307-01	36	30	0	0
VELAZQUEZ	15308-03	256	186	2	2
TOTAL	–	1664	1288	26	20

5.3.2.3. Splitters ópticos

En la tabla 5.3.5 cuantifica los divisores ópticos requeridos en la red. Para cada tramo se indica la subestación de origen, el identificador del tramo y el número de splitters de cada tipo: 1:2 (50/50), 1:2 (10/90), 1:2 (20/80), 1:2 (30/70) y 1:4 (50/50). La fila final de la tabla presenta el total de splitters por tipo y el total general de divisores empleados en la arquitectura ODN.

Tabla 5.3.5: Cantidad de splitters por subestación, tramo y tipo.

Subestación	Tramo	1:2 (50/50)	1:2 (10/90)	1:2 (20/80)	1:2 (30/70)	1:4 (50/50)	Total por tramo
CASTILLO	CASTILLO 01	0	4	2	0	0	6
LA PERLA	15333-01	1	2	0	0	0	3
LA PERLA	15335-02	0	2	0	0	0	2
OKAL	15405-02	0	2	0	0	0	2
OKAL	15404-01	0	2	0	0	0	2
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - LA PERLA -01	0	4	1	0	0	5
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - VELAZQUEZ -02	0	2	0	1	0	3
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ-03	1	7	1	0	1	10
PTO SERVIEZ	15314-02	0	1	0	0	0	1
PTO SERVIEZ	15313-01	0	1	0	0	1	2
VELAZQUEZ	15315-02	0	3	0	0	0	3
VELAZQUEZ	15307-01	0	5	1	0	0	6
VELAZQUEZ	15308-03	1	3	0	0	1	5
TOTAL		3	38	5	2	2	50

5.3.2.4. Muflas, NAP y CTO

En la tabla 5.3.6 recopila los elementos de terminación y protección de la red óptica. A partir del número de empalmes definidos en el diseño se calcula la cantidad de muflas requeridas, considerando una mufla por punto de empalme. De igual forma, se contabiliza una caja NAP por tramo en el que se disponen splitters 1:4 y una caja terminal óptica de poste (CTO) por cada splitter final 10/90 ubicado en los postes de media tensión.

El resultado resume el número total de muflas, NAP y CTO necesarios para la implementación en el diseño del ODN, diferenciados por subestación o tramo cuando es pertinente.

Tabla 5.3.6: Cantidad de muflas, NAP y CTO por subestación y tramo.

Subestación	Tramo	Nº CTO	Nº NAP	Nº MUFLAS
CASTILLO	CASTILLO - 01	4	0	0
LA PERLA	15333-01	2	0	3
LA PERLA	15335-02	2	0	3
OKAL	15405-02	2	0	3
OKAL	15404-01	2	0	4
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - LA PERLA -01	4	0	0
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - VELAZQUEZ -02	2	0	0
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ-03	7	1	6
PTO SERVIEZ	15314-02	1	0	1
PTO SERVIEZ	15313-01	1	1	1
VELAZQUEZ	15315-02	3	0	6
VELAZQUEZ	15307-01	5	0	4
VELAZQUEZ	15308-03	3	0	4
TOTAL		38	2	35

5.3.2.5. OLT, ONT, ODF y SFP

Finalmente, En la tabla 5.3.7 resume los equipos activos y los equipos de distribución óptica necesarios. En ella se registra el número de OLT por subestación, el número de ONT requeridas, calculado a partir del número de reconectores que se conectan a la red FTTH (una ONT por reconector). Asimismo, se incluye la cantidad de ODF necesarios en la subestación principal para la terminación y organización de los cables ADSS que llegan desde los distintos circuitos.

Tabla 5.3.7: Cantidad de OLT, ODF y ONT por subestación y tramo.

Subestación	Tramo	Cantidad		
		OLT	ODF	ONT
CASTILLO	CASTILLO 01	1	0	4
LA PERLA	15333-01	1	1	2
LA PERLA	15335-02	0	1	2
OKAL	15405-02	1	1	2
OKAL	15404-01	0	1	2
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - LA PERLA -01	1	1	4
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ - VELAZQUEZ -02	0	1	2
PTO BOYACÁ	PTO BOYACÁ-03	0	1	9
PTO SERVIEZ	15314-02	1	1	1
PTO SERVIEZ	15313-01	0	1	2
VELAZQUEZ	15315-02	1	0	3
VELAZQUEZ	15307-01	0	0	6
VELAZQUEZ	15308-03	0	1	3
TOTAL	—	6	10	42

Dado que la pérdida máxima calculada en los enlaces es de aproximadamente 30,7

dB y se definió un presupuesto óptico de diseño de 35,5 dB, se seleccionó un módulo óptico SFP-GPON-SMF-UPC-Class C+ para los puertos PON de la OLT MA5801-FL04, el cual ofrece un presupuesto óptico del orden de 35 dB, suficiente para cubrir la peor condición de pérdidas con un margen de seguridad adicional.

La OLT permite, además, el uso de módulos XG-PON/XGS-PON clase C+ Pro, por lo que, si en el futuro se requieren mayores capacidades o enlaces con mayores pérdidas, es posible migrar simplemente sustituyendo el SFP GPON por un módulo XG(S)-PON compatible.

5.3.2.6. Consolidado de los materiales

En la Tabla 5.3.8 se presenta el consolidado de materiales y equipos considerados en el diseño de la red FTTH propuesta. Esta tabla integra los resultados obtenidos en las tablas anteriores, organizados por categoría de componente, tipo, unidad de medida y cantidad total requerida.

Tabla 5.3.8: Consolidado de materiales y equipos de la red FTTH propuesta.

Categoría	Tipo	Unidad	Cantidad
Fibra óptica	ADSS 24H span 450	Carrete 4 km	5
Fibra óptica	ADSS 24H span 600	Carrete 4 km	8
Fibra óptica	ADSS 24H span 800	Carrete 4 km	17
Herrajes	Retención 450	und	1288
Herrajes	Retención 600	und	26
Herrajes	Retención 800	und	20
Amortiguadores	Span 450, 600 y 800	und	1664
Splitters	1:2 (50/50)	und	3
Splitters	1:2 (10/90)	und	38
Splitters	1:2 (20/80)	und	5
Splitters	1:2 (30/70)	und	2
Splitters	1:4 (50/50)	und	2
Caja terminal óptica	CTO	und	35
Network Access Point	NAP	und	2
Muflas	Muflas 24 hilos	und	38
OLT	Huawei MA5801-FL04-H1	und	6
ODF	ODF para 24 hilos	und	10
ONT	X800-04GT de Fiber to Home	und	42
SFP	SFP-GPON-SMF-UPC-Class C+	und	13

En primer lugar, se incluye la fibra óptica ADSS de 24 hilos, diferenciada por span de diseño. La unidad de medida seleccionada es el carrete de 4 km, por lo que las cantidades 5, 8 y 17 carretes respectivamente se obtienen dividiendo la longitud total de fibra calculada para cada span entre 4 km y aproximando al entero superior. De esta forma se garantiza que la distancia obtenida cubra las necesidades de instalación y deje un margen razonable para maniobras y reservas.

A continuación se listan los herrajes de retención asociados a cada rango de span y los amortiguadores correspondientes. Las cantidades 1288, 26 y 20 herrajes de retención y 1664 amortiguadores en total provienen de la sumatoria por vano presentada en la Tabla 5.3.4, considerando un herraje de retención en cada extremo del vano y el número de amortiguadores recomendado por el fabricante para cada longitud de span.

En la sección de splitters se consolidan los diferentes tipos utilizados en el ODN: divisores 1:2 (50/50), 1:2 (10/90), 1:2 (20/80), 1:2 (30/70) y 1:4 (50/50). Las cantidades 3, 38, 5, 2 y 2 unidades, respectivamente corresponden a la suma por tramo de la Tabla 5.3.5. Los splitters 1:2 (10/90) se emplean en las CTO de poste como splitters finales, mientras que los demás se instalan en dentro de las cajas NAP y mufas.

Finalmente, la tabla resume los equipos activos y módulos ópticos necesarios: 6 OLT Huawei MA5801-FL04-H1, 10 ODF para 24 hilos, 42 ONT modelo X800-04GT de Fiber to Home y trece módulos SFP-GPON-SMF-UPC-Class C+.

5.3.2.7. Aportes del proyecto

La implementación de la red propuesta no solo permite mejorar la comunicación de los dispositivos actualmente instalados, sino que también abre la posibilidad de integrar nuevos elementos propios de las Smart Grids, tales como:

- Medidores inteligentes (AMI).
- Sistemas avanzados de supervisión SCADA.
- Sensores de calidad de energía.
- Automatización adicional de seccionadores y equipos de protección.

A futuro, la infraestructura FTTH diseñada podría servir como plataforma de expansión tecnológica, facilitando la digitalización progresiva del sistema de distribución y mejorando los indicadores de continuidad del servicio para los usuarios finales.

Asimismo, la escalabilidad de la red permite su adaptación a nuevos requerimientos tecnológicos sin necesidad de rediseñar completamente la infraestructura de comunicación.

Conclusiones

El análisis técnico y geográfico de los reconectores en la zona, permitió identificar las rutas óptimas para el tendido de fibra y definir los spans respetando las recomendaciones técnicas de EBSA. Los resultados demuestran que la red de distribución eléctrica puede ser aprovechada como soporte físico para la implementación de una infraestructura de comunicaciones, garantizando viabilidad técnica con la configuración actual del sistema eléctrico.

El diseño de la red incluyó el cálculo detallado del presupuesto óptico, considerando longitudes de fibra, pérdidas por empalmes, conectores y divisores ópticos. Los resultados obtenidos evidencian que todos los enlaces presentan márgenes de seguridad positivos frente al peor escenario de pérdidas, asegurando la correcta transmisión de datos dentro de los parámetros establecidos por la tecnología GPON. Asimismo, el desarrollo de una herramienta en HTML para el cálculo automatizado del presupuesto óptico optimizó el proceso de diseño, reduciendo la probabilidad de errores y facilitando la evaluación de escenarios de expansión futura.

Al seleccionar la tecnología GPON, hay posibilidad de migración futura a XG(S)-PON mediante el reemplazo de módulos SFP, garantizando escalabilidad y sostenibilidad tecnológica. La elección de la OLT Huawei MA5801-FL04-H1, las ONT X800-04GT y módulos SFP GPON clase C+ cumple con los requerimientos de alcance y capacidad del diseño propuesto. Esta selección asegura el cumplimiento del presupuesto óptico y proporciona una arquitectura viable para soportar las necesidades de comunicación de los reconectores de la red de media tensión.

Referencias

- Acevedo, D. (2023). *Análisis y evaluación de modelos de despliegue de una red FTTx con tecnología GPON para solución con splitter balanceado vs. solución preconectorizada con splitter desbalanceado* (inf. téc.). Universidad de Antioquia. Medellín. <https://www.udea.edu.co>
- Algar, J. (2023). *Diseño de una red de fibra óptica FTTH* (inf. téc.). Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.
- Altamar, H., & Puerta, J. (2021). *Diseño de una red de fibra óptica para el suministro de internet* (inf. téc.). Universidad Cooperativa de Colombia. Santa Marta.
- Anchondo, D. (2019). *Código de colores para fibra óptica según la norma TIA-598-C*. <https://soporte.syscom.mx/es/articulos/3453579-codigo-de-colores-para-fibra-optica-segun-la-norma-tia-598-c>
- Banda Libre. (2022). *¿Cómo calcular el presupuesto óptico de una red FTTH?* <https://bandalibre.es/como-calcular-el-presupuesto-optico-de-una-red-ftth/>
- Barros, M. (2024). *Mejoras en la gestión de la función recierre de reconectores para optimizar indicadores de calidad en la red eléctrica y su impacto en la comunidad* (inf. téc.). Universidad de la Costa.
- Capmany Franco, J. (2007). *Redes ópticas* (1.^a ed.). Limusa.
- Chaparro Becerra, F. (2025). *Fibra óptica / comunicaciones ópticas* (inf. téc.). Autor.
- Chen, K.-C., Yeh, P.-C., Hsieh, H.-Y., & Chang, S.-C. (2010). Communication infrastructure of smart grid. *2010 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISCCSP.2010.5463330>
- Cisco Systems. (2023). *Comprender la tecnología GPON*. https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/switches/catalyst-pon-series/216230-understand-gpon-technology.html
- Cisco Systems. (2024). *Calcule la atenuación máxima para los enlaces de fibra óptica*. https://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-platform-mspp/27042-max-att-27042.html
- Furukawa. (2016). *Cables ADSS resistentes al efecto tracking* (inf. téc.). Furukawa.
- Gómez López, F., Puerto López, K. C., & Guevara Ibarra, D. (2015). La fibra óptica y el fenómeno no lineal mezcla de cuarta onda. *Mundo FESC*, 5(9), 43-59. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.58>
- Huawei Technologies. (2024). *What is a smart grid? A complete guide*. <https://e.huawei.com/at/knowledge/2024/industries/grid/what-is-smart-grid>
- Iberdrola. (n.d.). *Referente mundial en smart grids*. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/smart-grids>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). *IEEE 1366-2022: Guide for electric power distribution reliability indices*. IEEE.

- International Telecommunication Union. (2019). *ITU-T Rec. G.984.2: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification* (inf. téc.). ITU. <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11>
- International Telecommunication Union. (2024). *Características de las fibras y los cables ópticos monomodo* (inf. téc.). International Telecommunication Union. <https://handle.itu.int/>
- International Telecommunication Union. (2025). *Transmission characteristics of optical components and subsystems* (inf. téc.). International Telecommunication Union. <https://handle.itu.int/>
- Keiser, G. (2021). *Fiber optic communications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9>
- Lightera. (2021). *Divisor óptico 1xN desbalanceado* (inf. téc.). Lightera.
- Lightera. (2022). *Divisor óptico 1xN balanceado Telcordia* (inf. téc.). Lightera.
- Meza Segura, J. N., Munguia, C., Lucana, J., Campos, A., Espinoza, C., Vilchez, L., Moreno, A., Cueva, P., Suckow, J., Garro, F., Cabezudo, C., Zevallos, W., Cervantes, C., Sielfeld, R., Caicedo, E., & Calvache, B. (2023). *Redes eléctricas inteligentes (smart grids)* (inf. téc.). Ministerio de Energía y Minas. Perú.
- Nesset, D. (2017). PON roadmap. *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(1), A71. <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.000A71>
- Noja Power. (n.d.). *OSM manual del usuario*. Noja Power.
- Ortega, J., Bustamante, M., Ortega Castro, J., & Bustamante Maldonado, M. (2016). Enlace de reconectores a un sistema SCADA mediante una red de comunicaciones. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 3(3), 122-128.
- Prieto, J. (2014). *Escuela técnica superior de ingeniería y sistemas de telecomunicación* (inf. téc.). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Promax. (2019). *Tipos de conectores de fibra óptica: guía sencilla*. <https://www.promaxes/esp/noticias/578/tipos-de-conectores-de-fibra-optica-guia-sencilla/>
- Radicelli, C., Pomboza, M. d. R., Samaniego, N. S., & Villacrés, E. P. (2019). *Red óptica pasiva para proveer de internet a la ciudad de Riobamba, Ecuador* (inf. téc.).
- Sánchez, J. (2005). *Análisis y estudio de redes GPRS* (inf. téc.). Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- Solís, C., & Arcos, H. (2018). Planificación de redes eléctricas de distribución en zonas urbanas consolidadas considerando criterios de confiabilidad. *Memorias de las XXVIII Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica (J-FIEE)*.
- Telecommunications Industry Association. (2018). *TIA/EIA-598: Optical fiber cable color coding* (inf. téc.). Telecommunications Industry Association.
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas* (4.^a ed., Vol. 1). Pearson Educación.
- Trashorras, J. (2013). *Desarrollo de redes eléctricas y centros de transformación*. Ediciones Paraninfo.
- UPME. (2016). *Antecedentes y marco conceptual del análisis, evaluación y recomendaciones para la implementación de redes inteligentes en Colombia* (inf. téc.). UPME. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Doc_Hemeroteca/Smart_Grids_Colombia_Vision_2030/1_Parte1_Proyecto_BID_Smart_Grids.pdf