

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES QUE INCLUYE  
EL ESTÁNDAR IEEE C37.94 ENTRE LAS SUBESTACIONES  
ELÉCTRICAS SAN GABÁN Y AZÁNGARO, 2018**

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADA POR**

**Bach. BELTRÁN CUEVA, ELVIS RENNIGER**

**ASESOR: Ing. CUADRADO LERMA, LUIS ALBERTO**

**LIMA – PERÚ**

**2018**

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo está dedicado a aquellas personas que supieron inspirar en mí ese deseo de superación y de alguna manera transmitieron su esencia en cada vivencia y conversación que compartimos.*

**Elvis Beltrán**

## **AGRADECIMIENTO**

Un especial agradecimiento al Ing. Luis Cuadrado por su persistente apoyo en la orientación que necesité para la realización del presente proyecto y a la Dra. Margarita Murillo, por compartir un poco de su humilde experiencia.

Elvis Beltrán

## ÍNDICE GENERAL

<i>RESUMEN</i> .....	5
<i>ABSTRACT</i> .....	6
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	7
<i>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i> .....	9
1.1. Problema General.....	10
1.2. Problemas Específicos .....	10
1.3. Justificación .....	11
1.4. Delimitación .....	11
1.5. Alcance .....	12
1.6. Objetivos.....	12
<i>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</i> .....	13
2.1. Antecedentes del estudio de investigación .....	13
2.2. Investigaciones Relacionadas .....	17
2.3. Bases Teóricas .....	19
2.4. Definiciones de Términos Básicos.....	61
<i>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE ESTUDIO</i> .....	63
3.1. Tipo Y Método De Investigación .....	63
<i>CAPÍTULO IV. DISEÑO DE INGENIERÍA</i> .....	64
4.1. Cálculos de atenuación y pérdida .....	65
4.2. Cálculos de potencia de recepción .....	72
4.3. Cálculos de tiempos de un bit.....	75
4.4. Análisis de factores externos a considerar en el diseño .....	76
4.5. Diseño final .....	77
<i>CONCLUSIONES</i> .....	81
<i>RECOMENDACIONES</i> .....	82
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</i> .....	83
<i>ANEXO</i> .....	85
Anexo N° 1: Protocolos de empalme de fibra óptica del año 1999.....	85
Anexo N° 2: Acta de entrega de hilos de fibra óptica del año 2012.....	86
Anexo N° 3: Medición de niveles de atenuación de fibra óptica en el año 2018 .....	88

## RESUMEN

La Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. transporta la energía que produce, a través de las líneas de transmisión que une la subestación eléctrica San Gabán II e interconecta con la subestación eléctrica Azángaro, pasando por la subestación Antauta. Dichas líneas no cuentan con un sistema de protección que las proteja en su totalidad; ya que, necesitan de un sistema de comunicaciones adecuado que permita la implementación y el soporte de protocolos específicos para su correcto desempeño. Estos sistemas de protecciones están conformados por la interacción de relés que desempeñan la función de protección diferencial de línea, además de cumplir con otras funciones de protección, como las de distancia, de transformadores, de barras, y algunas otras funciones complementarias.

En esta tesis se realizaron los cálculos necesarios el sistema de comunicaciones entre ambas subestaciones eléctricas, considerando las especificaciones técnicas necesarias para implementar un protocolo de comunicaciones basado en el estándar IEEE C37.94 a través de la multiplexación de señal de comunicación de los relés, que permitirían soportar la protección diferencial de línea. Para ello se realizaron cálculos de longitudes de fibra óptica monomodo, niveles de pérdida del medio de comunicación, márgenes de reserva de atenuación y consideraciones para balancear y compensar dichas pérdidas por atenuación.

Los cálculos concluyen con los detalles técnicos de diseño y la propuesta esquemática de la solución de comunicaciones para permitir la implementación de un sistema de protección diferencial de línea. Resaltando que estos valores se pueden afinar en función a las especificaciones técnicas de los fabricantes al momento del análisis para la implementación de dicho sistema.

**PALABRAS CLAVES:** Sistemas de comunicaciones, subestaciones eléctricas, multiplexación, fibra óptica monomodo, fibra óptica multimodo, protección diferencial de línea, C37.94, relés,.

## **ABSTRACT**

The Electric Generation Company San Gabán S.A. it transports the energy it produces, through the transmission lines that connect the San Gabán II electrical substation and interconnects with the Azángaro electrical substation, passing through the Antauta substation. These lines do not have a protection system that protects them in their entirety; since, they need an adequate communication system that allows the implementation and support of specific protocols for their correct performance. These protection systems are formed by the interaction of relays that perform the line differential protection function, in addition to fulfilling other protection functions, such as distance protection, transformers, busbars, and some other complementary functions.

In this thesis the necessary communications system between the two electrical substations were made, considering the necessary technical specifications to implement a communications protocol based on the IEEE C37.94 standard through the multiplexing of the communication signal of the relays, which would allow to support the line differential protection. To do this, calculations were made of single-mode optical fiber lengths, loss levels of the communication medium, attenuation reserve margins and considerations to balance and compensate for said attenuation losses.

The calculations conclude with the technical details of the design and the schematic proposal of the communications solution to allow the implementation of a line differential protection system. Highlighting that these values can be fine-tuned according to the technical specifications of the manufacturers at the time of the analysis for the implementation of said system.

**KEYWORDS:** Communication systems, electrical substations, multiplexing, single mode fiber optic, multimode fiber optic, line differential protection, C37.94, relays.

# INTRODUCCIÓN

La Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A., empresa dedicada a la generación de energía eléctrica a partir del caudal del río San Gabán, transporta una parte de la de la energía que produce a través de la línea de transmisión que parte de la subestación San Gabán II e interconecta con la subestación eléctrica Azángaro, pasando por la subestación Antauta.

Estas líneas de transporte deben estar protegidas en su totalidad. Por ello, en el Capítulo I, se ha planteado esta problemática como consecuencia de un sistema de comunicaciones carente e inadecuado. Como respuesta de solución a dicha problemática, se ha planteado la elaboración del diseño de un sistema de comunicaciones que permita la implementación y el soporte de los sistemas de protección diferencial de línea, con la consideración de que ya existen un medio de comunicación por fibra y hay que rehusarla; además, los sistemas de protección diferencial se comunican respetando los protocolos del estándar IEEE C37.94.

En el Capítulo II se citaron los trabajos de investigación relacionados y las fuentes bibliográficas que permitieron analizar y desarrollar los cálculos necesarios para plantear una solución adecuada según la problemática que afrontan las líneas de transmisión de la empresa San Gabán.

En el Capítulo III ha permitido exponer la metodología de estudio e investigación que se aplicó en el desarrollo del presente proyecto de investigación.

En el capítulo IV se desarrollaron los cálculos necesarios para determinar cuáles son las características y especificaciones técnicas que debe cumplir el diseño del sistema de comunicaciones para soportar un sistema de protección diferencial de la línea eléctrica que transporta la energía de la subestación San Gabán II hasta la Subestación Azángaro.

Finalmente, todos los cálculos y análisis fueron aterrizados en una lista de conclusiones y recomendaciones que puedan permitir mejorar el diseño propuesto y su implementación.



## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La generación de energía eléctrica en el Perú, en gran parte, se debe al aprovechamiento de la energía hidráulica. La Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. (EGESGSA), además de participar en la generación eléctrica hidráulica, cuenta con una participación importante en el sector eléctrico; operando desde la Central Hidroeléctrica San Gabán II con una potencia instalada de 110 MW, la cual está ubicada en el departamento de Puno” (FONAFE, 2011)

San Gabán S.A. cuenta con la Central Hidroeléctrica San Gabán II y la Central Térmica de Taparachi como parte de su infraestructura eléctrica; además, tiene bajo su concesión tres líneas de transmisión en 138 KV entre las subestaciones eléctricas (SEs) de San Gabán II, Azángaro y San Rafael, las que sirven para transportar e inyectar la energía producida al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional en la barra en 138 KV de la subestación Azángaro (EGESGSA, 2016).

Estas líneas de transmisión están separadas entre sí de la siguiente manera: en la L-1009, San Rafael – Azángaro, 89.3 Km.; en la L1010, San Gabán II – Azángaro, 159.1 Km.; finalmente en la L-1013, San Gabán II – San Rafael, 76.4 Km. Como tal, se hace necesario un sistema de protecciones que pueda respaldar el correcto desempeño de las líneas de transmisiones eléctricas.

La implementación de un sistema de protecciones que cubra completamente la línea de transmisión necesita de un sistema de comunicaciones que interconecte las subestaciones extremas a dicha línea. Además, para que una empresa de generación eléctrica pueda inyectar la energía que produce, es importante y necesario que cumpla con las exigencias que designe el COES y el SEIN.

En este sentido, es necesario evaluar la implementación de un sistema de protección diferencial en la L1010, ya que actualmente no cuenta con esta

protección. Como consecuencia, es necesario la implementación de un sistema de comunicación que soporte los estándares y protocolos que requiere este sistema de protecciones para su correcto desempeño (San Gabán - Memoria Anual, 2017).

Actualmente, la L-1010 cuenta con un sistema de comunicaciones basado en un enlace de fibra óptica, pero, este enlace necesita de un sistema de repetidoras en la subestación eléctrica (SE) Antauta; siendo requisito indispensable, para la implementación del sistema de protección diferencial de la línea de transmisión, que no haya ninguna repetidora en los puntos intermedios, es decir, que la comunicación sea limpia de punto a punto de la fibra óptica.

Además, los sistemas de comunicaciones actualmente instalados no pueden soportar la comunicación del sistema de la protección diferencial de línea, ya que no cuentan con la tecnología necesaria (por efecto propio de la antigüedad que poseen), se está operando un enlace óptico con equipos Nera NDF 8 y multiplexores UMUX que llevan servicios de voz, datos y teleprotección, lo que hace necesario un cambio. Sabiendo que el sistema de protección diferencial de línea se comunica basándose en el estándar IEEE C37.94, se entiende que el sistema de comunicaciones debe incluir un protocolo que esté basado en dicho estándar.

## **1.1. Problema General**

¿Cómo diseñar el sistema de comunicaciones que incluye estándar IEEE C37.94 entre las subestaciones eléctricas San Gabán II y Azángaro, en el año 2018?

## **1.2. Problemas Específicos**

- a. ¿Cuáles son las características a considerar en el diseño del sistema de comunicaciones?
- b. ¿Para qué se necesita incluir el estándar IEEE C37.94?

### **1.3. Justificación**

El desarrollo de un diseño del sistema de comunicaciones que incluya el estándar IEEE C37.94 entre la S.E. San Gabán y la S.E. Azángaro, durante el año 2018, se justifica, en:

- La necesidad de proteger la línea de transmisión eléctrica que interconecta a ambas S.Es.
- Aprovechar el contexto de actualización en el que se encuentra la empresa San Gabán con la actualización SCADA del sistema eléctrico, pues, ello implica la actualización del sistema de comunicaciones entre la S.E San Gabán y la S.E. Azángaro. En tal sentido se puede sugerir la adquisición de equipos comunicaciones que sean compatibles con el estándar IEEE C37.94 y, posteriormente, implementar un sistema de protección diferencial; evitando incurrir en costos mayores por no haber previsto su necesidad a tiempo oportuno.
- La necesidad de evitar pérdidas económicas a la EGESGSA ya sea por los daños que se puedan ocasionar sobre los equipos de sus instalaciones o por las multas impugnadas como consecuencias de posibles cortes no previstos en el servicio, como consecuencia de no contar con un sistema de protección diferencial de línea.
- La oportunidad que encontraría la EGESGSA para mejorar sus operaciones, garantizando una oportuna acción de respuesta a cualquier tipo de falla en la línea de transmisión.
- La existencia y disponibilidad de tecnología necesaria para hacer posible su implementación.

### **1.4. Delimitación**

El presente estudio está enfocado en el sistema de comunicaciones que interconecta a la S.E. San Gabán y la S.E. Azángaro según el estado en el que esta se encuentra hasta el año 2018. También se considera que los equipos de protección, así como el SCADA y los servicios adicionales puedan comunicarse de manera óptima, eficiente y oportuna.

Este estudio se encuentra delimitado por la bibliografía disponible y relacionada con la tecnología de los equipos y materiales actualmente instalados que componen el sistema de comunicaciones de la EGESGSA entre las S.Es. San Gabán II y Azángaro, así como las especificaciones técnicas de las normas y estándares referentes a los sistemas de protección diferencial de línea y la forma en que estas se comunican (estándar IEEE C37.94). Simultáneamente, se refuerza en la documentación referente a las tecnologías que se propondrán en las recomendaciones.

## **1.5. Alcance**

El alcance propuesto en el desarrollo del presente documento abarca hasta el diseño del sistema de comunicaciones entre la S.E. San Gabán y la S.E. Azángaro que garantiza la capacidad de interconectar el sistema de protección diferencial de línea basado en estándar IEEE C37.94.

## **1.6. Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar del sistema de comunicaciones que incluye el estándar IEEE C37.94 entre las subestaciones eléctricas san Gabán y Azángaro, 2018.

### **Objetivos Específicos**

- a. Determinar cuáles serán las características que se debe incluir en el diseño del sistema de comunicaciones entre las subestaciones eléctricas San Gabán II y Azángaro, en el año2018
- b. Permitir la comunicación de un sistema de protección diferencial de línea basado en estándar IEEE C37.94.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio de investigación

Los siguientes antecedentes nos servirán de apoyo para determinar el diseño del sistema de comunicaciones adecuado para soportar un sistema de protección diferencial de línea de transmisión eléctrica.

#### **Internacionales**

Martínez, M. (2017), en su tesis titulada: *“Estudio de cortocircuito, cálculo de ajustes y puesta en servicio de las protecciones eléctricas de la línea de transmisión de un parque eólico de potencia 23.1 megawatts hacia subestación eléctrica de switcheo de 138 kilovoltios”*, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala; resalta la importancia de que las líneas de transmisión eléctrica deban contar con un sistema de protección, tanto de acción primaria como acción secundaria y que los tiempos de respuesta deben ser los más rápidos posibles, para evitar un apagón masivo; ya que, las líneas de transmisión están preparadas para seguir trabajando si se pierden varias rutas por fallas, siempre y cuando éstas hayan sido desconectadas de manera oportuna, caso contrario, es casi imposible recuperar el sincronismo de la red eléctrica.

[...] los requisitos mínimos con los que debe contar una planta generadora de energía eléctrica, que esté interconectado a Sistema Eléctrico Nacional, son: Estabilidad del sistema de potencia y velocidad de aclaración de fallas, Seguridad, selectividad y estabilidad, Fiabilidad y Confiabilidad.

[...] Respecto al sistema de protección diferencial, conocido en el sector eléctrico como función 87L, deja en claro que, estos sistemas son altamente selectivos y que necesitan un sistema de telecomunicaciones entre sus terminales de línea, haciendo énfasis

en que si bien es cierto que este sistema de protecciones inicialmente estuvo dirigido a línea de transmisión de corta longitud, hoy en día se aplica para longitudes largas con el uso de sistemas de telecomunicaciones por microondas o preferentemente por fibra óptica.

[...] finalmente, deja claro que sin comunicación no hay protección y, por lo tanto, un sistema de protección relativamente selectivo se utiliza como complemento.

Méndez, E. (2016), en su tesis titulada: *“Protección diferencial de barras”*, en el Instituto Politécnico Nacional, en la Ciudad de México, México; hace un análisis exhaustivo de la manera en que funcionan los sistemas de protección diferencial, enfocándose en las características de los relevadores, como él lo menciona haciendo alusión a los relés. Pero, también hace hincapié en la importancia de contar con un sistema de comunicaciones adecuado para permitir tomar los datos que envían los relés, procesarlos y enviarlos al otro extremo, todo dentro del tiempo oportuno para que el relé no pueda interpretar los retardos como una posible falla.

[...] concluye que las diferentes características y funciones del relevador lo hacen más que un dispositivo para protección, proporcionar información de medición, reportes o dato útiles para el análisis de eventos; esas características y funciones permiten también, una gran comunicación humano- máquina.

Naranjo, A. y Feraud M. (2015), en su tesis titulada: *“Diseño y construcción de un módulo para protección diferencial de transformadores”*, en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Ecuador; desarrolla un módulo de protección diferencial basado en relés SEL 587 con la finalidad de comprender su correcto manejo, así como establecer los parámetros correctos de

configuración para su aplicación a la protección de transformadores.

[...] concluyen que hay funciones que posee el relé SEL 587 que, para probar y conocer mejor, es importante y necesario la implementación de un sistema de comunicaciones y así poder armar un sistema de relés que permitan configurar más funciones y a su vez integrarlos en un sistema SCADA. De la misma forma, en una de sus pruebas deja planteada la interrogante, ¿Qué protocolos de comunicación utilizas los sistemas de potencia?

### **Nacionales**

Velarde, J. (2013) en su tesis titulada: *“Esquema de recierre en subestaciones de interruptor y medio basados en comunicación GOOSE”*, en la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú; desarrolla una serie de pruebas de fallas para demostrar los beneficios que se pueden obtener al reemplazar los medios de comunicación tradicional de cobre por los de fibra óptica a nivel de relés integrados al sistema SCADA. Los resultados de las pruebas end to end (E2E) muestran resultados contundentes de los beneficios de reemplazar los cables de cobre por fibra óptica y utilizar comunicación GOOSE, respetando el protocolo IEC 61850, obteniendo una reducción considerable en utilización de cables, mejoramiento de los tiempos de respuesta y reducción de señales interferentes entre sí.

[...] concluye que para garantizar el adecuado desempeño de los sistemas de protección es importante la implementación de un sistema de comunicación redundante o en anillo.

Morales, A. (2013) en su tesis titulada: *“Protecciones proyecto Chilca – Planicie – Carabaylo – Zapallal 220KV y 500KV: consideraciones*

*para el ajuste de protecciones en sistemas en extra alta tensión a 500KV en el sistema eléctrico interconectado nacional*”, en la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú; se enfoca en el estudio de los parámetros que inciden en los cálculos de transmisión de potencia y estabilidad de la línea, enfocando como primer punto de análisis a los sistemas de protección diferencial de línea; ya que estos se caracterizan por su alta selectividad y su relativa sensibilidad. Por otra parte y de manera complementaria hace referencia a que, para contar con un adecuado desempeño de los sistemas de protección se debe asegurar la implementación de sistemas de comunicación confiable y que tengan un esquema de redundancia.

[...] En cuanto a los sistemas de protecciones diferenciales de línea y las teleprotecciones, reafirma la necesidad de la existencia de un sistema de comunicación multiplexado, el cual puede enlazarse por microondas o por fibra óptica, que permita la conmutación de las señales entre las protecciones principales y las de respaldo.

[...] concluye que, dependiendo de la magnitud de un proyecto y del impacto que genera el abastecimiento de una central de generación de energía eléctrica al SEIN, se justifica la implementación de sistemas de protecciones sensibles y sistemas de comunicaciones que le den soporte.

Finalmente, Ramos, E. (2013) en su tesis titulada: *“Diseño del sistema de protección y cálculos de los ajustes de los relés de protección de una subestación eléctrica de alta tensión”*, en la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú; plantea una serie de análisis para proponer un diseño del sistema de protección de la línea de transmisión que llevaría la energía que concentra la SE Morococha hasta la minera Chinalco, resaltando la importancia de contar con un sistema de comunicaciones adecuado para el correcto sincronismo de estos.



## 2.2. Investigaciones Relacionadas

Santana. A. (2012) en su publicación "*Redes de Ingeniería*" sostiene que algunas experiencias sobre los sistemas de comunicaciones en las SEs señalan que se hacen necesarios para automatizar las operaciones de estas, en tal sentido, su historia se encuentra fuertemente ligada a la evolución de la automatización de los sistemas de potencia y a grandes rasgos se puede ver que la automatización de subestaciones eléctricas, tiene sus inicios en la década de los 80, desde entonces nuevos esquemas han madurado, permitiendo que, por medio de las telecomunicaciones, se permita la integración del control, la protección y el monitoreo en un sistema integrado; brindando diversas ventajas en comparación a los sistemas convencionales"

A comienzos del 2004 se concluye la primera edición del estándar, nombrada con el título (communication networks and systems in substations: redes de telecomunicaciones y sistemas en subestaciones), la cual es la primera norma global en cuanto a las telecomunicaciones en el entorno eléctrico; no obstante al obtenerla se observó, que era totalmente dirigida hacia la comunicación interna de las subestaciones, dejando preguntas e incertidumbres en cuanto a la falta de definir todos los nodos lógicos necesarios, para el debido modelado de los elementos que son necesarios al interior de una subestación y su comunicación hacia el exterior con otras subestaciones, que es necesaria para ciertas funciones de protección y estabilidad del sistema, igualmente hacía falta la comunicación con los centros de control, dando por hecho que estas telecomunicaciones serian suplidas por los protocolos usados hasta el momento; pero los grupos técnicos siguieron trabajando en estos detalles y han dado al surgimiento de la segunda edición en algunas de sus partes, e insertando nuevas partes que no disponía en su primera edición (Arturo Santana, 2012, párr. 14).

Por su parte, Sánchez, J. (2016) en su tesis titulada "*Localización de faltas en líneas de tres terminales a partir de las medidas de los relés de una protección diferencial de línea*" desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España; Define que, sobre el principio de funcionamiento de la protección diferencial, cuya zona de actuación está limitada por la localización de los transformadores de corriente, es considerado superior en lo que se refiere a la selectividad, sensibilidad y rapidez de operación si se compara con el de otros esquemas de protecciones, como el de comparación direccional, comparación de fase o esquemas de protección de distancia.

[...] la función diferencial responde a la suma de todas las corrientes de su zona de protección que, idealmente, debería ser igual a cero. Sin embargo, en la práctica, los errores de medida y las capacidades de la línea presentes dentro de la zona de protección podrían dar lugar a una falsa señal diferencial. Esto requiere el uso de contramedidas, que pueden ir desde añadir retrasos de tiempo intencionados en la actuación de las protecciones, restricciones porcentuales y restricciones de armónicos y bloqueos, hasta algoritmos sofisticados de detección de faltas externas y técnicas adaptativas de contención de disparo de las protecciones.

Cuando se aplican en protección de líneas, las protecciones diferenciales se enfrentan a las limitaciones impuestas por la longitud de las mismas. Actualmente se encuentran ampliamente implementados en el campo de la protección de líneas los esquemas con relés de corriente diferencial basados en microprocesadores utilizando canales de comunicación digitales (Sánchez, 2016, p.10).

[...] Finalmente, concluye que la implantación generalizada de canales de comunicación a larga distancia, como las conexiones digitales a través de microondas y fibra óptica directa, o los sistemas de red óptica síncrona y jerarquía digital síncrona (cuyas siglas en inglés son SONET y SDH, respectivamente), permite la expansión de las aplicaciones de esquemas de protección de líneas con relés de corriente diferencial.

### **2.3. Bases Teóricas**

El presente proyecto de investigación cita las investigaciones realizadas por el Sr. Tomasi, Wayne, las que fueron plasmadas en su obra titulada “*Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*”. De la misma forma, como segunda fuente importante de investigación, cita las investigaciones del Sr. Checa, Luis María, las que fueron plasmadas en su obra titulada “*Líneas de Transporte de Energía*”.

#### **Sistema de comunicaciones con fibra óptica**

Los sistemas de comunicaciones ópticas se convirtieron en la forma más eficiente de trasladar información de un punto a otro, en las últimas 3 décadas, convirtiéndose en la solución más atractiva a nivel de ingeniería.

En esencia, un sistema óptico de comunicaciones es un sistema electrónico de comunicaciones que usa la luz como portador de información. Sin embargo, es difícil e impráctico propagar ondas luminosas por la atmósfera terrestre. En consecuencia, los sistemas de comunicaciones con fibra óptica usan fibras de vidrio o de plástico para “contener” las ondas luminosas y guiarlas en una forma similar a como las ondas electromagnéticas son guiadas. (Tomasi, 2003, p.422).

#### *Ventajas y desventajas de los sistemas de fibra óptica*

Las comunicaciones a través de cables de fibra óptica encuentran ventajas abrumadoras sobre las comunicaciones convencionales a través de cable metálico o coaxial, así, sobre las ventajas, (Tomasi, 2003) afirma que:

- Mayor capacidad de información: los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas tienen mayor capacidad de información que los cables metálicos, debido a los anchos de banda, inherentemente mayores con las frecuencias ópticas. Las fibras ópticas se consiguen con anchos de banda hasta de 10 GHz. Los cables

metálicos tienen capacitancia entre, e inductancia a lo largo, de sus conductores, que los hacen funcionar como filtros pasabajas y eso limita sus frecuencias de transmisión, anchos de banda y capacidad de conducción de información. Los sistemas modernos de comunicaciones con fibra óptica son capaces de transmitir varios gigabits por segundo a través de cientos de millas, permitiendo combinar y propagar literalmente millones de canales individuales de datos y de voz con un solo cable de fibra óptica.

- Inmunidad a la diafonía: los cables ópticos son inmunes a la diafonía entre cables vecinos, debida a la inducción magnética. Las fibras de vidrio o de plástico son no conductores de electricidad y, en consecuencia, no tienen campos magnéticos asociados con ellas. En los cables metálicos, la causa principal de la diafonía es la inducción magnética entre conductores ubicados físicamente cercanos entre sí.
- Inmunidad a la interferencia por estática: los cables ópticos son inmunes al ruido de estática que causa la interferencia electromagnética (EMI) debida a rayos, motores eléctricos, luces fluorescentes y otras fuentes de ruido eléctrico. Esta inmunidad también se debe a que las fibras ópticas son no conductores de la electricidad, y a que el ruido eléctrico no afecta la energía en las frecuencias luminosas. Los cables de fibras tampoco irradian energía de RF y, en consecuencia, no pueden interferir con otros sistemas de comunicaciones. Esta característica hace que los sistemas de fibra óptica sean ideales para aplicaciones militares en las que los efectos de las armas nucleares (interferencia de pulsos electromagnéticos EMP) tienen un efecto devastador sobre los sistemas electrónicos convencionales de comunicaciones.
- Inmunidad al ambiente: los cables ópticos son más resistentes a los extremos en el ambiente que los cables metálicos. También, los cables ópticos funcionan dentro de variaciones más amplias de temperatura y son menos afectados por los líquidos y gases corrosivos.

- Seguridad: los cables ópticos son más seguros y fáciles de instalar y mantener que los cables metálicos. Debido a que las fibras de vidrio y de plástico son no conductoras, no se asocian con ellas corrientes ni voltajes eléctricos. Las fibras ópticas se pueden usar cerca de líquidos volátiles y de gases, sin preocuparse porque puedan causar explosiones o incendios. Las fibras ópticas son menores y mucho más ligeras que los cables metálicos. En consecuencia, es más fácil trabajar con ellas y se adaptan mucho mejor a aplicaciones aéreas. También, los cables de fibra requieren menos espacio de almacenamiento y son más fáciles de transportar.
- Seguridad: las fibras ópticas son más seguras que los cables metálicos. Es virtualmente imposible entrar a un cable de fibra sin que sepa el usuario, y los cables de fibra óptica no se pueden detectar con buscadores de metales, a menos que tengan refuerzo de acero para tener mayor resistencia. Éstas también son las cualidades que hacen atractivas a las fibras ópticas para las aplicaciones militares.
- Duran más: aunque todavía no se ha demostrado, se anticipa que los sistemas de fibra óptica durarán más que las instalaciones metálicas. Esta hipótesis se basa en las mayores tolerancias que tienen los cables de fibra frente a cambios en las condiciones ambientales, y en su inmunidad a las sustancias corrosivas.
- Economía: el costo de los cables de fibra óptica es, aproximadamente, igual al de los cables metálicos. Sin embargo, los cables de fibra tienen menores pérdidas y en consecuencia requieren menos repetidoras. Esto equivale a menores costos de instalación y del sistema en general, así como a mayor confiabilidad (p.424).

En contraparte, en cuanto a las desventajas más resaltantes, que son pocos, (Tomasi, 2003) afirma que:

- Costos de interconexión: los sistemas de fibra óptica son virtualmente inútiles por sí mismos. Para ser prácticos se deben conectar a instalaciones electrónicas normales, lo cual requiere con frecuencia interconexiones costosas.
- Resistencia: las fibras ópticas de por sí tienen una resistencia bastante menor a la tensión que los cables coaxiales. Esto se puede mejorar recubriendo la fibra con Kevlar normal y una chaqueta protectora de PVC.
- Potencia eléctrica remota: a veces es necesario llevar energía eléctrica a un equipo remoto de interconexión o de regeneración. Esto no se puede hacer con el cable óptico, por lo que se deben agregar más cables metálicos en el cableado (pp. 424-425).

#### *Principio de funcionamiento de los sistemas de fibra óptica*

En un transmisor de fibra óptica, la fuente luminosa se puede modular mediante una señal digital o una analógica. Para la modulación analógica, la interfaz de entrada compensa las impedancias y limita la amplitud de la señal de entrada. Para la modulación digital, la fuente original puede tener ya la forma digital o bien, si está en forma analógica, debe convertirse a una corriente de pulso digitales, agregándose un interfaz convertidor de analógico a digital.

El convertidor de voltaje a corriente sirve como interconexión eléctrica entre los circuitos de entrada y la fuente luminosa. Esta fuente luminosa puede ser un diodo emisor de luz (LED, de light-emitting diode) o un diodo de inyección láser (ILD, por injection laser diode). La cantidad de luz emitida por un LED o un ILD es proporcional a la cantidad de la corriente de excitación. Así, el convertidor de voltaje a corriente convierte un voltaje de señal de entrada en una corriente que se usa para activar la fuente luminosa (Tomasi, 2003). El acoplador entre fuente y fibra (como por ejemplo un lente) es una interfaz mecánica. Su función es acoplar la luz que emite la fuente e introducirla al cable de fibra óptica. La fibra óptica es un núcleo de vidrio o plástico, un revestimiento y una chaqueta

protectora. El dispositivo de acoplamiento detector de fibra a luz también es un acoplador mecánico. Su función es sacar tanta luz del cable de fibra como sea posible y ponerlo en el detector de luz.

El detector de luz es un diodo PIN (tipo p tipo n intrínseco) o un fotodiodo de avalancha (APD, de avalanche photodiode). Tanto el diodo APD como el PIN convierten la energía luminosa en corriente. En consecuencia, se necesita un convertidor de corriente a voltaje. El convertidor de corriente a voltaje transforma los cambios de la corriente del detector en cambios de voltaje de la señal de salida (Tomasi, 2003, p.427).

En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques simplificado de un enlace de comunicaciones con fibra óptica. Los tres bloques principales que lo forman son el transmisor, el receptor y la guía de fibra o fibra óptica guía.

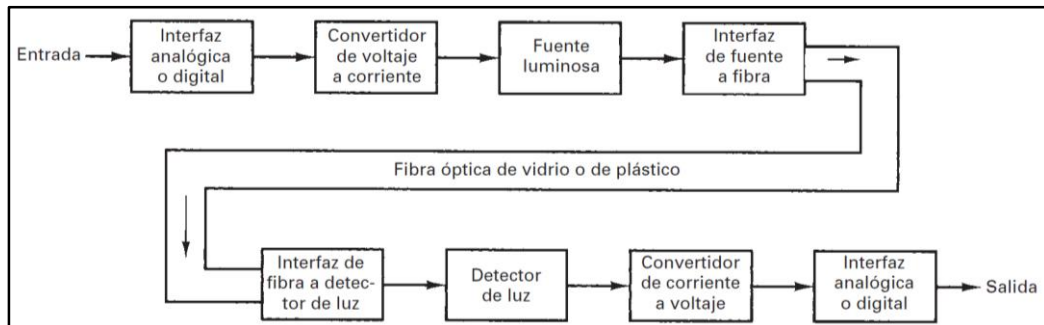


Figura 1. Enlace simplificado de fibra óptica

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.427.

El transmisor consiste en una interconexión o interfaz analógica o digital, un convertidor de voltaje a corriente, una fuente luminosa y un acoplador de luz de fuente a fibra. La guía de fibra es un cable de vidrio o plástico ultrapuro. El receptor comprende un dispositivo detector acoplador de fibra a luz, un detector fotoeléctrico, un convertidor de corriente a voltaje, un amplificador y una interfaz analógica o digital.

### *Tipos de fibra óptica*

La fibra óptica se puede agrupar por tipos en función al material usado en su fabricación. (Tomasi, 2003) afirma que “En esencia hay tres variedades de fibra óptica que se usan en la actualidad. Las tres se fabrican con vidrio, plástico o una combinación de vidrio y plástico” (p.427).

1. Núcleo y forro de plástico.
2. Núcleo de vidrio con forro de plástico (llamado con frecuencia fibra PCS, plastic-clad silica o sílice revestido con plástico).
3. Núcleo de vidrio y forro de vidrio (llamado con frecuencia SCS, silica-clad silica o sílice revestido con sílice).

Las fibras de plástico tienen varias ventajas sobre las de vidrio. La primera es que las de plástico son más flexibles y, en consecuencia, más robustas que el vidrio. Son fáciles de instalar, pueden resistir mejor los esfuerzos, son menos costosas y pesan 60% menos que el vidrio. La desventaja de las fibras de plástico es su alta atenuación característica: no propagan la luz con tanta eficiencia como el vidrio. En consecuencia, las fibras de plástico se limitan a tramos relativamente cortos, como por ejemplo dentro de un solo edificio o un complejo de edificios.

Las fibras con núcleos de vidrio tienen bajas atenuaciones características; sin embargo, las fibras PCS son un poco mejores que las SCS. Las fibras PCS también se afectan menos por la radiación y, en consecuencia, tienen mucho más atractivo en las aplicaciones militares. Las fibras SCS tienen las mejores características de propagación y son más fáciles de terminar que las PCS. Desafortunadamente, los cables SCS son los menos robustos y son más susceptibles a aumentos de atenuación cuando están expuestos a la radiación (Tomasi, 2003, pp.427-428).



La selección de una fibra para determinada aplicación está en función de los requisitos específicos del sistema y del diseño. Siempre hay compromisos basados en la economía y la logística en una aplicación determinada

### *Propagación de la luz*

Cuando se manejan ondas electromagnéticas de mayor frecuencia, como las luminosas, se acostumbra usar unidades de longitud de onda y no de frecuencia. La longitud de onda es la distancia que ocupa en el espacio un ciclo de una onda electromagnética. La longitud de onda depende de la frecuencia de la onda y de la velocidad de la luz. La relación matemática correspondiente es

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \dots \text{Ecuación 1}$$

en donde:

$\lambda$  = longitud de onda (metros/ciclo)

$c$  = velocidad de la luz (300,000,000 metros por segundo)

$f$  = frecuencia (hertz)

En materiales más densos que el espacio libre, la velocidad se reduce. Cuando se reduce la velocidad de una onda electromagnética al pasar de uno a otro medio de un material más denso, el rayo de luz se refracta, o cambia de dirección, hacia la normal. En materiales más densos que el espacio libre, las frecuencias de la luz no se propagan con la misma velocidad (Tomasi, 2003).

La figura 2 muestra cómo se refracta un rayo de luz al pasar de un material de determinada densidad a un material menos denso. La refracción se presenta en la interfaz entre aire y vidrio.

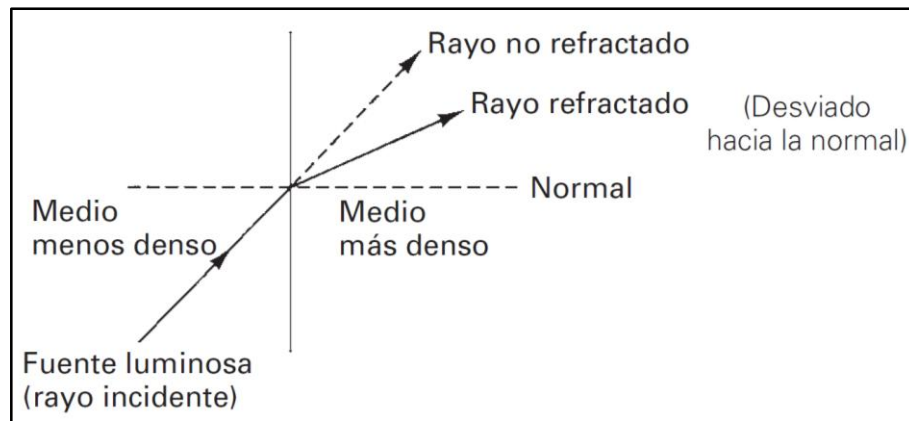


Figura 2. Refracción de la luz

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.431.

La cantidad de desviación o refracción depende del índice de refracción de los dos materiales y se calcula como la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre, entre la velocidad de propagación del rayo en determinado material. La ecuación correspondiente es:

$$n = \frac{c}{v} \quad \dots \text{Ecuación 2}$$

en la que:

c = velocidad de la luz en el espacio libre (300,000,000 metros por segundo)

v = velocidad de la luz en determinado material (metros por segundo)

Aunque el índice de refracción también es una función de la frecuencia, la variación, en la mayoría de las aplicaciones, es insignificante y en consecuencia se omite de esta descripción.

La figura 3 muestra cómo se refracta un rayo de luz al pasar de un material más denso (con mayor índice de refracción) a uno menos denso (menor índice de refracción).

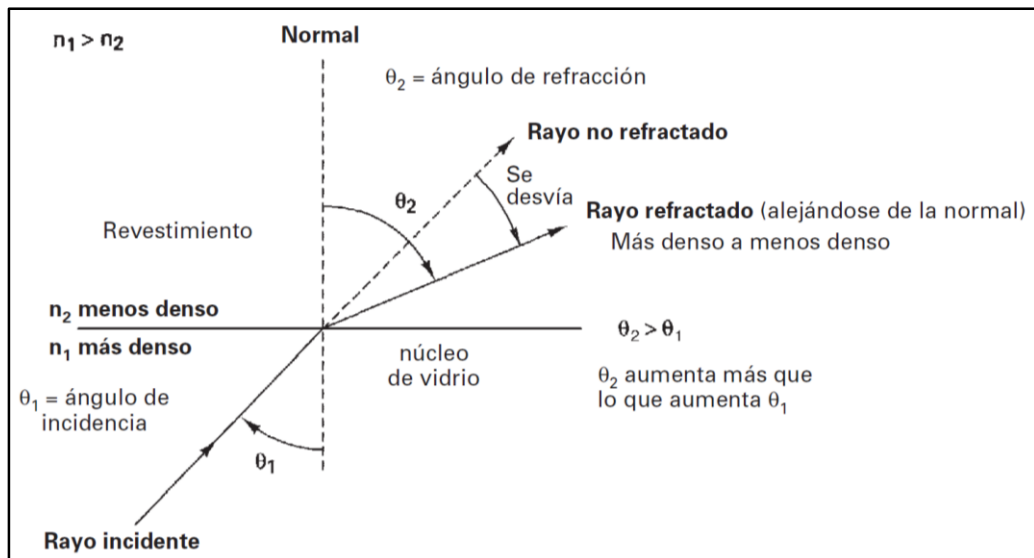


Figura 3. Rayo de luz que se refracta alejándose de la normal.

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.432.

Se ve que el rayo de luz cambia de dirección en la interfaz, y que el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. En consecuencia, cuando un rayo de luz entra a un material menos denso, cambia de dirección alejándose de la normal. De igual manera, cuando un rayo de luz entra a un material más denso, se desvía hacia la normal.

El ángulo crítico se define como el ángulo de incidencia mínimo en el cual un rayo de luz puede llegar a la interfaz entre dos medios y tener un ángulo de refracción de  $90^\circ$  o mayor. Esta definición sólo se aplica cuando el rayo de luz pasa de un medio más denso a uno menos denso. Si el ángulo de refracción es  $90^\circ$  o menor, el rayo de luz no puede penetrar en el material menos denso. En consecuencia, se produce la reflexión total en la interfaz, y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

La figura 4 muestra un caso en el que un rayo incidente forma un ángulo tal que el ángulo de refracción es  $90^\circ$ , y el rayo refractado va por la interfaz. Es importante observar que el rayo de luz va de un medio de mayor índice de refracción a un medio con menor índice.

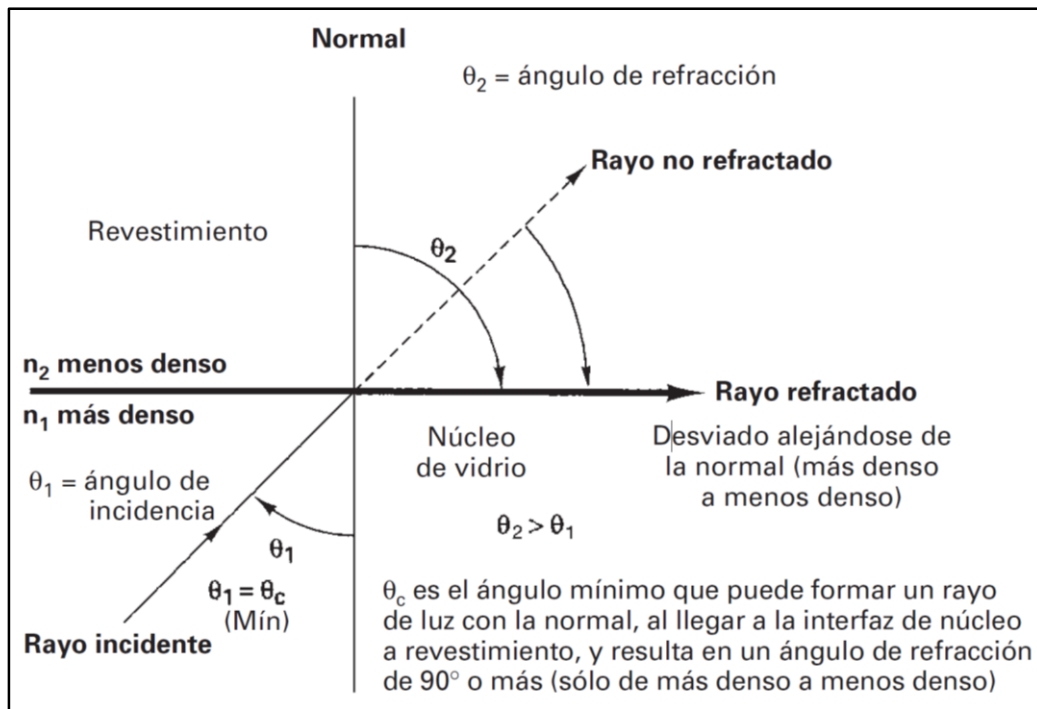


Figura 4. Refracción en ángulo crítico.

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.433.

La figura 5 muestra una comparación entre los ángulos de refracción y de reflexión, cuando el ángulo de incidencia es menor que, o mayor que el ángulo crítico.

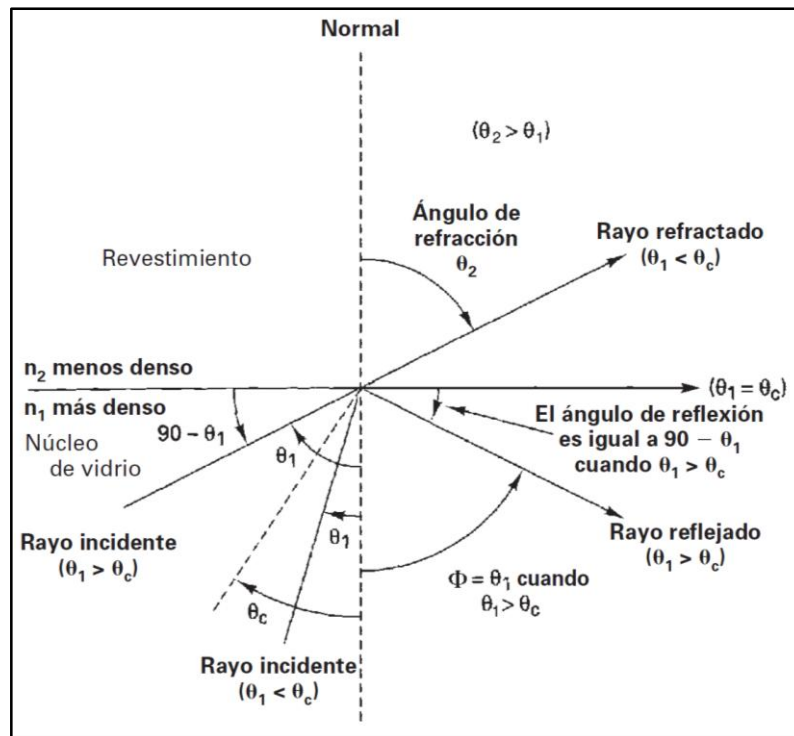


Figura 5. Ángulos de reflexión y de refracción

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.434.

### *Propagación de la luz a través de la fibra óptica*

La luz se puede propagar por un cable de fibra óptica por reflexión o por refracción. La forma en que se propague depende del modo de propagación y del perfil de índice(s) de la fibra.

La palabra modo simplemente quiere decir camino. Si sólo hay una trayectoria que pueda tener la luz por el cable, se llama modo único, o unimodal. Si hay más de una trayectoria, se llama modo múltiple o multimodal.

La figura 6 muestra la propagación de luz en modo único y en multimodo, por una fibra óptica.

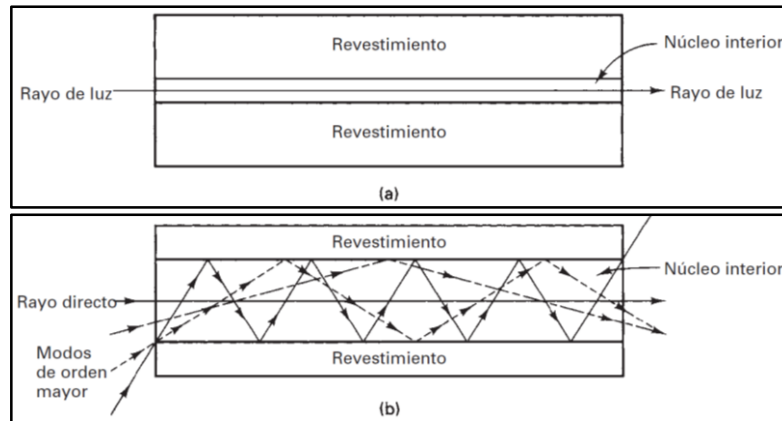


Figura 6. Modos de propagación: (a) unimodal; (b) multimodal

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.434.

El perfil índice de una fibra óptica es una representación gráfica del índice de refracción en la sección transversal de la fibra.

La figura 7 muestra los perfiles índices del núcleo para tres clases de cables.

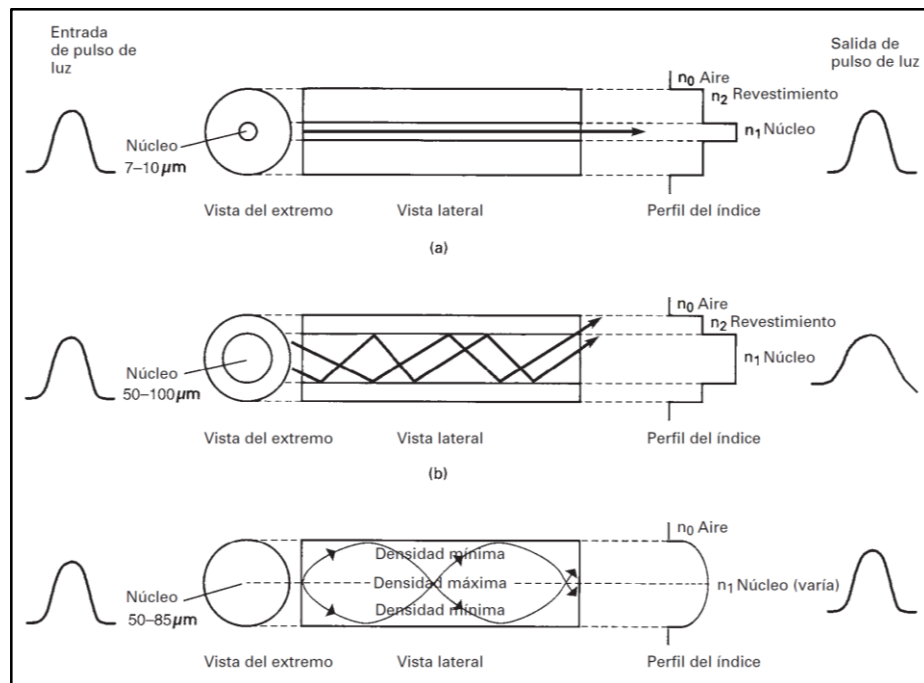


Figura 7. Perfiles de índice en el núcleo: (a) unimodal, índice escalonado; (b) multimodal, índice escalonado; (c) multimodal, índice graduado

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.435.

Hay dos tipos básicos de perfiles índice: escalonados y graduados. Una fibra de índice escalonado tiene un núcleo central con índice de refracción uniforme. Este núcleo está rodeado por un revestimiento externo con índice de refracción uniforme, pero menor que el del núcleo central. Se ve en la figura 7 que en una fibra de índice escalonado hay un cambio abrupto de índice de refracción en la interfaz entre núcleo y revestimiento. En una fibra de índice graduado no hay revestimiento, y el índice de refracción del núcleo no es uniforme; es máximo en el centro y disminuye en forma gradual de acuerdo con la distancia hacia la orilla externa.

### *Pérdidas en los cables de fibra óptica*

Es probable que la pérdida de potencia en un cable de fibra óptica sea la característica más importante del cable. Con frecuencia se llama atenuación a la pérdida de potencia, y produce una pérdida de potencia de la onda luminosa al atravesar el cable. La atenuación tiene varios efectos adversos sobre el funcionamiento, que incluyen la reducción del ancho de banda del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema (Tomasi, 2003).

La fórmula normal con la que se expresa la pérdida total de potencia en un cable de fibra es:

$$A(dB) = 10 \log \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \quad \dots \text{Ecuación 3}$$

En la que:

$A(dB)$  = reducción total de potencia (atenuación)

$P_{sal}$  = potencia de salida del cable (watts)

$P_{ent}$  = potencia de entrada al cable (watts)

Aunque la pérdida total de potencia es de principal importancia, la atenuación de un cable óptico se expresa, en general, en decibelios de pérdida por unidad de longitud. La atenuación se representa con un valor positivo de dB, porque por definición es una pérdida.

La potencia óptica, en watts, medida a determinada distancia a una fuente de potencia, se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = P_t \times 10^{-A \cdot l / 10} \quad \dots \text{Ecuación 4}$$

en la que:

P = valor medido de la potencia (watts)

P<sub>t</sub> = valor de la potencia de transmisión (watts)

A = pérdidas de potencia en el cable (dB/km)

l = longitud del cable (km)

De igual manera, la potencia óptica, en decibelios, es:

$$P(\text{dBm}) = P_{\text{ent}}(\text{dBm}) - A * l \quad \dots \text{Ecuación 5}$$

en la que: P = valor medido de la potencia (dBm)

P<sub>ent</sub> = potencia de transmisión (dBm)

A = pérdidas de potencia en el cable (dB/km)

En general, las fibras multimodales tienden a tener mayores pérdidas de atenuación que los cables unimodales, debido principalmente a la mayor dispersión de la onda luminosa, producida por las impurezas.

La tabla 1 muestra la potencia de salida como porcentaje de la potencia de entrada para un cable de fibra óptica a distintos valores de pérdida en decibelios.

Tabla 1

Potencia de salida en función de la pérdida

	<b>Relación de pérdida</b>									
Pérdida (dB)	1	3	6	9	10	13	20	30	40	50
Potencia de salida (%)	79	50	25	12.5	10	5	1	0.1	0.01	0.001

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.443.

La tabla 2 es una lista de atenuaciones, en dB/km, para diversos tipos de cables de fibra.



Tabla 2

Atenuación en el cable de fibra óptica

Tipo de cable	Diámetro de núcleo (µm)	Diámetro del revestimiento (µm)	Numero de Apertura (Adimensional)	Atenuación (dB/Km)
Unimodal	8	125	-	0.5@1300nm
	5	125	-	0.4@1300nm
Índice graduado	50	125	0.2	4@1300nm
	100	140	0.3	5@1300nm
Índice escalonado	200	380	0.27	6@1300nm
	300	440	0.27	6@1300nm
PCS	200	350	0.3	10@1300nm
	400	550	0.3	10@1300nm
Plástico	-	750	0.5	400@1300nm
	-	1000	0.5	400@1300nm

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.443.

Las pérdidas de transmisión en los cables de fibra óptica son una de las características más importantes de la fibra. Las pérdidas en la fibra causan una reducción de la potencia luminosa y, en consecuencia, reducen el ancho de banda del sistema, la rapidez de transmisión de información, la eficiencia y la capacidad general del sistema. Las principales pérdidas en la fibra son:

1. Pérdidas por absorción.
2. Pérdidas por dispersión en material o de Rayleigh.
3. Dispersión cromática, o de longitudes de onda.
4. Pérdidas por radiación.
5. Dispersión modal.
6. Pérdidas por acoplamiento

1. La pérdida por absorción en las fibras ópticas es análoga a la disipación de potencia en los cables de cobre; las impurezas en la fibra absorben la luz y la convierten en calor. El vidrio ultrapuro que se usa para fabricar las fibras ópticas tiene, aproximadamente, 99.9999% de pureza.

Sin embargo, son normales las pérdidas por absorción de 1 a 1000 dB/km.

2. Pérdidas en material, o por dispersión de Rayleigh: Durante el proceso de manufactura, el hilo se trefila formando fibras largas de un diámetro muy pequeño. Durante ese proceso, el vidrio se encuentra en un estado plástico: ni sólido ni líquido. La tensión aplicada al vidrio durante ese proceso hace que en el enfriamiento se desarrollen irregularidades submicroscópicas, que se incorporan a la fibra en forma permanente. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan con una de esas impurezas, se difractan. La difracción hace que la luz se disperse o se abra en muchas direcciones. Algo de la luz difractada continúa recorriendo la fibra, y algo escapa a través del revestimiento. Los rayos luminosos que salen representan una pérdida de potencia. A todo esto, se le llama pérdida por dispersión de Rayleigh.

3. El índice de refracción de un material depende de la longitud de onda. Los diodos emisores de luz (LED) emite luz que contiene una combinación de longitudes de onda. Cada una de ellas, en la señal de luz compuesta, viaja a distinta velocidad. En consecuencia, los rayos de luz que emite al mismo tiempo un LED y se propagan por una fibra óptica no llegan al extremo opuesto al mismo tiempo. Esto da como resultado una señal recibida distorsionada; la distorsión se llama distorsión cromática. Se puede eliminar usando una fuente monocromática, como por ejemplo un diodo láser de inyección (ILD). La dispersión cromática o de longitudes de onda sólo se presenta en fibras con transmisión unimodal.

4. Las pérdidas por radiación se deben principalmente a pequeños cambios de dirección y dobleces de la fibra. En esencia hay dos tipos de dobleces: los microdobleces y los dobleces con radio constante. El microdoblamiento se debe a diferencias en las velocidades de contracción térmica del núcleo y del material de revestimiento. Un microdoblez es un doblez o imperfección geométrica en miniatura del eje de la fibra, que representa una discontinuidad en ella en donde puede presentarse la dispersión de Rayleigh. Las pérdidas en microdobleces en general constituyen menos de 20% de la atenuación en una fibra. Los dobleces

de radio constante se deben a demasiada presión y tensión y, en general, se presentan cuando se doblan las fibras durante su manejo o instalación.

5. La dispersión modal, o ensanchamiento del pulso se debe a la diferencia en los tiempos de propagación de rayos de luz que van por diferentes trayectorias en una fibra. Es obvio que la dispersión modal sólo puede presentarse en las fibras multimodales. Se puede reducir en forma considerable usando fibras de índice graduado, y se puede eliminar casi con el uso de fibras unimodales de índice escalonado.

La dispersión modal puede causar que un pulso de energía luminosa se reparta al propagarse por una fibra. Si el ensanchamiento del pulso tiene la gravedad suficiente, el pulso puede quedar encimado al siguiente (un ejemplo de interferencia entre símbolos). En una fibra multimodal de índice escalonado, un rayo de luz que se propaga en forma directa por el eje de la fibra tarda el menor tiempo en recorrer la fibra. Un rayo de luz que llega a la interfaz núcleo-revestimiento, en el ángulo crítico, sufrirá la cantidad máxima de reflexiones internas y, por consiguiente, tardará el mayor tiempo en recorrer la fibra.

$$E_c = D_c * W * L * f_o \quad \dots \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$E_c$ : Ensanchamiento cromático

$D_c$ : Coeficiente de dispersión cromática en ps/ (nm.Km )

$W$ : Ancho espectral de la fuente de luz a -3Db

6. En los cables de fibra pueden presentarse pérdidas por acoplamiento en cualquiera de los tres tipos siguientes de uniones ópticas: conexiones de fuente luminosa a fibra, conexiones de fibra a fibra y conexiones de fibra a fotodetector. Las pérdidas en las uniones se deben, con más frecuencia, a uno de los siguientes problemas de alineación: desalineamiento lateral, desalineamiento de entrehierro, desalineamiento angular y acabados superficiales imperfectos.

En la figura 8 los tipos más comunes de defectos en el alineamiento de la fibra óptica.

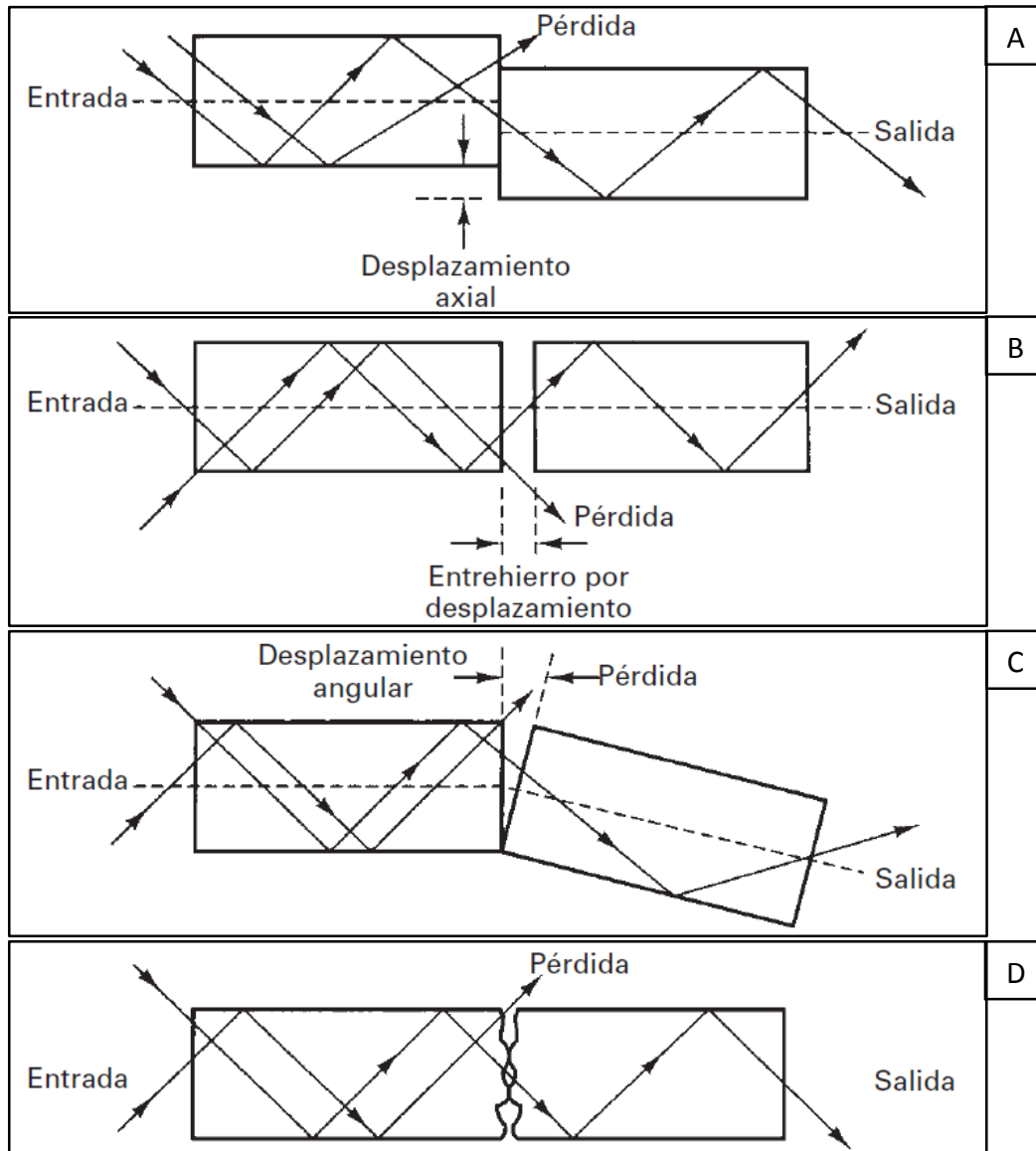


Figura 8. Defectos en el alineamiento de las fibras: (a) desalineamiento lateral; (b) desalineamiento de entrehierro; (c) desalineamiento angular; (d) acabado superficial  
Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.450.

Desalineamiento lateral. Éste se ve en la figura 8a, y es el desplazamiento lateral o axial entre dos tramos de cables de fibra adjuntos. La cantidad de pérdida puede ser desde un par hasta varias décimas de decibelio, o hasta varios decibelios. Esta pérdida suele ser despreciable si los ejes de las fibras se alinean a menos de 5% del diámetro de la fibra menor.

Desalineamiento de entrehierro. Se ve en la figura 8b, y a veces se llama separación entre extremos. Cuando se hacen empalmes en fibras ópticas, las fibras se deben tocar realmente.

Mientras más alejadas queden, la pérdida de luz será mayor. Si dos fibras se unen con un conector, los extremos no se deben tocar, porque al frotarse entre sí en el conector se podrían dañar una o las dos fibras.

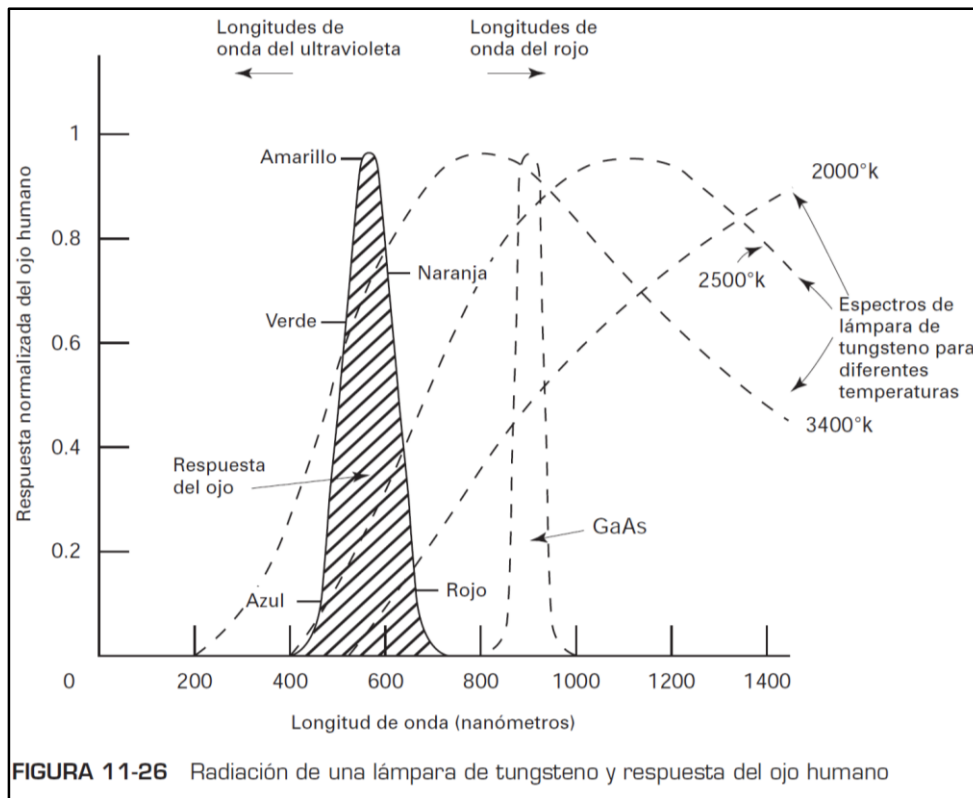
Desalineamiento angular. Éste se ve en la figura 8c, y a veces se llama desplazamiento angular. Si el desplazamiento angular es menor que  $2^\circ$ , la pérdida será menor que 0.5 dB.

Acabado superficial imperfecto. Se ve en la figura 8d. Los extremos de las dos fibras adjuntas deben estar muy pulidos y asentar entre sí. Si los extremos de las fibras están menos de  $3^\circ$  fuera de la perpendicular, las pérdidas serán menores que 0.5 dB.

### *Fuentes luminosas*

El intervalo de frecuencias luminosas que detecta el ojo humano ocupa un segmento muy angosto del espectro total de frecuencias electromagnéticas. Por ejemplo, la luz azul ocupa las longitudes de onda más cortas de la luz visible, y los tonos rojos ocupan las longitudes de onda más largas (Tomasi, 2003).

La figura 9 muestra la distribución de longitudes de onda de la luz producida por un foco de tungsteno, y el intervalo de longitudes de onda perceptibles al ojo humano. Como se ve allí, el ojo humano puede detectar sólo aquellas longitudes de onda entre 380 nm y 780 nm. Además, la luz consiste en muchos tonos de los colores, que se relacionan en forma directa con la energía calorífica que se irradia. También se ve en la figura que se produce más luz visible a medida que aumenta la temperatura del foco.



**FIGURA 11-26** Radiación de una lámpara de tungsteno y respuesta del ojo humano

*Figura 9.* Radiación de una lámpara de tungsteno y respuesta del ojo humano

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.451.

Las fuentes luminosas que se usan en los sistemas de fibra óptica deben tener longitudes de onda que se propaguen con eficiencia en la fibra óptica. Además, se debe considerar el intervalo de longitudes de onda, porque mientras más amplio sea el intervalo, será más probable que se presente la dispersión cromática. Las fuentes luminosas deben producir la potencia suficiente para permitir que la luz se propague por la fibra sin causar distorsiones no lineales en ella ni en el receptor. Por último, la fuente luminosa se debe fabricar de tal manera que su salida se pueda acoplar con la fibra en forma eficiente (Tomasi, 2003).

La intensidad luminosa se puede expresar en términos tanto fotométricos como radiométricos. La fotometría es la ciencia de medir sólo las ondas luminosas visibles al ojo humano. Por otro lado, la radiometría mide la luz en todo el espectro electromagnético.

En términos fotométricos, la intensidad luminosa se describe con más frecuencia en términos de densidad de flujo luminoso, y se mide en lúmenes por unidad de área. Sin embargo, con frecuencia son más útiles los términos radiométricos para el ingeniero y el técnico. En términos radiométricos, la potencia óptica mide la tasa con la que las ondas electromagnéticas transfieren energía luminosa. En términos sencillos, la potencia óptica se describe como el flujo de energía luminosa que atraviesa determinado punto en un tiempo especificado. La potencia óptica se define con la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia} = \frac{d(\text{energía})}{d(\text{tiempo})}$$

O sea 
$$P = \frac{dQ}{dt} (\text{watts}) \quad \dots \text{Ecuación 7}$$

En donde:

$P = \text{potencia óptica (watts)}$

$dQ = \text{carga instantánea (joules)}$

$dt = \text{cambio instantáneo de tiempo (segundos)}$

A veces, a la potencia óptica se le llama flujo radiante ( $\phi$ ), que equivale a joules por segundo, y es la misma potencia que se mide eléctrica o térmicamente en watts. Los términos radiométricos se usan en general con fuentes luminosas cuyas potencias van de decenas de microwatts hasta más de 100 miliwatts. La potencia óptica se suele expresar en decibelios relativos a un valor definido de potencia, como 1 mW (dBm) o 1  $\mu$ W (dB $\mu$ ). Las ecuaciones correspondientes son:

$$dBm = 10 \log \frac{P(\text{watts})}{0.001 \text{ watt}} \quad \dots \text{Ecuación 8}$$

$$dB\mu = 10 \log \frac{P(\text{watts})}{0.000001 \text{ watt}} \quad \dots \text{Ecuación 9}$$

### *Fuentes ópticas*

En esencia sólo hay dos dispositivos que se usan con frecuencia para generar luz en sistemas de comunicaciones con fibra óptica: diodos emisores de luz (LED) y diodos de láser de inyección (ILD, de injection laser diode). Ambos dispositivos tienen sus ventajas y desventajas. Los LED normales tienen anchos espectrales de 30 a 50 nm, mientras que los láseres de inyección sólo tienen anchos espectrales de 1 a 3 nm (1 nm corresponde a una frecuencia aproximada de 178 GHz). Por consiguiente, una fuente luminosa de 1320 nm con ancho de raya espectral de 0.0056 nm tiene una amplitud de banda de frecuencias aproximada de 1 GHz. El ancho de raya es el equivalente, en longitudes de onda, del ancho de banda.

La preferencia hacia un dispositivo emisor de luz respecto a otro se determina con los requisitos económicos y de funcionamiento del sistema. El mayor costo de los diodos de láser se compensa con una mayor eficiencia, mientras que los diodos emisores de luz, normalmente, tienen menor costo y menor eficiencia.

### *Detectores de luz*

Hay dos dispositivos que se suelen usar para detectar la energía luminosa en los receptores de comunicación con fibra óptica: los diodos PIN (tipo p - tipo n intrínseco) y los APD (fotodiodos de avalancha).

Un diodo PIN es un fotodiodo de capa de agotamiento, y es probable que sea el dispositivo más usado como detector de luz en los sistemas de comunicaciones con fibra óptica.

El fotodiodo de avalancha (APD, de avalanche photodiode) es una estructura pipn. Son más sensibles que los diodos PIN y requieren menos amplificación adicional. Las desventajas de los APD son los tiempos de tránsito relativamente grandes, y ruido adicional, generado internamente, debido al factor de multiplicación por avalancha (Tomasi, 2003).



Según Tomasi (2003), las características más importantes de los detectores de luz son:

1. Responsividad. La responsividad es una medida de la eficiencia de conversión de un fotodetector. Es la relación de la corriente de salida de un fotodiodo entre la potencia óptica que le entra, y tiene unidades de amperes/watt. En general, se menciona la responsividad a una determinada longitud de onda o frecuencia.

2. Corriente oscura. La corriente oscura es la corriente de reposo que pasa por un fotodiodo cuando no hay entrada luminosa. Se debe a portadores generados térmicamente en el diodo.

3. Tiempo de tránsito. Es el tiempo que tarda un portador inducido por la luz en cruzar la región de agotamiento. Este parámetro determina la máxima frecuencia posible de bits con determinado fotodiodo.

4. Respuesta espectral. Es el intervalo de longitudes de onda que se puede usar con determinado fotodiodo. En general, la respuesta espectral relativa se grafica en función de la longitud de onda o de la frecuencia. La figura 33 es un ejemplo ilustrativo de una curva de respuesta espectral. Se puede ver que este fotodiodo en particular absorbe con mayor eficiencia la energía dentro del intervalo de 800 a 820 nm.

5. Sensibilidad a la luz. En esencia, esta sensibilidad es la potencia óptica mínima que puede recibir un detector para producir una señal eléctrica útil de salida. La sensibilidad a la luz se acostumbra mencionar para determinada longitud de onda, ya sea en dBm o en dB (p.460)

### *Láseres*

La tecnología láser se centra en la concentración de luz en forma de haces muy pequeños y poderosos. Básicamente, según Tomasi (2003), hay cuatro tipos de láser: de gas, líquido, sólido y de semiconductor.

1. Láseres de gas. Los láseres de gas usan una mezcla de helio y neón encerrada en un tubo de vidrio. Cuando se descarga una corriente en el gas se emite un flujo de ondas luminosas coherentes (de una frecuencia) a través del acoplador de salida. La salida de onda luminosa continua es monocromática (de un color).
2. Láseres de líquido. En estos láseres se usan colorantes orgánicos encerrados en un tubo de vidrio, como medio activo. El colorante se hace circular con una bomba dentro del tubo. Un pulso poderoso de luz excita al colorante orgánico.
3. Láseres de sólido. En ellos se usa un cristal cilíndrico y macizo, como el rubí, como medio activo. Cada extremo del rubí está pulido y paralelo al otro. El rubí se excita con una lámpara de tungsteno conectada a una fuente de poder de corriente alterna. La salida del láser es una onda continua.
4. Láseres de semiconductor. Estos láseres se fabrican con semiconductores de unión p-n y se suelen llamar diodos de láser de inyección (ILD, de injection laser diode). El mecanismo de excitación es un suministro de corriente directa que controla la cantidad de corriente al medio activo. La luz de salida de un ILD se modula con facilidad, y eso lo hace muy útil en muchas aplicaciones de comunicaciones electrónicas (p.461)

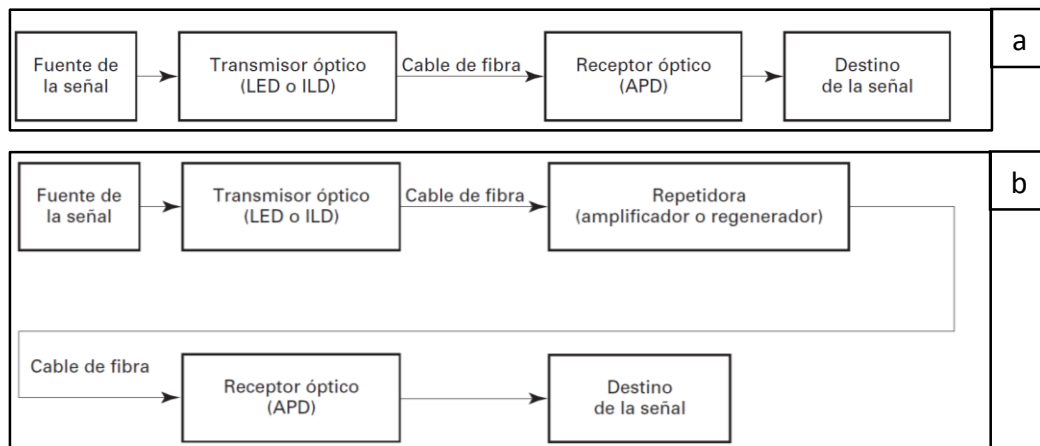
Todas las clases de láser tienen varias características comunes: 1) todos usan un material activo que convierte la energía en luz láser, 2) una fuente de bombeo que proporciona la potencia o energía, 3) el sistema óptico para dirigir el haz que se va a amplificar a través del material, 4) el sistema óptico para dirigir el haz en forma de un cono de divergencia angosto y potente, 5) un mecanismo de retroalimentación para obtener funcionamiento continuo, y 6) un acoplador de salida, para transmitir la potencia que sale del láser (Tomasi, 2003, p.461).

La radiación de un láser es extremadamente intensa y direccionada. Cuando se enfoca en forma de un haz capilar muy fino, puede concentrar su potencia. Si se permitiera diverger al haz de luz, perdería la mayor parte de su potencia.

### *Provisión para enlace en el sistema de fibra óptica*

Como en cualquier sistema de comunicaciones, los sistemas de fibra óptica consisten en una fuente y un destino, que están separados por numerosos componentes y dispositivos que introducen diversas cantidades de pérdida o de ganancia a la señal, al propagarse a través del sistema.

La figura 10 muestra dos configuraciones normales de sistema de comunicaciones con fibra óptica.



*Figura 10.* Sistemas de comunicación por fibra óptica: (a) sin repetidores; (b) con repetidoras

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.463.

En la figura 10(a) se ve un sistema sin repetidoras, en donde la fuente y el destino se interconectan a través de uno o más tramos de cable óptico. En un sistema sin repetidoras no hay amplificadores ni regeneradores entre la fuente y el destino.

La figura 10(b) representa un sistema de fibra óptica que incluye una repetidora que puede amplificar o regenerar la señal. Los sistemas con repetidora se usan, claro está, cuando la fuente y el destino están separados por grandes distancias.

Las necesidades de enlace se calculan en general entre una fuente luminosa y un detector de luz; en consecuencia, para nuestro ejemplo, se buscan provisiones para un sistema sin repetidoras.

Éste consiste en una fuente luminosa, como un LED o un ILD, y un detector de luz, como por ejemplo un APD, conectados con fibra óptica y conectores. En consecuencia, la provisión de enlace consiste en una fuente de potencia luminosa, un detector de luz y diversas pérdidas en el cable y conectores. Sobre las pérdidas características de los enlaces de fibra óptica, Tomasi (2003), incluye las siguientes:

1. Pérdidas en el cable. Las pérdidas en el cable dependen de la longitud, del material y de la pureza del material del cable. En general, se especifican en dB/km, y pueden variar desde décimas de dB hasta varios dB por km.
2. Pérdidas en el conector. A veces se usan conectores mecánicos para unir dos tramos de cable. Si la conexión mecánica no es perfecta, puede escapar energía luminosa y causar una reducción de la potencia óptica. Las pérdidas en el conector suelen variar entre unas décimas de dB hasta 2 dB para cada conector.
3. Pérdida en interfaz de fuente a cable. La interfaz mecánica que se usa para contener la fuente de luz y fijarla al cable casi nunca es perfecta. En consecuencia, un pequeño porcentaje de la potencia óptica no se acopla al cable, y representa una pérdida de potencia en el sistema de algunas décimas de dB.
4. Pérdida en interfaz de cable a detector de luz. La interfaz mecánica para contener el detector de luz y fijarlo al cable tampoco es perfecta

y, en consecuencia, evita que un pequeño porcentaje de la potencia que sale del cable entre al detector de luz. Esto, naturalmente, representa una pérdida para el sistema, que suele ser de algunas décimas de dB.

5. Pérdida en empalmes. Si se requiere más que un tramo continuo de cable, se pueden fundir (empalmar) los tramos. Como los empalmes no son perfectos, se pueden introducir pérdidas que van desde un par de décimas de dB hasta varios dB en la señal.
  
6. Doblecetes del cable. Cuando un cable óptico se dobla formando un ángulo muy agudo, sus características internas cambian radicalmente. Si los doblecetes son grandes, ya no se lograrán las reflexiones totales de algunos de los rayos de luz, y se refractarán. La luz refractada en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento entra al revestimiento y causa una pérdida neta de la señal, de algunas décimas de dB hasta varios dB (Tomasi, 2003, pág. 463).

Como en cualquier provisión de enlace o de sistema, la potencia útil disponible en el receptor depende de la potencia de transmisión y de las pérdidas en el enlace. La ecuación correspondiente es:

$$P_r = P_t - \text{pérdidas} \quad \dots \text{Ecuación 10}$$

en donde:

$$P_r = \text{potencia recibida (dBm)}$$

$$P_t = \text{potencia transmitida (dBm)}$$

$$\text{pérdidas} = \text{suma de todas las pérdidas (dB)}$$

### **Comunicaciones por multiplexación de señal**

La comunicación por multiplexado de señal es la transmisión de información (en cualquier forma) de más de una fuente a más de un destino a través del mismo medio (instalación) de transmisión.

Aunque las transmisiones sucedan en la misma instalación, no necesariamente suceden al mismo tiempo. El medio de transmisión puede ser un par de alambres metálicos, un cable coaxial, un teléfono móvil PCS, un sistema de microondas terrestres de radio, uno de microondas satelitales o un cable de fibra óptica (Tomasi, 2003, p.708).

Hay varios dominios en los que puede hacerse el multiplexado, incluyendo espacio, fase, tiempo, frecuencia y longitud de onda. (Tomasi, 2003) afirma que:

El multiplexado por división de espacio (SDM, de spacedivision multiplexing) es una forma bastante sencilla de multiplexar, que sólo consiste en propagar señales de distintas fuentes por distintos cables, que están contenidos en la misma cepa.

Se considera que la cepa es el medio de transmisión. La manipulación QPSK es una forma de multiplexado por división de fase (PDM, de phase-division multiplexing) en la que dos canales de datos (el I y el Q) modulan la misma frecuencia de portadora, que se ha desplazado  $90^\circ$  en fase. Así, los bits del canal I modulan una onda senoidal portadora, mientras que los bits del canal Q modulan una onda portadora cosenoidal. Después de haberse hecho la modulación, se combinan linealmente las portadoras I y Q y se propagan al mismo tiempo por el medio de transmisión, que puede ser un cable o el espacio libre. (p.708)

Por otra parte, los tres métodos más predominantes para multiplexar señales son el de multiplexado por división de tiempo (TDM, de time-division multiplexing), por división de frecuencia (FDM, de frequency-division multiplexing) y el desarrollado en fecha más reciente, por división de longitud de onda (WDM, de wavelength-division multiplexing). En este caso se usa el método de multiplexado por longitud de onda.

El multiplexado por división de longitud de onda (WDM, de wavelength-division multiplexing) se llama a veces multiplexado por división de onda. Como la longitud de onda y la frecuencia se relacionan en forma estrecha, el multiplexado por división de longitud de onda se parece al de división de frecuencia (FDM). Se parecen porque se trata de mandar señales de información que ocupen la misma banda de frecuencias, a través de la misma fibra y al mismo tiempo, sin que interfieran entre sí. Esto se logra modulando diodos láser de inyección que transmiten ondas luminosas muy concentradas a distintas longitudes de onda, es decir, a distintas frecuencias (Tomasi, 2003, p.754).

Por consiguiente, el WDM es acoplar la luz de dos o más longitudes de onda discretas para que entre y salga de una fibra óptica. Cada longitud de onda es capaz de llevar grandes cantidades de información, sea analógica o digital, y la información puede estar ya multiplexada por división de tiempo o de frecuencia. Aunque la información que se usa con los láseres casi siempre consiste en señales digitales multiplexadas por división de tiempo, en la separación de longitudes de onda que se usa con el WDM es análoga a los canales analógicos de radio que funcionan a distintas frecuencias de portadora.

La figura 11 muestra los principios básicos de la propagación de señales WDM a través de su respectivo medio de transmisión.

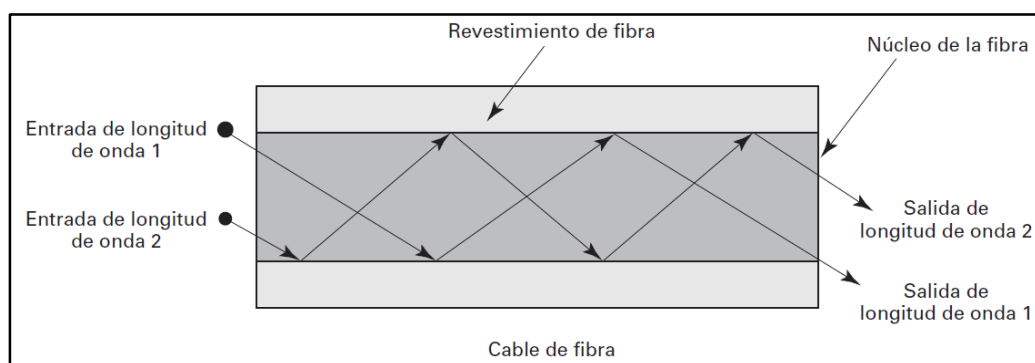


Figura 11. Multiplexado por división de longitud de onda

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.755.

El WDM se logra en general a las longitudes de ondas aproximadas de 1550 nm ( $1.55 \mu\text{m}$ ) y las frecuencias sucesivas separadas por múltiplos de 100 GHz; es decir, son 100 GHz, 200 GHz, 300 GHz. En 1550 nm y una separación de frecuencias de 100 GHz, la separación de longitudes de onda aproximada es 0.8 nm. Por ejemplo, tres longitudes de onda adyacentes, separadas entre sí por 100 GHz, corresponden a longitudes de onda de 1550.0 nm, 1549.2 nm y 1548.4 nm. Si se usa una técnica de multiplexada llamada multiplexado por división de onda densa (D-WDM, de dense-wave-division multiplexing), la distancia entre las frecuencias adyacentes es bastante menor. Sin embargo, parece no haber definición oficial exacta de qué significa D-WDM, pero en general, se consideran como WDM normales a los sistemas ópticos que conducen varias señales ópticas distanciadas más de 200 GHz o 1.6 nm, en la proximidad de 1550 nm, y a los sistemas WDM que conducen varias señales ópticas cerca de 1550 nm con separación menor que 200 GHz se les considera D-WDM. Se deduce que, cuanto más longitudes de onda se usen en un sistema WDM, más se acercarán entre sí, y el espectro de longitudes de onda será mayor (Tomasi, 2003).

Las ondas luminosas tienen muchas frecuencias (longitudes de onda) y cada frecuencia corresponde a un color diferente. Se han desarrollado transmisores y receptores, para fibras ópticas, que sólo transmiten y reciben un color específico, es decir, una longitud de onda específica, con una frecuencia específica y ancho de banda fijo. El WDM es un proceso en el que distintas fuentes de información (canales) se propagan por una fibra óptica a distintas longitudes de onda, que no interfieren entre sí. En esencia, cada longitud de onda forma un "carril" óptico de la supercarretera de transmisión, y mientras más carriles haya, se puede conducir más tráfico (de voz, datos, video, etc.) por un solo cable de fibra óptica. En contraste, los sistemas convencionales de fibra óptica sólo tienen un canal por cable, que se usa para llevar información que ocupa un ancho de banda relativamente pequeño (Tomasi, 2003).



La figura 12 muestra cómo se combinan (multiplexan) las longitudes de onda de seis láseres y a continuación se propagan por un solo cable de fibra óptica, para después separarse (demultiplexarse) en el receptor con acopladores selectivos de longitud de onda.

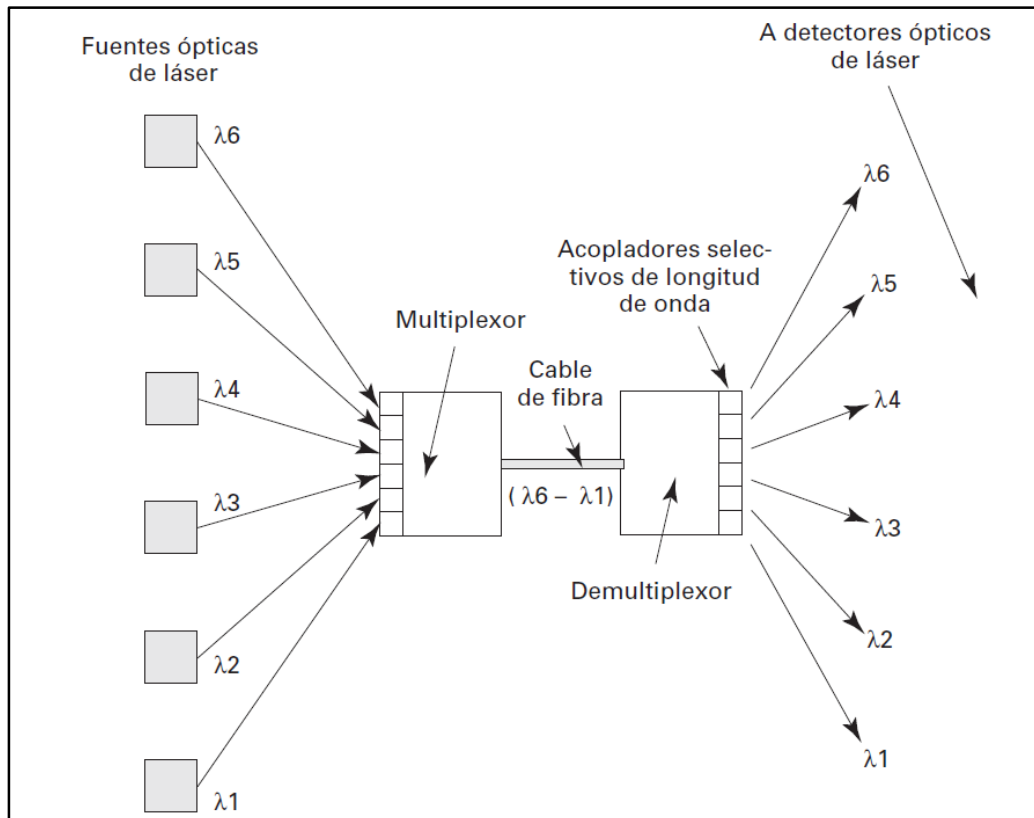


Figura 12. Multiplexado y demultiplexado de 6 láseres.

Fuente: Recuperado de "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", de Tomasi, W., 2003, p.755.

El multiplexado por división de longitud de onda amplía el desempeño de la fibra óptica añadiendo canales a los cables existentes. Cada longitud de onda agregada corresponde a agregar un canal distinto, con su propia fuente de información y su propia rapidez de transmisión de bits. Así, el WDM puede ampliar la capacidad de conducción de información de una fibra hasta miles de gigabits por segundo o más.

Una ventaja obvia del WDM es su mayor capacidad, y con ese multiplexado, también es posible la transmisión dúplex con una sola fibra. Además, en las redes de comunicaciones se usan componentes ópticos

que son más sencillos, más fiables y con frecuencia menos costosos que sus contrapartes electrónicas. El WDM tiene la ventaja de ser, en forma inherente, más fácil de reconfigurar, es decir, agregar o quitar canales. Por ejemplo, se han instalado redes de área local con WDM que permiten a los usuarios entrar a la red sólo sintonizando cierta longitud de onda.

Sin embargo, WDM tiene sus limitaciones. No se pueden poner las señales tan cercanas en el espectro de longitudes de onda, porque se interfieren. Su proximidad depende de los parámetros de diseño del sistema, como por ejemplo si se usa amplificación óptica, y qué técnica de amplificación se usa para combinar y separar las señales de distintas longitudes de onda. La Unión Internacional de Telecomunicaciones adoptó una retícula patrón de frecuencias para D-WDM, con una separación de 100 GHz o de múltiplos enteros de 100 GHz, lo cual, a 1550 nm, corresponde a una separación aproximada de longitudes de onda de 0.8 nm.

En el WDM la intensidad general de la señal debería ser aproximadamente igual para cada longitud de onda. Esta intensidad se ve influida por las características de atenuación de la fibra, y por el grado de amplificación; estos dos parámetros dependen de la longitud de onda. Bajo condiciones normales, las longitudes de onda seleccionadas para un sistema se separan tan poco entre sí que la atenuación varía muy poco entre ellas (Tomasi, 2003).

Por lo anterior, se pueden transmitir en forma simultánea señales de radio a muchos destinos, mientras que las ondas luminosas que conducen el WDM se limitan a un circuito de dos puntos, o a una combinación de muchos circuitos de dos puntos, que sólo pueden estar donde van los cables.

La capacidad de información de una sola fibra óptica se puede aumentar  $n$  veces, donde  $n$  representa cuántas longitudes de onda distintas se propagan por la fibra al mismo tiempo. Cada longitud de onda en un sistema WDM está modulada por señales de información de distintas fuentes. Por consiguiente, un sistema de comunicaciones que

use un solo cable de fibra óptica que propague  $n$  longitudes de onda distintas debe utilizar  $n$  moduladores y  $n$  demoduladores.

Los multiplexores o combinadores mezclan o combinan las señales ópticas con distintas longitudes de onda, en una forma que les permite a todas ellas pasar a través de una sola fibra óptica sin interferirse entre sí. Los demultiplexores o divisores separan las señales de distintas longitudes de onda, en forma parecida a como los filtros separan las señales eléctricas de distintas frecuencias. Los demultiplexores por longitud de onda tienen tantas salidas como longitudes de onda manejen, y cada salida (longitud de onda) va a un destino distinto. Los multiplexores y demultiplexores son los extremos terminales de los sistemas de comunicaciones de fibra óptica. Estos multiplexores y demultiplexores son parecidos a los normales, pero se ubican en puntos intermedios del sistema. Los multiplexores y demultiplexores de agregar y quitar son dispositivos que separan una longitud de onda de un cable de fibra, y la pasan a otra fibra que va en dirección distinta. Una vez quitada una longitud de onda, se puede reemplazar por una nueva señal de esa misma longitud. En esencia, los multiplexores que pueden agregar y quitar se usan para reconfigurar cables de fibra óptica (Tomasi, 2003).

Los enrutadores WDM dirigen las señales de determinada longitud de onda a un destino específico, sin separar todas las longitudes de onda presentes en el cable. Así, un enrutador se puede usar para dirigir o redirigir determinada o determinadas longitudes de onda a direcciones distintas de las demás longitudes de onda en la fibra.

Los acopladores WDM permiten el uso más eficiente de las posibilidades de transmisión de las fibras ópticas, al permitir combinar y separar longitudes de onda diferentes. Hay tres tipos básicos de acopladores WDM: rejilla de difracción, prisma y filtro dicróico. En las rejillas de difracción o los prismas, las longitudes de onda específicas se separan del resto de la señal óptica variando su dirección en distintos

ángulos. Una vez separada una longitud de onda, se puede acoplar en una fibra distinta. Un filtro dicróico es un espejo cuya superficie se recubre con un material que sólo permite pasar una longitud de onda, y refleja las demás. Por consiguiente, el filtro dicróico puede permitir acoplar dos longitudes de onda en distintas fibras ópticas.

### **Instalaciones o tendidos de cables aéreos**

La instalación de un cable entre dos puntos A y B forma una curva a la cual se denomina catenaria. Esta curva se genera por efecto propio de las características del cable y las fuerzas mecánicas que interactúan entre los puntos que lo soportan y las fuerzas de tensión que se ejercen para su sujeción (Checa, 2004).

La longitud de una curva catenaria desde un punto A hasta el punto más bajo de la catenaria, en general, se calcula de la siguiente manera:

$$S = C * \operatorname{Senh} \left( \frac{x}{C} \right) \quad \dots \text{Ecuación 11}$$

La figura 13 muestra un esquema general de situaciones donde se forman curvas catenarias en tendidos de líneas eléctricas de transmisión.

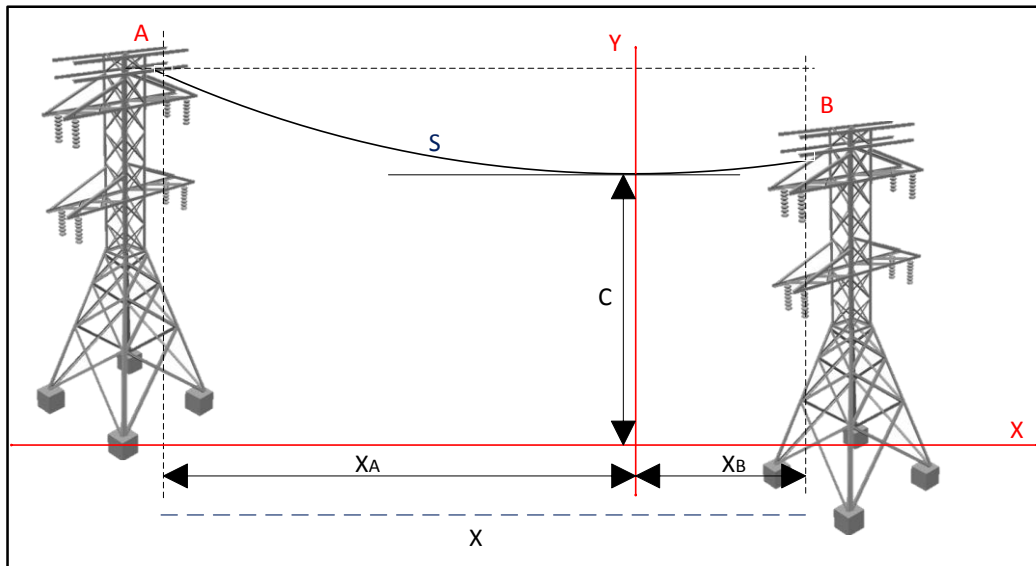


Figura 13: Formación de catenarias

Fuente: Elaboración propia

Partiendo del ejemplo de la figura 13, y, considerando que la altura de la torre A es  $Y_A$  y la altura de la torre B es  $Y_B$ , la ecuación que permita calcular la longitud de la línea S está definida de la siguiente manera:

$$S = C * \text{Senh}\left(\frac{X_A}{C}\right) + C * \text{Senh}\left(\frac{X_B}{C}\right) \quad \dots\text{Ecuación 12}$$

Asimismo, el parámetro de la catenaria C se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{T_0}{W_0} \quad \dots\text{Ecuación 13}$$

Donde:

$T_0$  = tensión que se ejerce en el punto más bajo de la catenaria

$W_0$  = peso del cable

### Estándar IEEE C37.94

IEEE C37.94-2017, con título completo IEEE Standard para N veces 64 Kbps Interfaces de fibra óptica entre Teleprotección y Equipo Multiplexor, (título original en inglés IEEE C37.94-2017 - IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer

Equipment) es un estándar IEEE, publicado en 2002, que define las reglas para interconectar dispositivos de teleprotección y multiplexores de compañías eléctricas. El estándar define un formato de marco de datos para la interconexión óptica, y los estándares de referencia para el conector físico para fibra óptica multimodo. Además, define el comportamiento del equipo conectado en caso de falla del enlace, y las características de temporización y señal óptica.

Los sistemas de teleprotección deben aislar fallas muy rápidamente para evitar daños a la red y cortes de energía. El comité IEEE definió C37.94 como una interfaz de fibra óptica multimodo programable  $n \times 64 \text{ kbit / s}$  ( $n = 1, 2, 8, 12$ ) para proporcionar comunicaciones transparentes entre relés de teleprotección y multiplexores para distancias de hasta 2 km. Para alcanzar distancias más largas, la industria de la energía adoptó luego también una interfaz de fibra óptica de modo único.

La norma define los equipos de protección y comunicaciones dentro de una subestación utilizando fibras ópticas, el método de recuperación de reloj, las tolerancias de fluctuación permitidas en las señales, el método de conexión física y las acciones que el equipo de protección debe seguir cuando existan anomalías y fallas en la red. C37.94 ya fue implementado por muchos fabricantes de relés de protección como ABB, SEL, SIEMENS, RFL y RAD. El equipo de teleprotección ofreció alguna vez una selección de interfaces de transmisión, como la interfaz de fibra óptica compatible con IEEE C37.94 para transmisión sobre pares de fibra, y las interfaces G.703, 64kbit / s codireccionales y E1.

La figura 14 muestra un esquema general de sistemas de teleprotección de líneas eléctricas de transmisión usando las normas del estándar IEEE C37.94.

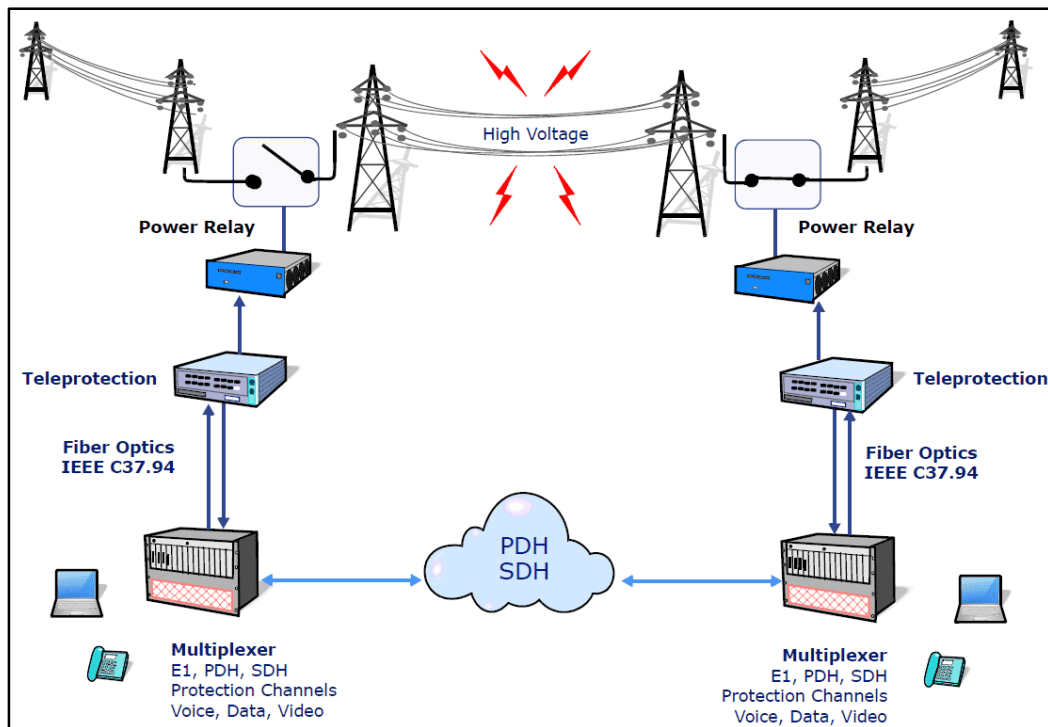


Figura 14. Esquema de teleprotección usando el estándar IEEE C37.94

Fuente: Elaboración propia

El estándar IEEE C37.94, describe las siguientes pautas a tener en consideración para en las comunicaciones de un sistema de teleprotección conectado por fibra multimodo a un multiplexor.

#### *Estructura de la trama*

La estructura de trama está diseñada para permitir el paso de información en formato de paquete desde el multiplexor al equipo de teleprotección y desde la teleprotección al equipo multiplexor. Manteniendo como características importantes que el patrón de bits tendría aproximadamente la misma cantidad de unos y ceros (para la transmisión a través de circuitos ópticos acoplados a ca); mientras la estructura del cuadro debe ser idéntica en ambas direcciones, es decir, la trama tiene el mismo tamaño y formato, independientemente del número de intervalos de tiempo de 64 kbps que se utilicen. La trama es de 256 bits y se repite a una velocidad de cuadro de 8000 Hz, sien que la tasa de bits resultante es 2048 kbps. (IEEE, 2017)

La figura 15 muestra la estructura para una trama de 256 bits en un intervalo de 125µs.

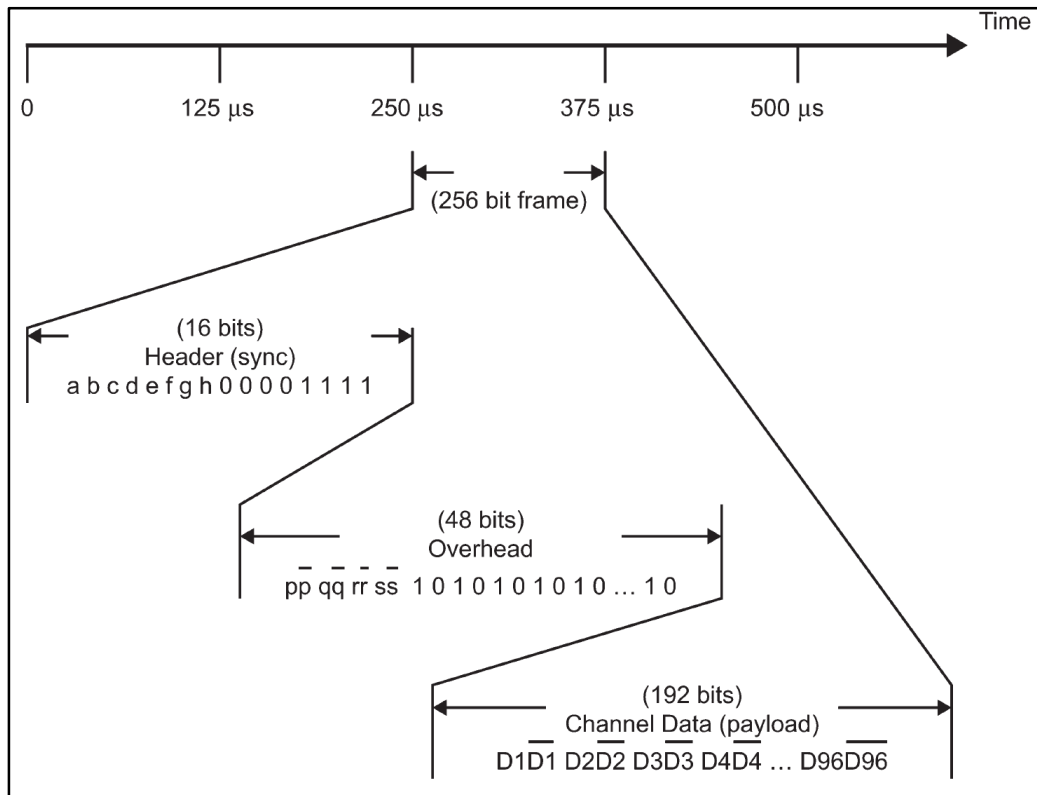


Figura 15. Estructura de la trama

Fuente: Recuperado de "IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer Equipment, 2017", de IEEE, 2017, p.11.

Analizando la trama entre cada una de las partes que la componen, el marco consta de tres secciones: el encabezado, los datos generales y los datos del canal. (IEEE, 2017).

**Cabecera:** La cabecera de 16 bits es un patrón de bits único para permitir que el receptor se sincronice con el fotograma de 256 bits. El encabezado es de 16 bits con el siguiente formato:



a b c d e f g h 0 0 0 0 1 1 1 1

Los primeros ocho bits a, b, c, d, e, f, g, h forman uno de dos patrones que se alternan con cualquier otro cuadro. Esto se hace para garantizar el cumplimiento con UIT-T G.704 [B4].

Los dos patrones son los siguientes:

Pattern 1: a b c d e f g h = 1 0 0 1 1 0 1 1

Pattern 2: a b c d e f g h = 1 1 y 1 1 1 1 1

y = Yellow Alarm bit

= 0 for normal;

= 1 if receiving bad signal (LOS declared)

Los segundos ocho bits son 0 0 0 0 1 1 1 1 en cada cuadro.

El receptor adquirirá sincronización de cuadros por coincidencia de patrones con 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1. (IEEE, 2017)

**Data de sobrecabecera:** Esta sección de 48 bits incluye bits para proporcionar información entre el multiplexor y el equipo de teleprotección. Cada bit de datos va seguido de su complemento (para 24 bits de información reales). (IEEE, 2017).

En la Tabla 3 se encuentran los datos asignados actualmente comprenden lo siguiente

Tabla 3.

Data de sobrecabecera de un bit

Data bit	Definition
p,q,r,s	Uno o cero datos que dependen del valor de N utilizado, donde N = 1 a 12. (p = bit más significativo) por ejemplo, 0,0,0,1 para N = 1, 0,0,1,0 para N = 2, 1,1,0,0 para N = 12

Fuente: Recuperado de "IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer Equipment, 2017", de IEEE, 2017, p.12.

**Dato de canal:** Esta sección de 192 bits comprende 96 bits de datos, con cada bit de datos seguido de su complemento.

Los primeros bits de datos  $N \times 8$  llevan los datos  $N \times 64$  kbps.

Los restantes 96 bits de datos ( $N \times 8$ ) se establecen en 1. (IEEE, 2017)

**Alineación de ruta de la trama:** Tenga en cuenta que este estándar no requiere que el equipo multiplexor proporcione alineaciones de cuadro de extremo a extremo; es decir, no es necesario que el primer bit de datos D1 de una trama en el sitio de origen aparezca como el primer bit de datos D1 de la trama en el sitio de destino. (IEEE, 2017)

#### *Sincronización del reloj*

La señal óptica comprende una modulación binaria (on-off) con un bit de 2048 kbps una secuencia con los requisitos de temporización como la frecuencia, fluctuación y latencia.

**Frecuencia:** La frecuencia será de 2048 kbps + - 100ppm.

Cada unidad final del multiplexor no utilizará la señal del equipo de teleprotección para la sincronización.

Cada unidad final del equipo de teleprotección usará la señal de la unidad del multiplexor para la sincronización; luego de la pérdida de señal, la unidad funcionará libremente con la tolerancia anterior.

Cada unidad final del multiplexor deberá ser capaz de detectar correctamente el bit "amarillo" superior, incluso cuando la unidad final del multiplexor haya perdido la sincronización (debido a la pérdida de la entrada óptica).

a) La unidad de multiplexor normalmente recibe datos del equipo de teleprotección, a la misma frecuencia que los datos de salida de la unidad de multiplexor, pero durante el fallo de la fibra de salida, la

unidad de multiplexor debe aceptar datos de entrada de hasta  $\pm 100$  ppm de frecuencia de desconexión (detectar el encuadre, los bits de arriba y los bits de datos). Se reconoce que ser asíncrono del multiplexor hará que los bits se pierdan, o se llenen (como en una interfaz ITU-T G.703 asíncrona de 64 kbps), pero esto se considera preferible al silenciamiento de los datos.

- b) El equipo de teleprotección debe poder recibir señales con una tolerancia de frecuencia de hasta  $\pm 100$  ppm en su entrada óptica, y usar esto para la frecuencia de sus señales de salida al multiplexor. Si su entrada es mala o se pierde, el equipo de teleprotección deberá usar una referencia interna con  $\pm 100$  ppm de tolerancia

**Fluctuación (Jitter):** Para la salida de la unidad del multiplexor, la fluctuación de fase debe estar dentro de  $\pm 50$  ns ( $\pm 0.1$  UI).

Para la salida del equipo de teleprotección, la fluctuación de fase debe estar dentro de  $\pm 100$  ns ( $\pm 0.2$  UI). (Esto permite que su circuito de recuperación de reloj agregue  $\pm 50$  ns a la fluctuación de fase que recibe).

El receptor de la unidad del multiplexor deberá tolerar una fluctuación de  $\pm 100$  ns.

Para aclaración, lo anterior requiere que, si los datos se observan en un osciloscopio activado en transiciones ascendentes o descendentes, la próxima transición debe ser de un mínimo de 438 ns para la salida de unidad de multiplexor y un mínimo de 388 ns a 438 ns para la salida del equipo de teleprotección (dependiendo de la fluctuación de fase en sus datos de entrada).

**Latencia (Wander):** La unidad del multiplexor podrá funcionar con cualquier retardo de ida y vuelta con una latencia máxima de  $\pm 250$  ns ( $\pm 0,5$  UI) pico a pico.

### *Niveles de salida óptica*

#### Multimodo:

La potencia media en fibra multimodo de 50 um será  $> -23.0$  dBm y  $< -11.0$  dBm.

La potencia óptica media en fibra multimodo de 62.5 um será  $> -19.0$  dBm y  $< -11.0$  dBm.

El formato de datos está lighth "ON" para los bits lógicos "1".

La potencia óptica para los bits lógicos "0" debe ser  $< 10\%$  del nivel para la lógica "1". Esto corresponde a una relación de extinción de  $> 10$  dB.

#### Monomodo:

La potencia óptica media en fibra monomodo será  $> -19,0$  dBm y  $< -11,0$  dBm.

El formato de datos está encendido "ENCENDIDO" para los bits lógicos "1".

La potencia óptica para los bits "0" lógicos será  $< 10\%$  del nivel para los bits "1" lógicos. Esto corresponde a una relación de extinción de  $> 10$  dB.

### *Longitudes de onda*

Longitud de onda (multimodo): La longitud de onda de emisión central será de  $830 + -40$  nm.

longitudes de onda (monomodo): La longitud de onda de emisión del centro será de  $1310 + -40$  nm.

### *Sensibilidad del receptor óptico*

Rango de funcionamiento (multimodo y monomodo): El receptor funcionará libre de errores (BER  $< 1E-9$ ) para una potencia óptica media entre  $-32.0$  dBm y  $-11.0$  dBm.

### *Conectores ópticos*

Conectores ópticos (multimodo): Se deben usar conectores ópticos "BFOC / 2.5" (ver IEC 60874-10-1).

Conectores ópticos (monomodo): El tipo de conector óptico no está especificado. Se permite cualquier tipo de conector.

#### *Sistema de protección diferencial de línea*

Las protecciones diferenciales son sistemas absolutamente selectivos. El principio básico consiste en la medida de la magnitud y del ángulo de las corrientes que entran en el área de protección. Durante condiciones normales (sin falla) la suma es cero.

Este sistema de protección requiere telecomunicación entre los terminales de línea. El medio de transmisión más común para esta protección es el hilo piloto, lo que significa que esta protección es utilizada para líneas cortas. Hoy en día, la protección diferencial longitudinal se ha utilizado para líneas largas usando un sistema de telecomunicaciones por microondas o preferiblemente fibra óptica (Martinez, 2017).

Esta protección también requiere del sistema de telecomunicaciones para efectuar su función básica. Sin comunicación no hay protección y, por lo tanto, un sistema de protección relativamente selectivo se utiliza como complemento.

#### **Definiciones de Términos Básicos**

Sistemas de comunicaciones: Es el conjunto de equipos interconectados a través de un medio de comunicación de modo tal que permiten la transmisión de información de un extremo a otro.

Protección diferencial de línea: Son equipos que están destinados a detectar las corrientes de defecto a tierra que pudieran producirse en una instalación disparando la apertura de contacto en un tiempo mínimo para garantizar la seguridad de la línea, y todo aquello que se encuentre circundante.

IEEE C37.94: una interfaz óptica para el uso entre teleprotección y equipo multiplexor digital Palabras clave que pueden operar a una velocidad de datos de  $N \times 64$  kbps donde  $N = 1, 2 \dots 12$  se describe en esta norma. Los requisitos para la conexión física y el tiempo de comunicación también están incluidos (IEEE, 2017).

Relé: Dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual se disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador.

Subestación eléctrica: Es una instalación destinada a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

COES SINAC: Es una entidad privada, sin fines de lucro y con personería de Derecho Público. Está conformado por todos los Agentes del SEIN (Generadores, Transmisores, Distribuidores y Usuarios Libres) y sus decisiones son de cumplimiento obligatorio por los Agentes. Su finalidad es coordinar la operación de corto, mediano y largo plazo del SEIN al mínimo costo, preservando la seguridad del sistema, el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, así como planificar el desarrollo de la transmisión del SEIN y administrar el Mercado de Corto Plazo (COES, 2018).

SCADA: es un concepto que se emplea para realizar un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

Se detalla según la siguiente estructura.

### **3.1. Tipo Y Método De Investigación**

Se describe a continuación:

#### **Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo aplicada, porque tiene como objeto resolver el problema de proponer un medio de comunicación adecuado para soportar la protección de línea basado en el estándar IEEE C37.94 entre la S.E. San Gabán II y la S.E. Azángaro en la situación en las que estas mantengan hasta el año 2018.

#### **Nivel de la investigación**

El nivel de la presente investigación será explicativo; ya que busca acercarse a un problema intentando encontrar las causas de la misma.

## CAPÍTULO IV: DISEÑO DE INGENIERÍA

Para el diseño de la ingeniería es importante entender cómo funciona todo el sistema completo del medio de comunicaciones, por ello se ha dispuesto el siguiente esquema, con la finalidad de proporcionar una manera simple y sencilla de comprenderlo.

En la figura 16 se muestra un esquema referencial de las características generales del medio de fibra óptica entre la SE San Gabán y Azángaro, pasando por la SE Antauta.

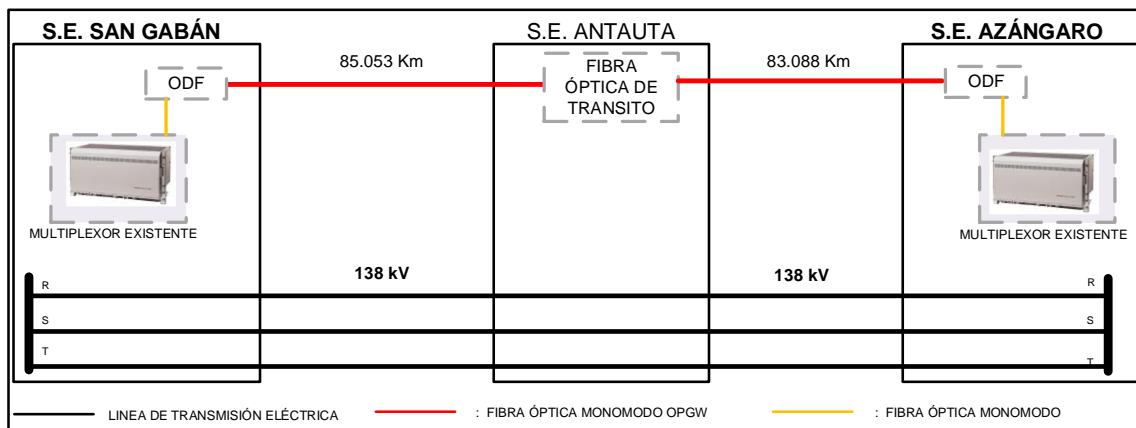


Figura 16: Características del medio de comunicación existente

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se resumen algunos datos importantes a tomar en consideración para los cálculos. Así, en la tabla 4 se hace una descripción de las distancias que guardan entre si las líneas de transmisión que llevan la energía que genera la SE San Gabán hasta la SE Azángaro.

Tabla 4

Características de las líneas de transmisión

CÓDIGO	DESDE	HASTA	LONGITUD
L-1009	San Rafael	Azángaro	89.3 Km
L-1010	San Gabán II	Azángaro	159.1 Km
L-1013	San Gabán II	San Rafael	76.4 Km

Fuente: Elaboración propia



En la tabla 5 se muestran los medios de comunicación con los que cuenta la EGESGSA para llevar la información y protección desde la S.E. San Gabán II hasta la S.E. Azángaro.

*Tabla 5*  
Enlaces de comunicación San Gabán II - Azángaro

MEDIO	DESDE	HASTA	
		PUNTO INTERMEDIO	DESTINO FINAL
Onda Portadora	San Gabán II		Azángaro
Onda Portadora	San Gabán II	San Rafael	Azángaro
Fibra Óptica	San Gabán II	Antauta	Azángaro

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de los datos mencionados se realizan los siguientes cálculos para determinar las características del diseño:

#### 4.1. Cálculos de atenuación y pérdida

Como se observa en la tabla 4 y 5, hay dos rutas de comunicación entre la S.E. San Gabán y la S.E. Azángaro, pero solo una cuenta con fibra óptica, la ruta que pasa por la SE Antauta. Esta, actualmente alberga un equipo repetidor de señal para elevar el nivel de potencia y permitir que la información llegue de manera óptima hasta ambos extremos del enlace.

Uno de los primeros puntos a resolver es el retiro de la repetidora en la S.E. Antauta, debido que su existencia involucra altos costos de mantenimiento y operación, además de generar más rutas críticas en el análisis y solución de problemas. Además, el medio de comunicación entre la S.E. San Gabán y la S.E. Azángaro debe ser limpio y transparente de punto a punto, de esa manera se evita las dificultades técnicas en el correcto funcionamiento del canal que soporte el estándar IEEE C37.94.

Con la consideración de lo mencionado, el segundo punto a resolver es la necesidad de superar las atenuaciones que genera el medio de fibra óptica entre ambos extremos; para ello, es importante conocer cuál es el valor de esa atenuación. En ese sentido, además de las ecuaciones 3 y 4 para conocer cuánto es la pérdida por atenuación del medio de comunicación, entendiendo como medio de comunicación a la fibra óptica monomodo OPGW tendida desde el pórtico de la S.E. San Gabán hasta el pórtico de la S.E. Azángaro, también se puede calcular de la siguiente forma:

$$At = Afo + Ae + Ac \quad \dots \text{Ecuación 14}$$

At: atenuación del enlace o trayecto

Afo: atenuación por longitud de fibra óptica

Ae: atenuación por empalmes

Ac: atenuación por conectores

Cabe mencionar, en este punto, que el diseño se realizará partiendo de cálculos teóricos que luego serán contrastados con mediciones reales para conocer la evolución de los factores externos que afectan a los parámetros del diseño, y a partir de ello establecer márgenes de ajuste para asegurar el correcto desempeño del sistema de comunicaciones en, por lo menos, los próximos 10 años.

### **Cálculo de la longitud de fibra óptica**

Para calcular la longitud total de fibra óptica total es necesario conocer la forma en que se hace la instalación de la misma. Las torres están separadas entre sí en distintos niveles de referencia y a diferentes distancias, ante ello, la manera matemática de calcular la longitud de la fibra óptica a usar es:

$$Lfo = \sum_1^n Lc + \sum_1^2 Lp + \sum_1^2 Lg \quad \dots \text{Ecuación 15}$$

Lfo: longitud total de fibra óptica monomodo

Lc: longitud de fibra formada por catenarias

Lp: longitud de fibra desde las catenarias extremas hasta el p3rtico

Lg: longitud de fibra desde el p3rtico hasta el gabinete del multiplexor

En la figura 17 se muestra un esquema referencial de la formaci3n de catenarias en la red de tendido de fibra 3ptica.

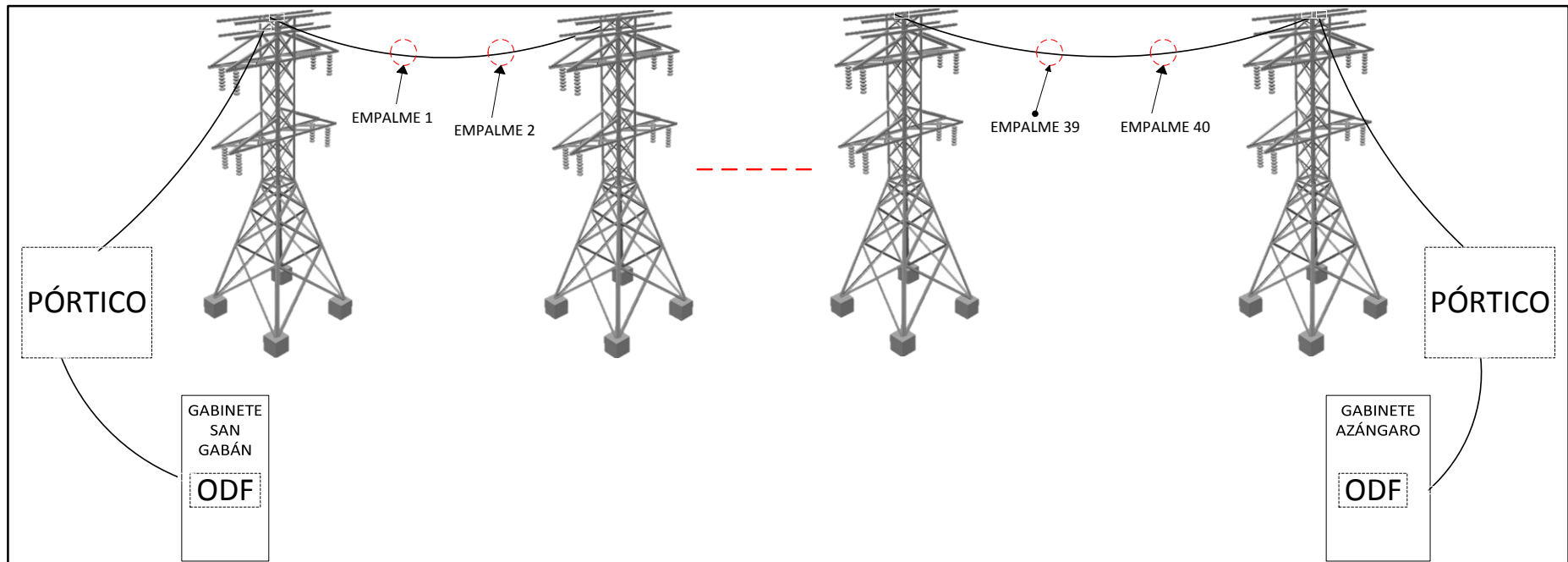


Figura 17: Esquema de tendido de fibra óptica OPGW

Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 se esquematiza la conformación de catenarias y con la ayuda de la ecuación 12 y 13 se puede realizar el cálculo matemático de catenaria en catenaria. A este nivel, eso se vuelve impráctico, por lo que se recurre al uso de softwares que permiten hacer el cálculo de las longitudes máximas de cables que se debe usar en relación a las longitudes horizontales de la trayectoria de la línea de alta tensión.

Según la práctica se ha comprobado que estos valores son óptimos cuando se encuentran entre el 3% y el 5% de la longitud horizontal. Para fines de asegurar que los cálculos aseguren el óptimo desempeño del sistema de comunicaciones, se castiga con el extremo superior de la tolerancia. En tal sentido se tiene que:

$$L_c = (85.053Km + 83.088Km) * 1.05$$

$$L_c = 176.548Km \quad \dots Ecuación 16$$

También se debe considerar que las producciones de los carretes de fibra óptica entregan longitudes máximas de 4.5Km, entonces, será necesario hacer empalmes cada 4.5Km. de fibra óptica. Según la ecuación 13 se tiene:

$$Número\ de\ carretes = \frac{176.548Km}{4.5Km}$$

$$Número\ de\ carretes = 39.233 \approx 40 \quad \dots Ecuación 17$$

Se debe considerar 40 carretes porque no se venden fracciones de carretes para este tipo de fibra óptica, además de que el excedente cubrirá pérdidas de longitud producidas al momento de los empalmes y escoltas, siendo estos un total equivalente a 30 metros de fibra por cada extremo del carrete. Entonces, el cálculo sería el siguiente:

$$Lee = 30 * 2 * 40$$

$$Lee = 2400m \approx 2.400Km \quad \dots Ecuación 18$$

Lee: longitud por empalmes y escoltas

Finalmente se considera una longitud de acometida que normalmente abarca una longitud entre los 300m a 500m y consta del trayecto comprendido desde el p3rtico hasta el ordenador de fibra 3ptica (ODF). Entendiendo ello, se deber3a adicionar un promedio de 500m de cable de fibra, en el caso m3s cr3tico, por cada extremo de todo el trayecto.

$$L_p = 500m * 2$$
$$L_p = 1000m \approx 1.000Km \quad \dots Ecuaci3n 19$$

Con los c3lculos de las longitudes de cable de fibra 3ptica monomodo OPGW comprometida en cada circunstancia de la l3nea tenemos la longitud total de fibra 3ptica y con ello el esquema aproximado de cada tramo:

$$L_{fo} = 184.955Km + 2.400Km + 1.000Km$$
$$L_{fo} = 179.948Km \quad \dots Ecuaci3n 20$$

### **C3lculo de atenuaci3n por longitud de fibra 3ptica**

Para calcular la atenuaci3n que se genera por la longitud total de la fibra 3ptica instalada, se toma como referencia los resultados de los c3lculos anteriores:

$$A_{fo} = L_{fo} * F_a \quad \dots Ecuaci3n 21$$

Fa: factor de atenuaci3n de la fibra 3ptica

Para ello es importante reconocer que el factor de atenuaci3n de la fibra 3ptica var3a seg3n la ventana de longitud de onda en la que se vaya a trabajar. (Arapey, 2009). T3picamente a 1300 nm se tiene una atenuaci3n entre 0.32 a 0.4 dB/km, mientras que a 1550 nm la atenuaci3n es del orden de 0.22 a 0.25 dB/km.

Normalmente, estos valores los entrega el fabricante del cable de fibra óptica, pero, para este caso de estudio se trabajará en la tercera ventana, con una longitud de onda de 1550nm, por los niveles más bajos de atenuación que presenta el medio en esta ventana, aproximadamente 0.25 dB/Km.

Entonces, el cálculo sería el siguiente:

$$A_{fo} = 188.355Km * 0.25dB/Km$$
$$A_{fo} = 44.987dB \quad \dots Ecuación 22$$

### **Cálculo de atenuación por empalmes**

Para el cálculo de atenuación por empalmes hacemos referencia al cálculo anterior sobre el número de carretes de fibra óptica que se van a usar para cubrir todo el trayecto, siendo un total de 40 carretes. Estos deben ser empalmados por arco fusión, con la finalidad de reducir los niveles de pérdida de señal por atenuación y seguridad en la maniobrabilidad de los cables empalmados.

En tal sentido, es necesario hacer un total de 41 empalmes desde la ODF de la S.E. San Gabán hasta la ODF de la S.E. Azángaro, siendo la atenuación promedio por empalme menor a 0.1dB. (ITU, 2000, págs. 18-22)

$$A_e = \# \text{ de empalmes} * \text{pérdida por empalme}$$

$$A_e = 41 * 0.1dB$$
$$A_e = 4.1dB \quad 39 \quad \dots Ecuación 23$$

### **Cálculo de atenuación por conectores**

Para calcular la atenuación por conectores, es necesario considerar que todo el medio de comunicación necesita un conector en cada ODF.

Es importante reconocer que los conectores usados en las terminaciones de las ODF de esta industria suelen ser de tipo SC y estos, por ser conectores con espacio de aire, normalmente tienen pérdidas de 0.4 a 0.5 dB. (THEFOA, 2014).

El número de conectores es generalmente de dos a cada lado del enlace. Entonces, para el cálculo de la atenuación por pérdidas en los conectores, tenemos:

$$Ac = \# \text{ de conectores} * \text{atenuación del conector}$$

$$Ac = 4 * 0.5dB$$

$$Ac = 2.0dB \quad \dots \text{Ecuación 24}$$

Retomando la ecuación 13 se tiene que:

$$At = 47.987 + 4.100 + 2.000 \text{ dB}$$

$$At = 51.087 \text{ dB} \quad \dots \text{Ecuación 25}$$

A partir de este cálculo se hace una comparativa de valores, para entender cómo evoluciona el nivel de pérdida por atenuación en la línea, partiendo desde el año de su instalación (año 1999 según el anexo N° 1) hasta el año 2018 (año de ejecución del estudio presente y con mediciones adjuntas en el Anexo N° 3). También es importante recordar que sobre los cálculos teóricos se establecerán márgenes de ajuste para asegurar el correcto desempeño del sistema de comunicaciones en, por lo menos, los próximos 10 años.

## **4.2. Cálculos de potencia de recepción**

Para calcular la potencia en la recepción es necesario hacer un balance de potencia en la recepción, esto consiste en estudiar la potencia óptica disponible en el emisor en relación con las diferentes pérdidas, márgenes y penalidades, con el objeto de asegurar que la potencia que llegará al detector, aún en el peor



caso, permitirá satisfacer los objetivos de calidad impuestos por el usuario de acuerdo a las normas internacionales. Eventualmente deberá proveerse amplificación óptica para conseguir el objetivo anterior.

Usando los datos de potencia acoplada en la fibra, la atenuación kilométrica de la fibra y las pérdidas en conectores y empalmes a lo largo del enlace, se llega a una estimación de la potencia en la entrada del receptor óptico:

$$Pr = Pt - At \quad \dots \text{Ecuación 26}$$

Pr: Potencia en entrada de receptor óptico en dBm.

Pt: Potencia acoplada en entrada de la fibra en dBm.

En este cálculo se considera valores pesimistas, es decir, se debe usar la potencia acoplada mínima  $P_t$  especificada por el fabricante y el coeficiente de atenuación máximo  $A_{fo}$  garantizado por el fabricante a la longitud de onda considerada.

En caso de que la potencia que llega al detector sea excesiva, de acuerdo a lo establecido por el fabricante del detector (normalmente entre -10 y -12 dBm), será necesario colocar un atenuador óptico en el enlace. Habitualmente se instala acoplado a algunos de los conectores que van a las tarjetas del equipo.

La expresión anterior sirve para estimar la potencia en recepción. Sin embargo, para el balance de potencia es necesario incluir además márgenes y penalidades, como se analiza a continuación.

### **Márgenes de sistema (Mr)**

En el diseño del enlace es necesario incluir los siguientes siguientes:

- Margen del cable óptico ( $M_{co}$ )
- Margen de equipos ( $M_e$ )
- Margen de seguridad ( $M_s$ )

Los márgenes de cable se refieren a las reparaciones, las modificaciones futuras que pudieran aumentar el número de conectores y empalmes en el enlace, las variaciones de las características de la fibra óptica debidas a cambios ambientales y las degradaciones en los conectores, los cuales fueron considerados en el cálculo de Lee (ecuación 18).

Los márgenes de equipos incluyen la degradación de la potencia inyectada, debida al envejecimiento de la fuente de luz y a variaciones de sus características con la temperatura y a la variación de la sensibilidad del receptor, debida también a cambios en las características de los elementos optoelectrónicos. Estos vienen considerados dentro del tiempo de vida útil que garantiza el fabricante.

El margen de seguridad es un valor fijado por el diseñador que puede considerar cualquier aspecto no incluido anteriormente y que pueda derivarse de situaciones especiales del proyecto específico. Normalmente se asume 3 dB, pero en este caso de estudio se tiene conocimiento de las necesidades de la EGESG y el margen que esperan conseguir en su línea de comunicaciones es de 7dB.

Entonces:

$$Mr = 7dB$$

Mr: Margen del sistema.

### **Penalidades**

En el balance de potencia, se incluyen normalmente penalidades por reflexión y de dispersión.

La penalidad por reflexión (Preflex) toma en cuenta la pérdida debido a la reflexión en el interfaz fibra–fotodiodo de recepción. Considerada no mayor de 0.5 dB.

Concretamente las penalidades de dispersión consideradas en casos prácticos son del orden de 0.5 dB.

$$P_n = P_{reflex} + P_d = 0.5 + 0.5 \text{ dB} = 1.0 \text{ dB} \quad \dots \text{Ecuación 27}$$

P<sub>n</sub>: Penalidades

### **Potencia mínima en enlaces**

Para que la detección permita una tasa de error BER, o una razón señal a ruido S/N específica, el detector óptico requiere una potencia mínima (en dBm) llamada sensibilidad del detector (P<sub>rmin</sub>) a este valor mínimo necesario. La sensibilidad depende del tipo de recepción usado, de la longitud de onda y de la tasa de bit del enlace. En general, para el diseño de enlaces, se usa la sensibilidad indicada por el fabricante del equipo receptor.

Incluyendo todos los factores analizados, el balance de potencia y pérdidas toma la forma siguiente:

$$\begin{aligned} P_t - P_{rmin} &\geq A_t + M_r + P_n \\ P_t - P_{rmin} &\geq 51.087 + 7.00 + 1.00 \text{ dB} \\ P_t - P_{rmin} &\geq 59.087 \text{ dB} \quad \dots \text{Ecuación 28} \end{aligned}$$

P<sub>rmin</sub>: Potencia mínima de recepción o Sensibilidad del receptor.

### **4.3. Cálculos de tiempos de un bit**

Para garantizar la calidad de un bit viajando de un extremo a otro, es necesario calcular los factores de dispersión.

El diseño de un enlace incluye dos partes básicas: una para garantizar que la potencia de recepción será adecuada y la otra que la distorsión de propagación en la fibra no será perjudicial.

El ensanchamiento cromático casi siempre depende del ancho espectral del láser, ya que el coeficiente de dispersión cromática varía entre 17 a 20 ps/nm-Km.

En tal sentido se tiene que:

$$E_c = 20 \frac{ps}{nm * Km} * W * 179.948Km$$

$$E_c = 3,598.96 \frac{ps}{nm} * W \quad \dots Ecuación 29$$

Además; el periodo de un bit es inversamente proporcional al ancho de banda. Para este caso de estudio se ha de considerar un STM-1 como ancho de banda, lo que equivale a 155Mbps. Entonces se tiene que:

$$T = \frac{1}{B}$$

$$T = \frac{1}{155 * 10^6} s = 6.45ns \quad \dots Ecuación 30$$

Por lo tanto, para garantizar que un bit no se traslape con otro, y considerando que se tiene un formato NRZ:

$$E_c = \frac{T}{2} = 3,598.96 \frac{ps}{nm} * W = 6.45n$$

$$W \leq 1.79nm \quad \dots Ecuación 31$$

#### 4.4. Análisis de factores externos a considerar en el diseño

El enlace tendrá que instalarse en la región Puno, por lo que los empalmes de la fibra deberán soportar temperaturas entre +35°C y -21°C.

En la figura 18, se puede observar un referente de la ubicación geográfica donde se instalada la línea de transmisión de la red eléctrica comprometida.

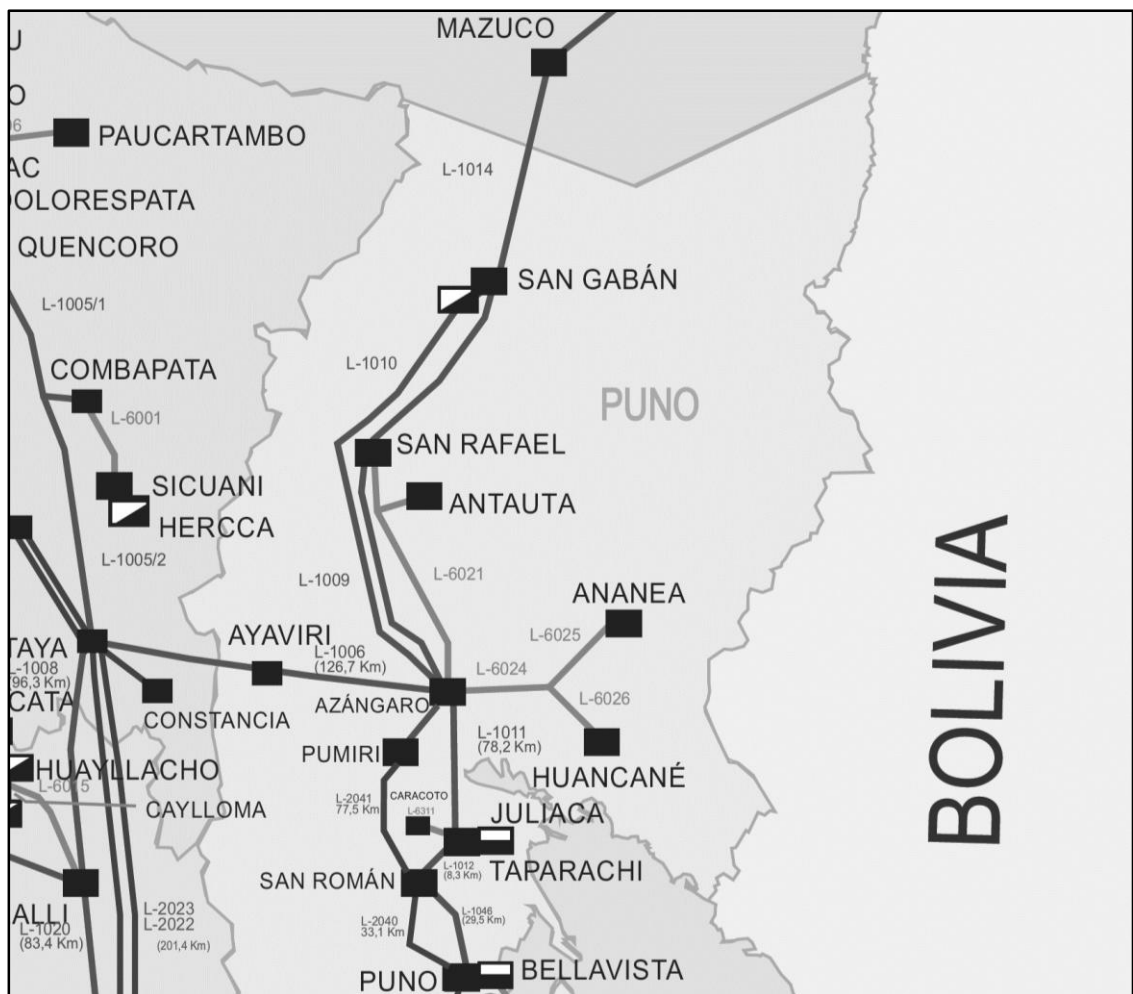


Figura 18. Ubicación geográfica del enlace San Gabán – Azángaro

Fuente: Recuperado de “Sistema eléctrico interconectado nacional – actualizado abril, 2018”, COES-SINAC, 2018.

#### 4.5. Diseño final

A partir de los cálculos y consideraciones mencionados anteriormente, se aterriza todo en el diseño final del sistema de comunicaciones.

En la tabla 6 se resume el cálculo realizado sobre la longitud de fibra óptica que se necesita para interconectar el sistema de comunicaciones de ambas SEs.

Tabla 6

Resumen del cálculo de longitud de fibra óptica

<b>Longitud de la Fibra Óptica</b>		<b>Unidad</b>
De San Gabán a Antauta	85.05	[km.]
De Antauta a Azángaro	83.09	[km.]
Longitud adicional por catenarias (5%)	8.41	[km.]
Longitud adicional por empalmes y escoltas	2.40	[km.]
Longitud para acometida (de pódico a ODF)	1.00	[km.]
<b>Longitud total de la fibra</b>	<b>179.95</b>	<b>[km.]</b>

Fuente: Elaboración propia

De la misma forma, en la tabla 7 se muestra un resumen del cálculo de la atenuación que puede sufrir la señal al viajar una SE a otra, a través del medio de comunicación que se pretende diseñar.

Tabla 7

Resumen del cálculo pérdidas en todo el sistema de comunicaciones

<b>Margen de Potencia</b>		<b>Unidad</b>
Atenuación total por longitud	44.99	dB/Km
Atenuación total por empalmes	4.10	dB
Atenuación total por conectores	2.00	dB
Pérdidas por penalidades	1.00	dB
Margen de seguridad	7.00	dB
<b>Atenuación Total</b>	<b>59.09</b>	<b>dB</b>

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, en la tabla 8, se resume el detalle de las características de los componentes del sistema de comunicaciones.

Tabla 8

Características de los componentes del sistema de comunicaciones.

<b>Descripción</b>		<b>Unidad</b>
Ventana de operación	1550.00	nm
Atenuación de la fibra en la ventana de operación	0.25	dB/Km
Longitud de la bobina	4.50	Km
Pérdidas por empalme	0.10	dB
Pérdidas por conectores	0.50	dB
Número de conectores	4	
Ancho espectral del laser	2.00	nm
Coefficiente de dispersión	20.00	ps/(nm-Km)
Estándar de transmisión SDH	1.00	STM-1
Ancho espectral del láser ≤	1.79	nm

Fuente: Elaboración propia

Para esquematizar el planteamiento, en la figura 19, se propone un esquema del diseño en estudio.

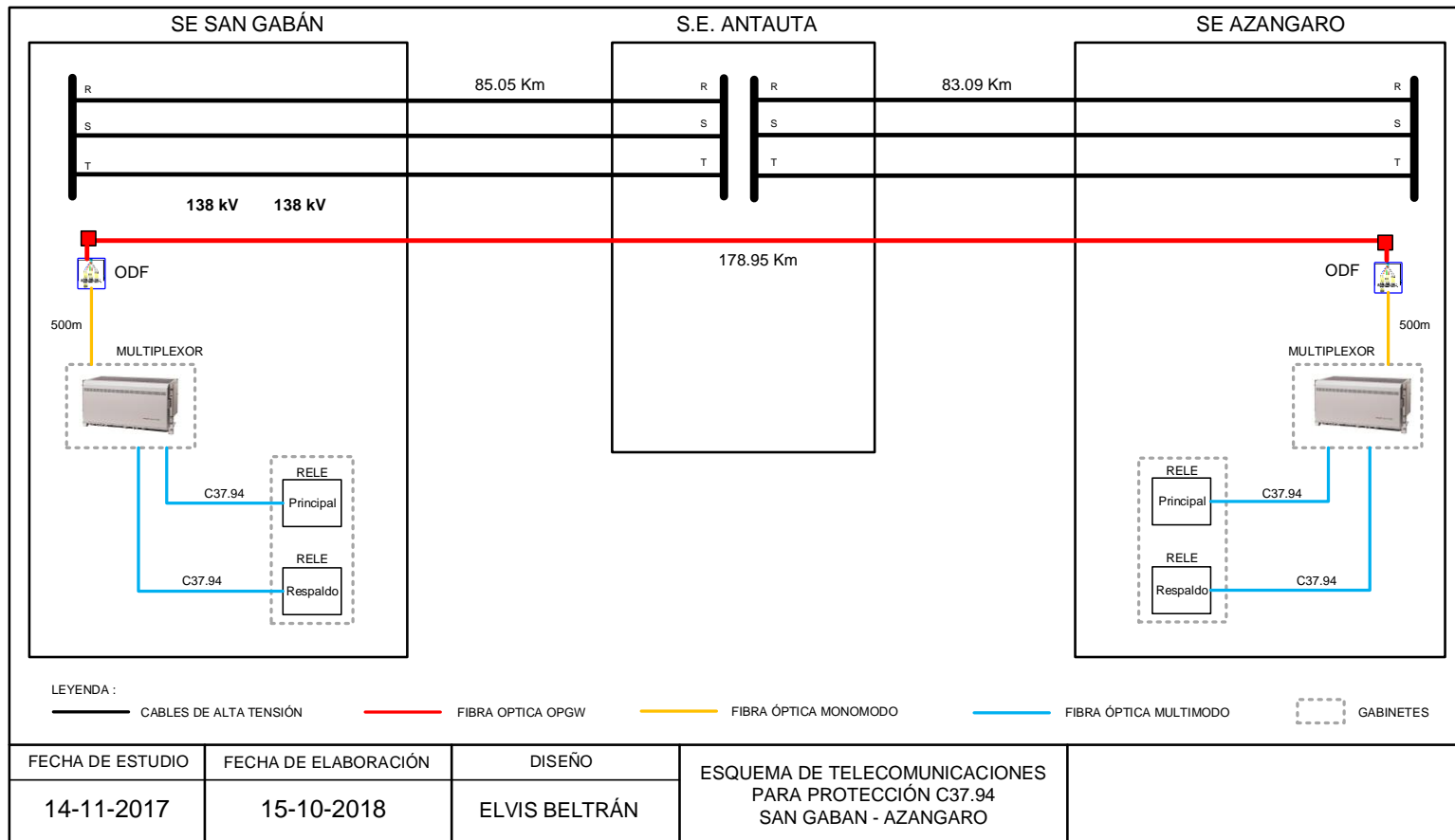


Figura 19. Esquema de comunicaciones propuesto, enlace San Gabán – Azángaro

Fuente: Elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. De las características determinadas para el diseño del sistema de comunicaciones, entre las SEs San Gabán y Azángaro, se considera de mayor relevancia que: El nivel de potencia del láser emisor debe ser igual o superior en, por lo menos, 59.09dB al nivel de sensibilidad del receptor, para garantizar que exista una llegada de señal de un extremo a otro; además, el ancho espectral del láser debe ser menor o igual a 1.79nm. para garantizar que la señal transmitida pueda llegar de un extremo a otro sin deformarse o traslaparse.
2. Se respetaron todas las condiciones establecidas por el estándar IEEE C37.94., por lo tanto, se puede implementar cualquier sistema de protección diferencial de línea, sin que estos tengan problema alguno para comunicarse a través del medio diseñado.
3. Finalmente, se ha logrado establecer las pautas mínimas necesarias para el diseño de un sistema de comunicaciones entre las SEs San Gabán y Azángaro que permita la comunicación de un sistema de protección diferencial de línea eléctrica, el cual necesita respetar el estándar C37.94, según las condiciones en las que la EGESGSA se encuentra al año 2018.
4. De manera complementaria, se concluye que este diseño no solo puede servir para establecer un sistema de comunicaciones para sistemas de protecciones diferenciales de líneas eléctricas, sino también, para establecer las comunicaciones de cualquier otro tipo de estándar y sistemas de protección, monitoreo, control, supervisión u otras necesidades.

## RECOMENDACIONES

1. Para garantizar el correcto enlace de comunicación de los multiplexores, se recomienda usar amplificadores de señal, esto debido a que los multiplexores, normalmente, tienen niveles de potencia de emisión de -10dBm como máximo y una sensibilidad de recepción de -32dBm como mínimo, lo que permite alcanzar una diferencia de 24dB. Siendo la pérdida total estimada de 59.09dB, se necesitan, por lo menos, 35.09dB adicionales para compensar esa caída de potencia.
2. También, para la implementación de este sistema de comunicaciones, se recomienda tomar como plantilla la secuencia de cálculo reemplazando los datos reales que puedan proporcionar los fabricantes de cada uno de los elementos involucrados.
3. De manera complementaria, se recomienda, también, tener cuidado al momento de realizar los empalmes de fibra óptica, ya que, estos juegan un papel crucial en la perdurabilidad del cálculo. Como la variación de temperatura es extrema un mal empalme o fusión de fibra óptica podría permitir el ingreso de humedad, lo que, en ocasiones puede generar pérdida por atenuación de señal.
4. También, es importante tomar referencia del factor de deterioro que sufren los empalmes por fusión en la fibra óptica a lo largo de los años, que, según los anexos 1, 2 y 3, se evidencia que va ganando más atenuación sobre el tramo de fibra óptica.
5. Como recomendación final, se puede implementar un sistema de sincronización de clocks para que, tanto relés como multiplexores, trabajen de manera correctamente sincronizados y así evitar que las tramas de información se pierdan por falla de sincronismo. No se recomienda que el relé tome el clock del multiplexor, ni que el multiplexor tome el clock del relé, a menos que estos clocks provengan de un máximo de dos niveles hacia atrás de un generador de clock.

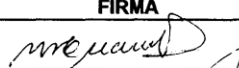
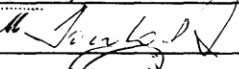
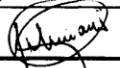
## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. APA. (febrero de 2018). Normas APA. *Normas APA, Sexta*, 26. (C. Commons, Ed.) Cali, Valle del Cauca, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado el 14 de junio de 2018
2. Arapey, P. (2009). *Proyecto Energía Eólica - MIEM / DNETN*. (TEMPUS, Ed.) Obtenido de Proyecto Energía Eólica - MIEM / DNETN: <https://goo.gl/P5tv6o>
3. Arturo Santana, H. (1 de noviembre de 2012). *Redes de Ingeniería*, 2. (Universidad Distrital Francisco José de Caldas) Recuperado el 29 de agosto de 2018, de Redes de Ingeniería: <https://goo.gl/XHkK54>
4. Checa, L. M. (2004). *Líneas de Transporte de Energía* (cuarta edición ed.). Barcelona, México: BOIXAREU EDITORES. Obtenido de <https://goo.gl/eoa4dY>
5. CISCO. (30 de marzo de 2005). *Cálculo de la atenuación máxima de fibra óptica*. (CISCO, Editor) Recuperado el 17 de agosto de 2018, de Cálculo de la atenuación máxima para los links de fibra óptica: <https://goo.gl/QtT2D>
6. COES. (julio de 2018). COES. Recuperado el 9 de octubre de 2018, de COES: <http://www.coes.org.pe/Portal/>
7. EGESGSA. (2016). *San Gabán - Memoria Anual*. Recuperado el 20 de Agosto de 2018, de <https://goo.gl/iweHdJ>
8. FONAFE, C. (24 de octubre de 2011). *San Gabán*. Recuperado el 15 de Agosto de 2018, de San Gabán: <http://www.sangaban.com.pe/index.aspx?seccion=8101>
9. IEEE. (2017). *IEEE Standards Association*. Recuperado el 12 de setiembre de 2018, de IEEE Standards Association: <https://goo.gl/mSnrPr>
10. ITU, U. I. (12 de mayo de 2000). *SERIE L: Construcción, Instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior*. Recuperado el 17 de agosto de 2018, de ITU GLOBAL SEARCH: <https://goo.gl/CcwoYm>
11. Martínez, M. (febrero de 2017). Tesis. *Estudio de cortocircuito, cálculo de ajustes y puesta en servicio de las protecciones eléctricas de la línea de transmisión de un parque eólico*, 152. Nueva Guatemala de la Asunción, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado el 15 de abril de 2018, de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6373/>
12. Morales Alvarado, J. D. (2013). Tesis. *Protecciones proyecto Chilca - Planicie - Carabayllo - Zapallal 220KV y 500KV: Consideraciones para el ajuste de protecciones en sistemas en extra alta tensión a 500KV en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional*, 208. (H. y. Consorcio digital del conocimiento MebLatam, Ed.) Lima, Perú. Recuperado el 10 de Julio de 2018
13. Ramos Vila, E. (2013). Tesis. *Diseño del sistema de protección y cálculos de los ajustes de los relés de protección de una subestación eléctrica de alta tensión*, 83. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
14. San Gabán - Memoria Anual, 2. (2017 de 2017). *Memorias Anuales*. ((. Gabán), Ed.) Recuperado el 25 de agosto de 2018, de Bolsa de Valores de Lima: <https://goo.gl/p9Pv1r>
15. Sánchez, J. Á. (septiembre de 2016). Tesis. *Localización de faltas en líneas de tres terminales a partir de las medidas de los relés de una protección*

- diferencial de línea*, 73. Madrid, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 8 de octubre de 2018, de <http://oa.upm.es/44713/>
16. SEACE, O. (28 de setiembre de 2017). *Actualización del SCADA del sistema eléctrico de San Gabán S.A.* Recuperado el 14 de Agosto de 2018, de Actualización del SCADA del sistema eléctrico de San Gabán S.A.: <https://goo.gl/xeH1oN>
  17. SEACE, O. (28 de setiembre de 2017). *Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado.* Recuperado el 15 de agosto de 2018, de Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado: <https://goo.gl/A7dxSn>
  18. SEACE, O. (28 de marzo de 2018). *Servicio de supervisión de la actualización del SCADA del sistema eléctrico de San Gabán S.A.* Obtenido de Servicio de supervisión de la actualización del SCADA del sistema eléctrico de San Gabán S.A.: <https://goo.gl/JhDtKd>
  19. SINAC, C. (15 de agosto de 2018). *Comite de Operaciones Economicas del Sistema Interconectado Nacional.* Obtenido de Comite de Operaciones Economicas del Sistema Interconectado Nacional: <http://www.coes.org.pe/Portal/Operacion/CaractSEIN/MapaSEIN>
  20. THEFOA. (2014). *Guide to Fiber Optics & Premises Cabling.* Recuperado el 17 de Agosto de 2018, de Guide to Fiber Optics & Premises Cabling: <http://www.thefoa.org/ESP/Conectores.htm>
  21. Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (Cuarta ed., Vol. 1). (G. T. Mendoza, Ed.) México, México, México: Pearson Educación de México, S.A. Recuperado el 31 de agosto de 2018
  22. Velarde Tinoco, J. C. (2013). Tesis. *Esquema de recierre en subestaciones de interruptor y medio basados en comunicación Goose*, 105. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

# ANEXO

## Anexo N° 1: Protocolos de empalme de fibra óptica del año 1999

ICE	PROYECTO DE LINEA DE TRANSMISION 138 KV SAN GABAN II - AZANGARO		
	PROTOCOLOS DE EMPALME DE FIBRA OPTICA		
<b>CALCULOS DE ATENUACION DE LOS ENLACES DE FIBRA OPTICA EN LA SEGUNDA VENTANA DE TRANSMISION OPTICA - 1300 nm.</b>			
<b>ENLACE S.E. SAN GABAN A REPETIDOR</b>			
Distancia total (d) :		85.053	
Atenuación del cable ( $\alpha$ ) :		0.33	
Valor de pérdida por empalme (Pe):		0.3	
Numero de empalmes existentes (n) :		31	
Atenuación total esperada :	$Ae = d \cdot \alpha + n \cdot Pe = 85.053 \cdot 0.33 + 31 \cdot 0.30 = 37.37 \text{ dB}$		
Atenuación medida de las fibras ópticas			
Fibra 01		31.57 dB	
Fibra 02		31.62 dB	
Fibra 03		32.14 dB	
Fibra 04		33.10 dB	
Fibra 05		32.33 dB	
Fibra 06		30.87 dB	
Fibra 07		32.76 dB	
Fibra 08		32.27 dB	
<b>ENLACE S.E. AZANGARO A REPETIDOR</b>			
Distancia total (d) :		83.088	
Atenuación del cable ( $\alpha$ ) :		0.33	
Valor de pérdida por empalme (Pe):		0.3	
Numero de empalmes existentes (n) :		29	
Atenuación total esperada :	$Ae = d \cdot \alpha + n \cdot Pe = 83.088 \cdot 0.33 + 29 \cdot 0.30 = 36.12 \text{ dB}$		
Atenuación medida de las fibras ópticas			
Fibra 01		30.19 dB	
Fibra 02		30.55 dB	
Fibra 03		31.43 dB	
Fibra 04		30.92 dB	
Fibra 05		30.59 dB	
Fibra 06		29.96 dB	
Fibra 07		31.19 dB	
Fibra 08		32.09 dB	
<b>OBSERVACIONES:</b>			
RESPONSABILIDADES	NOMBRE	FIRMA	FECHA
EJECUCION	Wilfredo Huanca Ayala <small>Ingeniero Residente</small>		17.06.99
INSPECCION	Ing. Sebastián Montoya <small>Supervisión Local</small>		17 JUN 1000
CLIENTE			

## Anexo N° 2: Acta de entrega de hilos de fibra óptica del año 2012



### FORMATO PARTICULAR



### ACTA DE ENTREGA DE HILOS DE FIBRA EN USUFRUCTO

Tramo de Fibra Óptica : Sub Estación Eléctrica San Gabán - Sub Estación Eléctrica Azángaro  
 Fecha de Entrega de Tramo en Usufructo : 22 de Febrero del 2012  
 Cantidad de Hilos de Fibra Óptica : 4 hilos  
 Operador Propietario : Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. Operador Usufructuario : América Móvil Perú S.A.C.

#### Lista de Entregables

Sección de Cámara	<input type="checkbox"/> N.A.	Sección de Cámara	<input type="checkbox"/> N.A.
Canalización de Acceso	<input type="checkbox"/> N.A.	Canalización de Acceso	<input type="checkbox"/> N.A.
Unión de tubos para Ductos	<input type="checkbox"/> N.A.	Unión de tubos para Ductos	<input type="checkbox"/> N.A.
Bisel de Cámara Existente	<input type="checkbox"/> N.A.	Bisel de Cámara Existente	<input type="checkbox"/> N.A.
Sangrado de Cable de Fibra Principal	<input type="checkbox"/> N.A.	Sangrado de Cable de Fibra Principal	<input type="checkbox"/> N.A.
Paso de Cable de Fibra de Enlace	<input checked="" type="checkbox"/> X	Paso de Cable de Fibra de Enlace	<input type="checkbox"/> N.A.
Medición de Fibra Principal	<input checked="" type="checkbox"/> X	Medición de Fibra Principal	<input checked="" type="checkbox"/> X
Medición de Fibra Última Milla	<input checked="" type="checkbox"/> X	Medición de Fibra Última Milla	<input type="checkbox"/> N.A.
Fusión de Hilos de Fibra Óptica	<input type="checkbox"/> N.A.	Fusión de Hilos de Fibra Óptica	<input type="checkbox"/> N.A.
Medición de Fibra Tramo Completo	<input checked="" type="checkbox"/> X	Medición de Fibra Tramo Completo	<input checked="" type="checkbox"/> X
Entrega de tramo en usufructo	<input checked="" type="checkbox"/> X	Entrega de tramo en usufructo	<input type="checkbox"/> N.A.

X : Indica que se realizó la entrega efectiva  
 N.A. No aplica en este proyecto

#### Observaciones

En el tramo de fibra óptica: San Gabán - Antauta, se asignaron los hilos: 3, 4, 7 y 8.  
 En el tramo de fibra óptica: Antauta - Azángaro, se asignaron los hilos: 3, 4, 5 y 6.  
 Por tener en estos hilos, índices de PMD más bajos.

Las partes firman en señal de conformidad de haber recibido los hilos de fibra óptica para el tramo especificado.

Representante Propietario

Nombre: P. Mandrup  
 DNI: 2837827

Representante Oper. Usufructuario

Nombre: Daniel Cáceres  
 DNI: 09926739

**Daniel Cáceres Luque**  
 Implementación de Red Externa  
 América Móvil Perú S.A.C.



ACTA DE ENTREGA DE MEDICIONES Y DE CONFORMIDAD EN EL TRAMO DE FIBRA OPTICA  
SAN GABAN - ANTAUTA - AZANGARO -  
EMPRESA ELECTRICA SAN GABAN



Enlace	FIBRA N°	Longitud (Km)	CD (ps/nm)	Coefic CD (ps/nm*km)	PMD (ps)	Coef. PMD (ps/km1/2)	Atenuación (dB)
SAN GABAN - ANTAUTA	1	85.13	1763.12	16.53	2.63	0.29	19.35
	2	85.18	1761.67	16.54	1.98	0.21	19.56
	3	85.17	1773.48	16.62	0.95	0.10	19.82
	4	85.18	1769.49	16.60	0.89	0.12	19.84
	5	85.19	1767.48	16.54	2.48	0.27	21.37
	6	85.18	1761.18	16.50	3.55	0.38	19.39
	7	85.20	1758.54	16.55	2.39	0.31	19.48
	8	85.16	1767.00	16.56	3.12	0.34	18.58
ANTAUTA - AZANGARO	1	83.32	1723.97	16.53	1.32	0.33	19.78
	2	83.32	1720.28	16.50	1.22	0.13	19.81
	3	83.33	1726.22	16.53	2.67	0.29	18.36
	4	83.34	1729.44	16.54	1.87	0.20	18.24
	5	83.35	1727.29	16.55	2.64	0.29	19.71
	6	83.33	1715.11	16.48	3.56	0.39	20.67
	7	83.31	1719.20	16.53	3.64	0.40	20.33
	8	83.29	1719.60	16.49	3.92	0.41	21.21

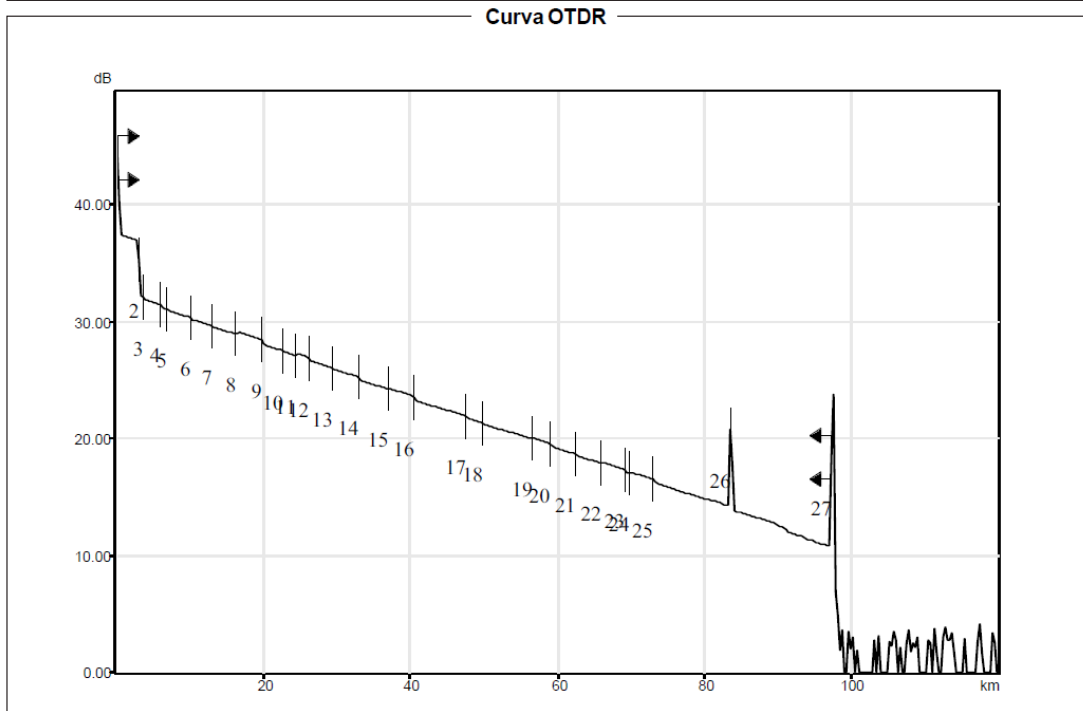
# Anexo N° 3: Medición de niveles de atenuación de fibra óptica en el año 2018

## Informe OTDR

Información del trabajo			
Trabajo	:	Razón del trabajo	:
Contratista	:	Operador A	:
Cliente	:	Operador B	:
Fecha de la prueba	:	24/05/2018 (10:32:34 a.m. GMT-5:00)	Archivo
			Fo 004 antauta- azangaro 24-05-...

Información del cable			
ID de fibra	:	Fiber2042	ID de cable
Ubicación A	:		Ubicación B
Fabric. del cable	:		Tipo
ID de subgrupo	:		Color

Mediciones del enlace			
Pérdida del segme...	:	27.089 dB	Pérdida por empalme ...
Longitud de intervalo	:	97.2783 km	Max. pérdida del emp...
Pérdida promedio	:	0.278 dB/km	ORL del segmento
			30.59 dB



Firma : \_\_\_\_\_  
EXFO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 25/05/2018  
Página 1 / 3



# Informe OTDR

**Tabla de eventos**

Nº	Ubicación (km)	Tipo de evento	Pérdida (dB)	Ref. (dB)	Atenuación (dB/km)	Cumulativo (dB)
1	0.0000	Nivel de inyección	---	-31.8		0.000
		Tramo de fibra (2.9299 km)	0.627		0.214	0.627
2	2.9299	Falla no reflexiva	4.654			5.281
		Tramo de fibra (0.7299 km)	0.148		0.203	5.429
3	3.6598	Falla no reflexiva	0.205			5.634
		Tramo de fibra (2.2867 km)	0.478		0.209	6.112
4	5.9465	Falla no reflexiva	0.228			6.340
		Tramo de fibra (1.0004 km)	0.194		0.194	6.535
5	6.9470	Falla no reflexiva	0.056			6.591
		Tramo de fibra (3.0932 km)	0.586		0.190	7.177
6	10.0402	Falla no reflexiva	0.165			7.342
		Tramo de fibra (3.0116 km)	0.562		0.186	7.904
7	13.0518	Falla no reflexiva	0.104			8.008
		Tramo de fibra (3.1749 km)	0.608		0.191	8.616
8	16.2267	Falla positiva	-0.230			8.386
		Tramo de fibra (3.5220 km)	0.687		0.195	9.073
9	19.7486	Falla no reflexiva	0.430			9.502
		Tramo de fibra (2.8584 km)	0.539		0.188	10.041
10	22.6071	Falla no reflexiva	0.037			10.078
		Tramo de fibra (1.8273 km)	0.374		0.205	10.452
11	24.4344	Falla positiva	-0.197			10.255
		Tramo de fibra (1.6844 km)	0.319		0.189	10.574
12	26.1188	Falla no reflexiva	0.292			10.866
		Tramo de fibra (3.4199 km)	0.669		0.196	11.535
13	29.5387	Falla no reflexiva	0.098			11.634
		Tramo de fibra (3.4556 km)	0.655		0.190	12.289
14	32.9944	Falla no reflexiva	0.315			12.603
		Tramo de fibra (3.9916 km)	0.700		0.175	13.303
15	36.9860	Falla positiva	-0.042			13.262
		Tramo de fibra (3.4658 km)	0.661		0.191	13.923
16	40.4518	Falla no reflexiva	0.365			14.288
		Tramo de fibra (7.0491 km)	1.312		0.186	15.599
17	47.5009	Falla no reflexiva	0.164			15.764
		Tramo de fibra (2.3123 km)	0.438		0.189	16.202
18	49.8131	Falla no reflexiva	0.134			16.336
		Tramo de fibra (6.7888 km)	1.243		0.183	17.578
19	56.6019	Falla positiva	-0.095			17.483
		Tramo de fibra (2.5011 km)	0.548		0.219	18.031
20	59.1030	Falla no reflexiva	0.212			18.243
		Tramo de fibra (3.4914 km)	0.662		0.190	18.906
21	62.5944	Falla no reflexiva	0.127			19.033
		Tramo de fibra (3.4301 km)	0.651		0.190	19.684
22	66.0245	Falla positiva	-0.088			19.596
		Tramo de fibra (3.2668 km)	0.621		0.190	20.217
23	69.2912	Falla no reflexiva	0.388			20.605
		Tramo de fibra (0.4083 km)	0.084		0.207	20.689
24	69.6996	Falla positiva	-0.291			20.398
		Tramo de fibra (3.3995 km)	0.652		0.192	21.050
25	73.0991	Falla no reflexiva	0.273			21.323
		Tramo de fibra (10.3465 km)	1.975		0.191	23.298
26	83.4455	Falla reflexiva	0.351	-29.5		23.649
		Tramo de fibra (13.8327 km)	3.440		0.249	27.089
27	97.2783	Falla reflexiva	---	-14.2		27.089

**Información de marcadores**

A	: 0.5001 km, 37.439 dB	B	: 0.7501 km, 37.373 dB
a	: 0.2500 km, 45.640 dB	b	: 1.0001 km, 37.322 dB
Distancia de A a B	: 0.2500 km, 0.066 dB	ORL de A a B	: 48.04 dB
Reflectancia 3-p.	: -24.7 dB	Aten. LSA A a B	: 0.284 dB/km
Pérdida p/emp. 4-p.	: 9.419 dB		

Firma : \_\_\_\_\_  
EXFO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 25/05/2018  
Página 2 / 3

## Informe OTDR

### Configuración de prueba y cable

Longitud de onda	: 1550 nm (SM-9µm)	Tiempo adq.íc.	: 1 min 0 s
Nombre de archivo	: Fo 004 antauta- azangaro 24-05-18.1min...	Duración de pulso	: 2.5 µs
Hardware	: FTB-7300E-023B-EA	Factor helic.	: 0.00 %
Número de serie	: 659579	Umbral de pérdida del...	: 0.020 dB
Software	: S/O	Umbral de reflectancia	: -72.0 dB
Rango	: 120.0000 km	Umbral de final de fibra	: 5.000 dB
IOR	: 1.468325		
RBS	: -81.87		

Firma : \_\_\_\_\_  
EXFO E. O. Engineering Inc.

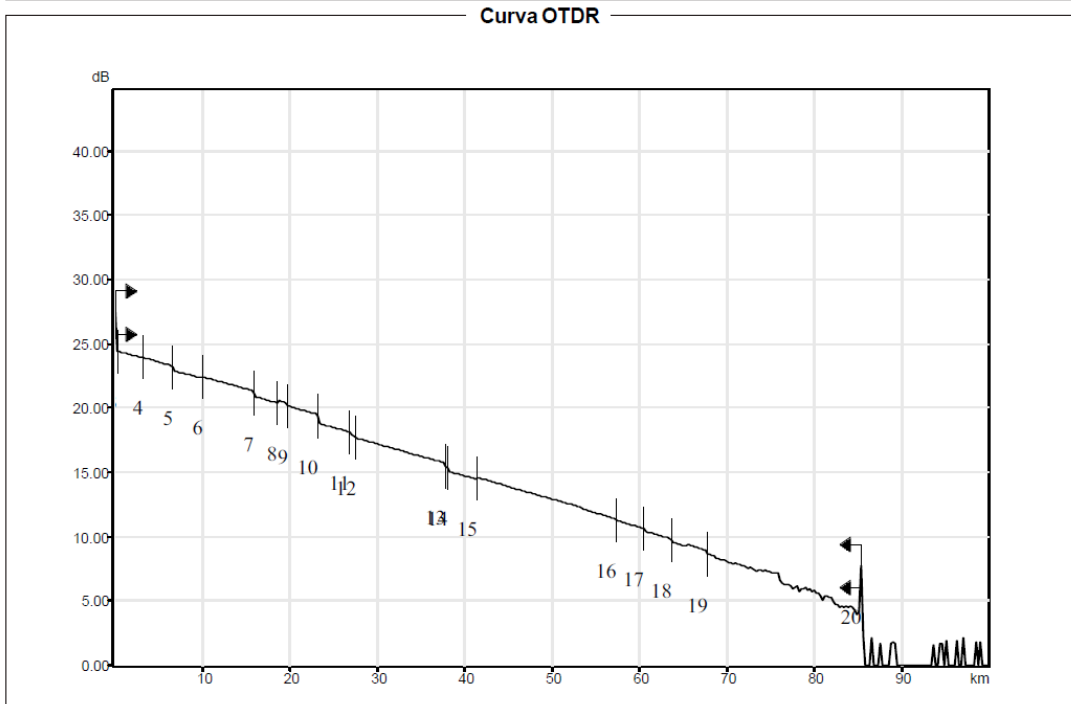
Fecha : 25/05/2018  
Página 3 / 3

# Informe OTDR

Información del trabajo				
Trabajo	:		Razón del trabajo	:
Contratista	:		Operador A	:
Cliente	:		Operador B	:
Fecha de la prueba	:	24/05/2018 (10:07:50 a.m. GMT-5:00)	Archivo	:
				fo 014 antauta-san gaban 24-05-...

Información del cable				
ID de fibra	:	Fiber2039	ID de cable	:
Ubicación A	:		Ubicación B	:
Fabric. del cable	:		Tipo	:
ID de subgrupo	:		Color	:

Mediciones del enlace				
Pérdida del segmento...	:	21.799 dB	Pérdida por empalme ...	:
Longitud de intervalo	:	85.5179 km	Max. pérdida del emp...	:
Pérdida promedio	:	0.255 dB/km	ORL del segmento	:
				27.48 dB



Firma : \_\_\_\_\_  
EXFO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 25/05/2018  
Página 1 / 2

# Informe OTDR

**Tabla de eventos**

Nº	Ubicación (km)	Tipo de evento	Pérdida (dB)	Refl. (dB)	Atenuación (dB/km)	Cumulativo (dB)
1	0.0000	Nivel de inyección	- - -	-34.0		0.000
		Tramo de fibra (0.0970 km)	0.010		0.100	0.010
2	0.0970	Falla reflexiva	1.540	-30.0		1.550
		Tramo de fibra (0.1582 km)	0.016		0.100	1.565
3	0.2552	Falla positiva	-0.192			1.373
		Tramo de fibra (3.0371 km)	0.539		0.177	1.912
4	3.2923	Falla positiva	-0.064			1.848
		Tramo de fibra (3.4812 km)	0.727		0.209	2.575
5	6.7734	Falla no reflexiva	0.319			2.894
		Tramo de fibra (3.3535 km)	0.614		0.183	3.508
6	10.1270	Falla positiva	-0.139			3.369
		Tramo de fibra (5.8649 km)	1.127		0.192	4.497
7	15.9919	Falla no reflexiva	0.382			4.879
		Tramo de fibra (2.7512 km)	0.549		0.200	5.428
8	18.7431	Falla positiva	-0.232			5.196
		Tramo de fibra (1.0209 km)	0.196		0.192	5.392
9	19.7640	Falla no reflexiva	0.235			5.627
		Tramo de fibra (3.5883 km)	0.694		0.193	6.322
10	23.3523	Falla no reflexiva	0.686			7.007
		Tramo de fibra (3.6853 km)	0.688		0.187	7.695
11	27.0376	Falla no reflexiva	0.179			7.874
		Tramo de fibra (0.5360 km)	0.096		0.179	7.970
12	27.5736	Falla no reflexiva	0.133			8.103
		Tramo de fibra (10.2750 km)	1.984		0.193	10.087
13	37.8486	Falla no reflexiva	0.326			10.413
		Tramo de fibra (0.4032 km)	0.077		0.192	10.491
14	38.2518	Falla no reflexiva	0.250			10.741
		Tramo de fibra (3.2923 km)	0.620		0.188	11.361
15	41.5441	Falla positiva	-0.141			11.220
		Tramo de fibra (15.7979 km)	3.189		0.202	14.409
16	57.3420	Falla no reflexiva	0.121			14.530
		Tramo de fibra (3.2923 km)	0.619		0.188	15.150
17	60.6343	Falla no reflexiva	0.184			15.334
		Tramo de fibra (3.0626 km)	0.603		0.197	15.936
18	63.6969	Falla no reflexiva	0.243			16.179
		Tramo de fibra (4.1243 km)	0.612		0.148	16.791
19	67.8212	Falla no reflexiva	0.412			17.203
		Tramo de fibra (17.6967 km)	4.596		0.260	21.799
20	85.5179	Falla reflexiva	- - -	-12.8		21.799

### Información de marcadores

A	: 39.9873 km, 14.731 dB	B	: 59.9809 km, 10.789 dB
a	: 19.9936 km, 20.133 dB	b	: 79.9746 km, 7.044 dB
Distancia de A a B	: 19.9936 km, 3.942 dB	ORL de A a B	: 32.06 dB
Reflectancia 3-p.	: -59.3 dB	Aten. LSA A a B	: 0.204 dB/km
Pérdida p/emp. 4-p.	: -0.913 dB		

### Configuración de prueba y cable

Longitud de onda	: 1550 nm (SM-9µm)	Tiempo adq. c.	: 1 min 0 s
Nombre de archivo	: fo 014 antauta-san gaban 24-05-18. 1mi...	Duración de pulso	: 100 ns
Hardware	: FTB-7300E-023B-EA	Factor helic.	: 0.00 %
Número de serie	: 659579	Umbral de pérdida del...	: 0.020 dB
Software	: S/O	Umbral de reflectancia	: -72.0 dB
Rango	: 100.0000 km	Umbral de final de fibra	: 5.000 dB
IOR	: 1.468325		
RBS	: -81.87		

Firma : \_\_\_\_\_  
EXFO E. O. Engineering Inc.

Fecha : 25/05/2018  
Página 2 / 2