

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA POR CABLE SUBMARINO ENTRE ECUADOR CONTINENTAL E INSULAR PARA ACCESO A INTERNET**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA EN “ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES”**

**MARIELA YAJAIRA DÍAZ VARELA**

[www.mydv@hotmail.es](mailto:www.mydv@hotmail.es)

**DIRECTOR: M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ**

**Quito, febrero 2020**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la señorita Mariela Díaz, bajo mi supervisión.

---

**M.Sc. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

T

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Mariela Yajaira Díaz Varela, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

Mariela Yajaira Díaz Varela

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi padre, quien en vida con su ejemplo y valores inculcados fue la persona que me motivó e impulsó para cumplir este sueño. Por su confianza, su consuelo e infinito amor en los momentos más duros, siempre supo colocar una sonrisa en mi rostro y animarme a seguir adelante.

Este trabajo va dedicado a ti.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por brindarme la oportunidad de cada día y por haber puesto en mi vida a los seres que siempre fue mi motor para continuar adelante con este trabajo, mis padres.

A mi papá por la confianza depositada en mí desde el primer día que supo de mi ingreso en la EPN, por haber sido ese cómplice presente en todas las etapas de mi vida hasta su último aliento. Por su apoyo y amor incondicionales.

A mi mamá, por todo el sacrificio que ha realizado desde que vine al mundo, por su amor y su paciencia infinitos como las estrellas en el cielo, y por ser el soporte fundamental a lo largo de mi carrera universitaria.

Mi más sincero agradecimiento a mis hermanos José Luis y Carlos, por toda la ayuda brindada desde que fui una niña hasta esta etapa de mi vida. Gracias también por ser ese ejemplo de dedicación, constancia y esfuerzo.

A mi tío Manuel Díaz, gracias por siempre estar pendiente de mí e impulsarme cuando hizo falta.

A una persona muy especial en mi vida, que siempre ha estado ahí apoyándome personal y académicamente en las buenas y en las malas C.E. Gracias por todo lo que has hecho por mí.

A mi directora de tesis, Ingeniera María Soledad Jiménez, quien fue la persona que me guio a lo largo de este proyecto, desde las aulas compartiendo su valioso conocimiento y pasión por la carrera, por su infinita paciencia y comprensión, muchísimas gracias.

A mis amigos, por hacer más llevadera y agradable la vida universitaria que si bien es tediosa, es una de las etapas más bellas de la vida. Gracias por las experiencias y momentos compartidos a lo largo de este ciclo que va llegando a su fin.

Finalmente, pero no menos importante, a todas las personas que contribuyeron de una u otra manera, ya sea con palabras de aliento o brindándome su preciada ayuda, y con ello me motivaron a la culminación de mi tesis, mi agradecimiento eterno.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| AVAL.....   | I    |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....   | II   |
| DEDICATORIA.....  | III  |
| AGRADECIMIENTO.....   | IV   |
| ÍNDICE DE CONTENIDO.....  | V    |
| RESUMEN.....  | VIII |
| ABSTRACT.....   | IX   |
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1    |
| 1.1. OBJETIVOS.....   | 1    |
| 1.2. ALCANCE.....   | 1    |
| 1.3. MARCO TEÓRICO.....   | 3    |
| 1.3.1. ANTECEDENTES DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS.....                      | 3    |
| 1.3.2. BANDAS DE OPERACIÓN.....   | 4    |
| 1.3.2.1. Bandas ópticas.....  | 5    |
| 1.3.2.2. Ventanas de transmisión.....                                       | 6    |
| 1.3.3. FIBRA ÓPTICA.....  | 6    |
| 1.3.4. PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UNA FIBRA ÓPTICA.....                       | 7    |
| 1.3.5. FRECUENCIA NORMALIZADA Y LONGITUD DE ONDA DE CORTE DE UNA FIBRA..... | 9    |
| 1.3.6. TIPOS DE FIBRA ÓPTICA.....   | 10   |
| 1.3.6.1. Fibras multimodo.....  | 10   |
| 1.3.6.2. Fibras monomodo.....   | 12   |
| 1.3.7. CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA.....               | 12   |
| 1.3.7.1. Atenuación.....  | 13   |
| 1.3.7.2. Pérdidas por absorción de material.....                            | 13   |
| 1.3.7.3. Pérdidas por <i>Scattering</i> lineal.....                         | 14   |
| 1.3.7.4. Pérdidas por curvaturas.....                                       | 15   |
| 1.3.7.5. Dispersión.....  | 16   |
| 1.3.7.6. Dispersión intramodal $\tau_c$ .....                               | 16   |
| 1.3.7.7. Dispersión intermodal $\tau_m$ .....                               | 17   |
| 1.3.7.8. Dispersión total de la fibra.....                                  | 17   |
| 1.3.7.9. Dispersión por Modo de Polarización $\tau_p$ .....                 | 18   |
| 1.3.8. EFECTOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA.....                          | 18   |
| 1.3.9. CABLES PARA FIBRA ÓPTICA.....  | 19   |
| 1.3.10. CABLE SUBMARINO.....  | 22   |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 1.3.10.1.   | Generalidades.....  | 22 |
| 1.3.10.2.   | Parámetros a considerar en el cable submarino .....                               | 25 |
| 1.3.10.3.   | Empalmes.....   | 28 |
| 1.3.10.4.   | Conectorización .....   | 32 |
| 1.3.10.5.   | Instalación del Cable Submarino .....   | 35 |
| 1.3.10.6.   | Reparación del cable submarino .....  | 37 |
| 1.3.11.     | FUENTES DE LUZ.....   | 39 |
| 1.3.11.1.   | Fuentes LED .....   | 39 |
| 1.3.11.2.   | Fuentes LASER .....   | 40 |
| 1.3.11.2.1. | Condiciones de seguridad en fuentes LASER .....                                   | 42 |
| 1.3.12.     | DETECTORES ÓPTICOS .....  | 43 |
| 1.3.13.     | OTROS COMPONENTES .....   | 44 |
| 1.3.13.1.   | Amplificadores ópticos .....  | 44 |
| 1.3.13.1.1. | Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA).....                              | 44 |
| 1.3.13.1.2. | Amplificadores Raman .....  | 46 |
| 1.3.14.     | RENDIMIENTO DEL TRANSMISOR .....  | 48 |
| 1.3.15.     | MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA .....                             | 49 |
| 1.3.16.     | RENDIMIENTO DEL RECEPTOR .....  | 51 |
| 1.3.17.     | PRESUPUESTO DEL ENLACE.....   | 53 |
| 2.          | METODOLOGÍA.....  | 55 |
| 2.1.        | PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE INTERNET .....  | 55 |
| 2.1.1.      | ANTECEDENTES .....  | 55 |
| 2.1.1.1.    | Leyes vigentes en el Archipiélago de Galápagos .....                              | 58 |
| 2.1.1.1.1.  | Ley Orgánica de Régimen Especial de la provincia de Galápagos LOREG.....          | 58 |
| 2.1.1.1.2.  | Decreto Ejecutivo 1363.....   | 60 |
| 2.1.2.      | CURVAS DE POBLACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN .....                            | 61 |
| 2.1.3.      | CÁLCULO DE LA DEMANDA DE ACCESO A INTERNET .....                                  | 65 |
| 2.1.3.1.    | Actuales prestadores de servicio y tecnologías de acceso .....                    | 65 |
| 2.1.3.2.    | Cálculo de la demanda de Internet .....   | 66 |
| 2.2.        | RUTA PARA EL TENDIDO DEL CABLE SUBMARINO.....                                     | 73 |
| 2.3.        | SISTEMA DE CABLE SUBMARINO .....  | 78 |
| 2.3.1.      | REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....   | 80 |
| 2.3.2.      | SELECCIÓN DEL TIPO DE FIBRA ÓPTICA A UTILIZARSE .....                             | 82 |
| 2.3.3.      | SELECCIÓN DEL TIPO DE CABLE SUBMARINO .....                                       | 85 |
| 2.3.4.      | DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....   | 87 |
| 2.3.4.1.    | Equipo Terminal de Línea Submarina (Submarine Line Terminal Equipment, SLTE)..... | 88 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 2.3.4.2. | Equipo de Alimentación de Energía (Power Feed Equipment, PFE)  | 89  |
| 2.3.4.3. | Sistema de Administración de la Red ( <i>Network Management System</i> , NMS) y Equipo de Monitoreo de Línea ( <i>Line Monitoring Equipment</i> , LME) | 90  |
| 2.3.4.4. | Repetidores  | 91  |
| 2.3.4.5. | Pozo o cisterna de amarre ( <i>Beach ManHole</i> , BMH)  | 92  |
| 2.3.5.   | SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS   | 92  |
| 2.3.5.1. | Huawei Marine  | 92  |
| 2.3.5.2. | Xtera  | 96  |
| 2.3.5.3. | Padtec   | 99  |
| 2.3.5.4. | Alcatel  | 100 |
| 3.       | RESULTADOS   | 101 |
| 3.1.     | CÁLCULO DE PÉRDIDAS  | 101 |
| 3.1.1.   | ATENUACIÓN POR DISTANCIA EN LA FIBRA ÓPTICA  | 101 |
| 3.1.2.   | PÉRDIDAS POR EMPALMES  | 102 |
| 3.1.3.   | PÉRDIDAS POR CONECTORES  | 104 |
| 3.1.4.   | PÉRDIDAS POR ENVEJECIMIENTO  | 105 |
| 3.1.5.   | PÉRDIDAS TOTALES   | 105 |
| 3.2.     | PRESUPUESTO DE POTENCIAS   | 105 |
| 3.3.     | PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL PROYECTO   | 107 |
| 4.       | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES   | 109 |
| 4.1.     | CONCLUSIONES   | 109 |
| 4.2.     | RECOMENDACIONES  | 111 |
| 5.       | BIBLIOGRAFÍA   | 112 |



## RESUMEN

El presente trabajo propone una alternativa de conectividad viable a través de un enlace de fibra óptica por cable submarino, con el propósito de mejorar de modo significativo la forma de acceso a Internet del Archipiélago de Galápagos. Actualmente, debido a la ubicación de la provincia sólo se puede tener el servicio mediante tecnologías inalámbricas por medio de enlaces satelitales, los cuales no ofrecen los mismos atributos que una conexión cableada de fibra óptica (altas tasas de transmisión, bajísima latencia, mayor ancho de banda).

El diseño propuesto en este documento contiene el estudio de la demanda de Internet generada por parte de los habitantes de la provincia la cual es proyectada a cinco años a partir del 2019 para brindar este servicio; para las estimaciones sobre el crecimiento de la población de Galápagos se consideró que no puede aumentar dramáticamente debido a que es una zona de vulnerabilidad ecológica donde el 95% de su territorio conserva la biodiversidad original de las islas.

En cuanto al análisis técnico se incluye: el trazado de la posible ruta del cable submarino, la ubicación de las estaciones terrestres en la parte continental e insular, los componentes de un sistema de cable submarino, los equipos tanto de la planta húmeda como de la planta seca en base a los requerimientos del sistema y el presupuesto de potencias óptico para garantizar el correcto funcionamiento del cable submarino.

Finalmente, en el ámbito económico se incluye un presupuesto referencial de costos para la implementación del sistema.

**PALABRAS CLAVE:** Cable submarino, Internet, enlaces satelitales, fibra óptica, biodiversidad original, planta húmeda, planta seca.

## **ABSTRACT**

This degree work proposes an alternative connectivity that will be viable through of an optical fiber link by submarine cable. The goal is accessing to the Internet of a significant way in the Galapagos Islands. Currently, due to the location of the province, people in this region can obtain wireless technologies service through satellite links only, which do not offer the same features wired fiber optic connection (high transmission rates, very low latency, higher bandwidth).

The design proposed in this thesis contains an analysis on demand of Internet generated by the Galapagos Islands inhabitants which is projected for next five years from 2019 to provide this service; for estimates on the grow of Galapagos Islands population, it was considered that it cannot increase without control because it is an area of high ecological vulnerability where 95% of its territory conserves the original biodiversity of the islands.

The Technical Analysis part includes: A submarine cable route diagram, continental and island stations, components of an underwater cable system, both wet and dry plant equipment according to the system requirements and the link budget to guarantee the correct operation of the submarine cable.

Finally, a referential cost budget is also included for the implementation of the system.

**KEYWORDS:** Submarine cable, Internet, satellite links, optical fiber, original biodiversity, wet and dry plant.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Titulación es diseñar un enlace entre Ecuador continental e insular utilizando como medio de transmisión un cable óptico submarino para acceso a Internet para los habitantes de Galápagos.

Los objetivos específicos de este Proyecto Técnico son:

- Estudiar la demanda en base a la necesidad de acceso a Internet de los habitantes de la provincia, tomando como referencia trabajos previos y datos proporcionados por las entidades correspondientes y por los proveedores actuales que brindan el servicio de acceso a Internet. Dicha demanda para el diseño se proyectará a 5 años.
- Desarrollar el diseño de un sistema de comunicaciones para brindar un servicio de Internet de buenas prestaciones al Archipiélago de Galápagos. Elaborar el presupuesto del enlace óptico submarino.
- Presentar los costos referenciales de diseño del sistema entre ambas partes del Ecuador.
- Seleccionar los equipos y demás elementos del diseño, entre alternativas de al menos 2 fabricantes.

## 1.2. ALCANCE

El diseño propuesto tiene como fin brindar el acceso a servicios de Internet de altas prestaciones al Archipiélago de Galápagos, haciendo uso de tecnologías como WDM o alguna de sus variaciones para poder tener comunicaciones adecuadas y a costos razonables. Para tener un conocimiento apropiado de lo que son los sistemas de comunicaciones ópticos de gran capacidad y de largo alcance, se hará uso de los conceptos básicos de la fibra óptica como son las características propias de la misma, efectos no lineales presentes en ella, cómo se propaga la luz a través de los medios de comunicación guiados ópticos, transmisores y receptores ópticos utilizados en largas distancias [1].

Además, la técnica de multiplexación xWDM será importante considerar para el presente trabajo, por lo cual es necesario poseer un conocimiento acerca de la misma desde lo más básico, pasando por sus ventajas y desventajas, forma de trabajo, velocidades,

capacidades, y cómo influyen todas estas características en los equipos que se vayan a considerar para el diseño.

A continuación, se realizará un estudio de la naturaleza y dimensionamiento de la demanda que se pretende atravesarse por el cable submarino, pues esto debe ser considerado en el diseño que se plantea. Para el efecto, y dadas las limitaciones de viajar a Galápagos, la información requerida se va a suplir con datos tomados de los ministerios y organismos correspondientes, además de la investigación del Ing. Oscar Jaya residente de la provincia [2]. No se harán encuestas en Galápagos.

Por otro lado, con el fin de reducir la longitud del cable de fibra, los puntos de amarre serán ubicados en los siguientes sitios: para el extremo de Ecuador continental Punta Carnero, ubicada en la provincia de Santa Elena, mientras que para el lado del Ecuador insular la isla San Cristóbal, debido a su cercanía con el continente.

El enlace será diseñado para soportar la demanda de tráfico requerido por todas las islas habitadas (San Cristóbal, Santa Cruz e Isabela); sin embargo, el alcance del presente proyecto considerará únicamente el diseño del enlace entre Punta Carnero y San Cristóbal, debido a que las consideraciones necesarias para realizar los enlaces restantes hacia las demás islas incrementaría la magnitud del presente proyecto en gran medida. Factores como: topología, redundancia, riesgo volcánico (que necesitaría un estudio o al menos una consultoría a una institución pertinente), etc., extenderían el tiempo de culminación del estudio más allá de los plazos estipulados por la institución y los reglamentos vigentes en el país. Dicha etapa podrá ser objeto de estudio en una próxima investigación.

La capacidad, velocidad, escalabilidad, entre otros son factores importantes a considerar, los cuales se establecerán sobre el desarrollo del diseño del proyecto.

El diseño propuesto proveerá un sistema escalable, modular y compatible con los estándares internacionales. También se pondrá a disposición los costos referenciales del proyecto del sistema, de tal forma que en un futuro sea una base para la toma de decisiones en caso de considerar su implementación. Además, se toman en cuenta algunos puntos que son fundamentales para el desarrollo del diseño del presente trabajo que se detallan a continuación:

- En primer lugar, se abarcará un conocimiento básico general sobre comunicaciones ópticas; teniendo como principio una introducción a lo que es la fibra óptica, propagación de la luz y fenómenos presentes en ella, bandas de operación, dispersión, efectos no lineales de la fibra, tipo de fibra óptica, tipos de

cables; haciendo énfasis en el cable submarino, continuando con los tipos de repetidores, cada uno con sus características fundamentales, amplificadores ópticos (EDFA y/o Raman), tipos de fuentes y detectores, tecnologías WDM y sus variaciones, número de longitudes de onda, entre otros [3].

- A continuación, se describirá la situación actual del país en cuanto a comunicaciones y salidas a Internet en la región insular de forma más profunda y posibles prestadores de servicio. Se realizará una estimación de la demanda de acceso a Internet para el archipiélago, se proyectará dicho tráfico a cinco años, como punto de partida para el diseño. Se investigará las formas de acceso actuales al servicio, análisis de la mejor ruta para el cable, tipo de cable y tipo de fibra óptica a utilizar, consideración de los diferentes y principales tipos de pérdidas del sistema de comunicaciones óptico y cálculo del presupuesto de potencia óptico para el diseño.
  
- Finalmente, se estimará un presupuesto referencial del diseño para una posible implementación del nuevo cable de fibra entre las dos partes del país.

En este proyecto técnico no habrá producto final demostrable.

## **1.3. MARCO TEÓRICO**

### **1.3.1. ANTECEDENTES DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS**

La historia de las comunicaciones ópticas a lo largo del tiempo se remonta a la Antigua Grecia cerca del siglo VI a.C. cuando los griegos comunicaron la derrota de Troya a través de señales de fuego desde Asia menor hasta Argos, hablando estrictamente no se trata de un sistema de comunicaciones, a pesar de eso, cabe destacar que en aquel tiempo los griegos ya demostraron que se podía guiar luz a través de cristales minerales. Un segundo acontecimiento fue el desarrollo de un sistema de comunicaciones realizado por los indios americanos teniendo como transmisor las señales de humo; con el paso de los años las señales ópticas se utilizaban también para la comunicación entre los barcos, arribos, entre otros [4].

Exactamente, el primer sistema de comunicaciones óptico hablando de manera rigurosa se desarrolló por el año 1792 en Francia cuando Claude Chappe propuso su telégrafo o semáforo óptico, lo cual fue un verdadero avance en la revolución de las comunicaciones de final de ese siglo. A continuación, en el 1870, John Tyndall demostró ante la *Royal Society* el guiado de luz dentro de un chorro de agua, el proceso consistió en iluminar un barril de agua en el cual se realizó una perforación y por dicho agujero, salía un flujo de agua iluminado, así fue como se demostró el principio de reflexión total

interna, cuya teoría se aplica al guiado de luz dentro de la fibra óptica. Diez años más tarde, en 1880, Alexander Graham Bell en compañía de Charles Summer Tainter, sugirieron el planteamiento del fonógrafo como sistema de comunicaciones.

A pesar de todos estos eventos, los sistemas de comunicaciones ópticos tal como son conocidos hoy en día tuvieron lugar a mediados del siglo XX, debido a dos causas principales. La primera era la necesidad de disponer de fuentes de luz y medios de transmisión adecuados que no se desarrollaron hasta esa fecha, puesto que, no había los avances científicos que lo permitirían; y la segunda fue la necesidad de una mayor capacidad de transporte de datos.

Algunos de los acontecimientos más importantes fueron: la creación del láser en 1958 a manos de Townes y Schalow, uso de los primeros cables de fibra por Kao y Hockham en 1967, desarrollo del LED (*Light Emitting Diode*) en 1971, distancias entre repetidores de 20 Km en el año 1980, distancias entre repetidores de 44 Km con velocidades de 2 Gbps en 1983, la entrada en operación del primer cable de fibra óptica submarino transatlántico con 3 pares de fibra conocido como TAT-8 en 1988, la aparición de los primeros sistemas comerciales utilizando fibra óptica con alcances de 100 km y velocidades de 2.5 Gbps en 1990, el despliegue del primer sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) en el año 1995, la instalación de cable submarino transatlántico AC-2 con una capacidad de 2.5 Tbps en 2001, de ahí en adelante se continuó con la evolución de los sistemas comerciales y mejoras en los cables de fibra óptica.

En la actualidad hay sistemas de comunicaciones ópticos que están operando a 160 Gbps por canal con un total de canales de  $640\lambda$ , y se está apuntando a tener 200 Gbps y hasta 400Gbps por canal [3].

### 1.3.2. BANDAS DE OPERACIÓN

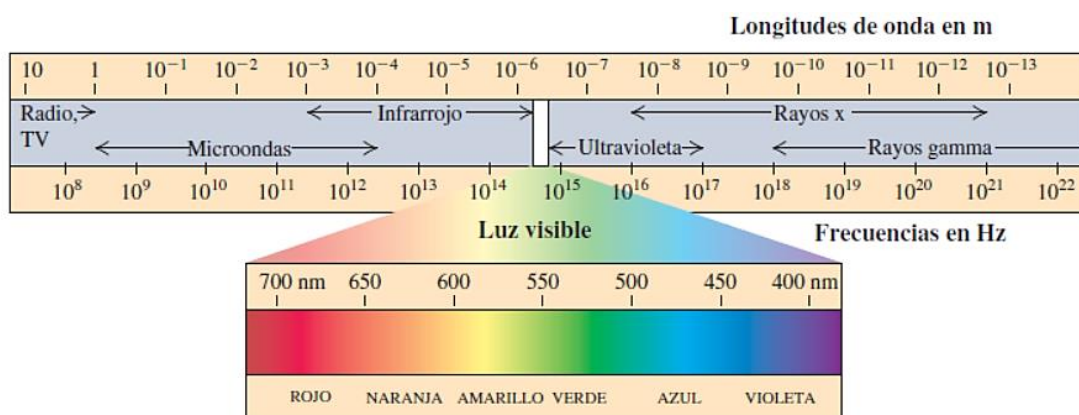


Figura 1.1. Espectro Electromagnético [5]

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas posibles, entre las más destacadas se encuentran: las ondas de radio y televisión, luz visible, radiación ultravioleta e infrarroja, rayos X y rayos gamma. En la Figura 1.1 se puede ver la parte más usual del espectro tanto en frecuencia como en longitud de onda, ambos parámetros se relacionan de acuerdo a la Ecuación 1.1:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

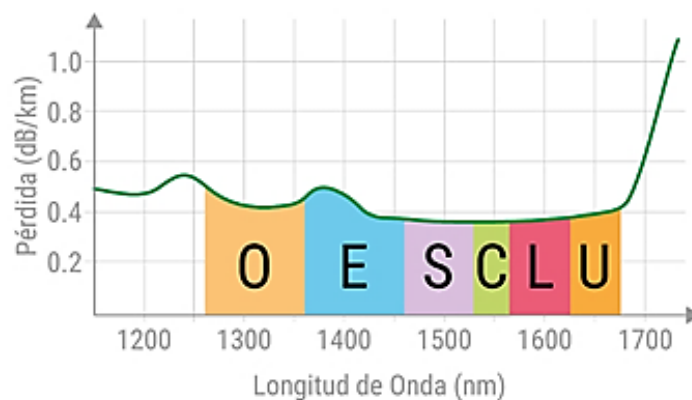
En comunicaciones ópticas, para poder transmitir la información se utiliza preferentemente la porción de infrarrojo del espectro electromagnético. El tipo de radiación infrarroja contiene tres secciones: infrarrojo lejano, infrarrojo medio e infrarrojo cercano, para que se pueda dar la comunicación se ocupan los dos últimos, cuyos valores son de 1500 a 6000 nm y de 770 a 1500 nm, respectivamente.

### 1.3.2.1. Bandas ópticas

La Unión Internacional de Telecomunicaciones definió un estándar donde se encuentran las bandas de transmisión recomendadas para poder efectuar las comunicaciones sobre fibra óptica, los rangos de cada una de las bandas se muestran en la Tabla 1.1 y se puede apreciar de forma gráfica en la Figura 1.2 [6]:

**Tabla 1.1.** Bandas Ópticas [6]

| Banda | Descripción  | Rango [nm]  |
|-------|--------------|-------------|
| O     | Original     | 1260 – 1360 |
| E     | Extendida    | 1360 – 1460 |
| S     | Corta        | 1460 – 1530 |
| C     | Convencional | 1530 – 1565 |
| L     | Larga        | 1565 – 1625 |
| U     | Ultra-Larga  | 1625 – 1675 |



**Figura 1.2.** Bandas de transmisión ópticas según la UIT [7]

### 1.3.2.2. Ventanas de transmisión

Existen algunas longitudes de onda que son más susceptibles a pérdidas que otras, consecuencia de varias causas que se tratarán con mayor detenimiento en la sección 1.3.7. Para asegurar la compatibilidad de equipos de diferentes marcas/fabricantes, se ha estandarizado ciertas longitudes de onda llamadas ventanas de transmisión, las mismas que optimizan el rendimiento de la fibra y de las fuentes de luz.

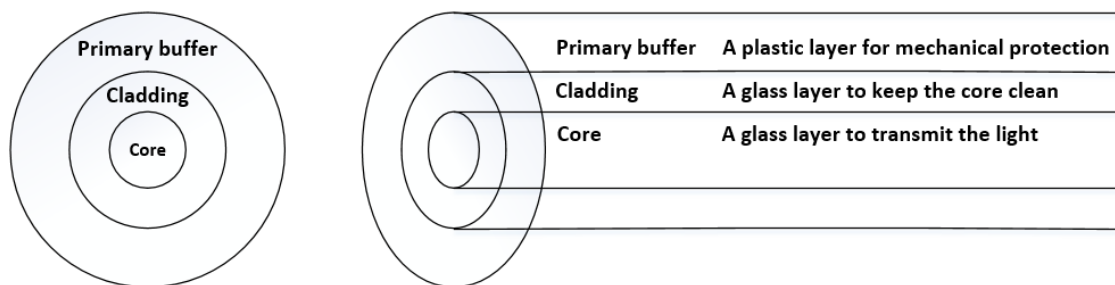
Actualmente, hay 5 ventanas de transmisión como se aprecia en la Tabla 1.2:

**Tabla 1.2.** Ventanas de transmisión [3]

| No. Ventana | Rango [nm]  | Longitud de onda de operación [nm] |
|-------------|-------------|------------------------------------|
| Primera     | 820 – 880   | 850                                |
| Segunda     | 1260 – 1360 | 1310                               |
| Tercera     | 1530 – 1565 | 1550                               |
| Cuarta      | 1565 – 1625 | 1625                               |
| Quinta      | 1460 – 1530 | 1470                               |

### 1.3.3. FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado por el cual se envían señales ópticas de luz como información. Fundamentalmente, la fibra óptica está compuesta por un núcleo (*core*) que puede ser de vidrio o de plástico, y un manto (*cladding*) que, de igual manera, puede ser de vidrio o de plástico. Se debe cumplir que el índice de refracción del manto  $n_b$  sea menor que el del núcleo  $n_a$ , para que la luz quede atrapada dentro del núcleo y pueda viajar por él. En la Figura 1.3 se puede observar las partes principales de la fibra:



**Figura 1.3.** Composición principal de la fibra óptica [8]

La fibra óptica es capaz de llevar información de sistemas de gran capacidad a largas distancias, puesto que, la señal de entrada se convierte en pulsos cortos de luz permitiendo el transporte de los datos a más de cien kilómetros sin necesidad del uso de amplificadores, esto es una gran ventaja en comparación con los cables de cobre [8].



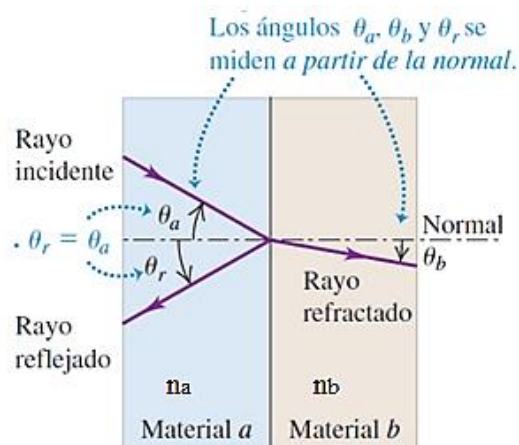
Otras de las cualidades que tiene la fibra son: insensibilidad a interferencias electromagnéticas, mucho más ligeras que otros tipos de medios de transmisión, pérdidas mínimas, gran ancho de banda. Sin embargo, el costo del equipamiento es más alto y es mucho más delicada de manipular.

### 1.3.4. PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN UNA FIBRA ÓPTICA

La luz que viaja por un medio físico depende del material del que esté fabricado el mismo, en el espacio libre la velocidad de la luz es 300 millones de metros por segundo. El índice de refracción es una propiedad del material que determina la velocidad con la que viaja la luz por el medio, se rige bajo la Ecuación 1.2 [8]:

$$\text{Velocidad de la luz en el medio físico} = \frac{\text{Velocidad de la luz en el espacio libre}}{\text{Índice de refracción del medio}} \quad (1.2)$$

Hay dos leyes que son necesarias mencionar para comprender el comportamiento de la luz dentro de la fibra óptica, como se puede observar en la Figura 1.4, y se describen a continuación [5]:



**Figura 1.4.** Leyes de reflexión y refracción [5]

- Ley de reflexión: “El ángulo de reflexión  $\Theta_r$  es igual al ángulo de incidencia  $\Theta_a$  para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales”. Se rige bajo la Ecuación 1.3:

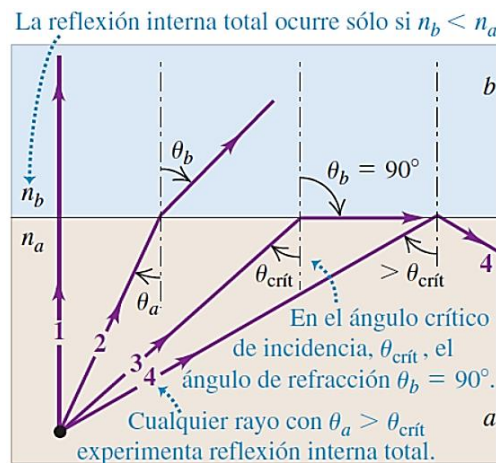
$$\theta_r = \theta_a \quad (1.3)$$

- Ley de refracción (Ley de Snell): “La razón de los senos de los ángulos de incidencia  $\Theta_a$  y de refracción  $\Theta_b$ , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie de separación de los dos medios, es igual al inverso

de la razón de los dos índices de refracción”. Regida bajo la Ecuación 1.4, donde  $n_a$  y  $n_b$  son los correspondientes índices de refracción de los materiales:

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad (1.4)$$

Existe una condición que permite que todo el rayo de luz se refleje en la interfaz, sin que haya paso de luz al segundo material, esto se conoce como el principio de reflexión interna total. Dado que  $n_b < n_a$  (índice de refracción del manto menor al de núcleo), si  $\theta_a$  aumenta eventualmente  $\theta_b$  también lo hará hasta llegar a un punto donde el rayo que incide quedará atrapado en la superficie de contacto entre los dos materiales, como se ve en la Figura 1.5, este ángulo se denomina ángulo crítico y se cumple que, para cualquier valor mayor a dicho ángulo, el haz de luz incidente se reflejará en su totalidad.



**Figura 1.5.** Reflexión Interna Total [5]

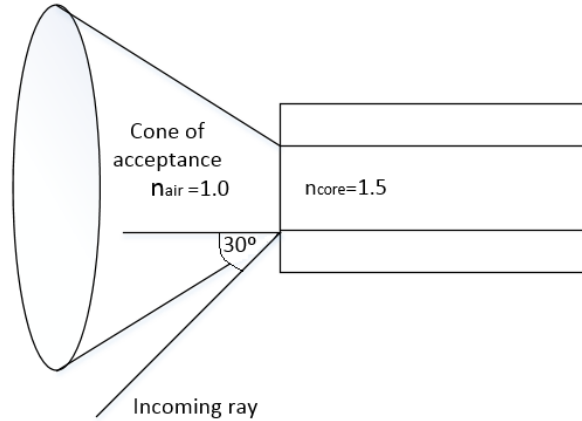
La Ecuación de la ley de Snell se expresa según la Ecuación 1.5 [5], donde  $\theta_{\text{crítico}}$  representa el valor del ángulo crítico:

$$\theta_{\text{crítico}} = \sin^{-1} \frac{n_b}{n_a} \quad (1.5)$$

En consecuencia, para que la luz se propague en la fibra óptica se debe cumplir dos condiciones, la primera que el índice de refracción del manto sea menor que el del núcleo; y la segunda que el ángulo incidente  $\theta_a$  debe ser mayor que el valor del ángulo crítico.

Cuando la luz ingresa a la fibra, es decir, en la interfaz aire–fibra óptica, se debe cumplir que el ángulo del rayo luz que ingrese a la fibra sea menor que el ángulo de aceptación, para que éste ingrese y se refracte hacia el núcleo de la fibra. El ángulo de aceptación se define como el ángulo máximo de acoplamiento  $\theta_{\text{oa}}$  y se relaciona con la apertura numérica AN de la fibra [3].

La apertura numérica es el factor que determina la cantidad de luz que puede aceptar la fibra y, por ende, la energía que puede transportar. La energía que va por la fibra está contenida en un ángulo sólido  $\Theta_{oa}$ , conocido como cono de aceptación. Como se muestra en la Figura 1.6:



**Figura 1.6** Ángulo y cono de aceptación [8]

AN y  $\Theta_{oa}$  se asocian en base a la Ecuación 1.6, y de manera más explícita se muestra la Ecuación 1.7 para la apertura numérica:

$$AN = \sin \theta_{oa} \quad (1.6)$$

$$AN = \sqrt{n_a^2 - n_b^2} \quad (1.7)$$

### 1.3.5. FRECUENCIA NORMALIZADA Y LONGITUD DE ONDA DE CORTE DE UNA FIBRA

La frecuencia normalizada es un parámetro adimensional que permite determinar si una fibra es monomodo o multimodo, está dada por la Ecuación 1.8. Donde  $\nu$  es la frecuencia normalizada y  $d_N$  es el diámetro del núcleo. Sobre los tipos de fibra se tratará con mayor detalle en la siguiente sección.

$$\nu = \frac{\pi d_N AN}{\lambda} \quad (1.8)$$

*Si  $\nu < 2.4 \rightarrow$  Fibra monomodo*

*Si  $\nu > 2.4 \rightarrow$  Fibra multimodo*

La longitud de onda de corte  $\lambda_c$  va ligada a la frecuencia normalizada y es un factor determinante en las fibras monomodo, básicamente es la longitud de onda más pequeña para la cual la fibra propaga un solo modo. Se puede determinar con la Ecuación 1.9:

$$\lambda_c = \frac{\pi d_N AN}{2.4} \quad (1.9)$$

### 1.3.6. TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica, como se mencionó anteriormente puede ser de plástico o más comúnmente de vidrio, en las fibras que son hechas de vidrio se tienen mejores características que en las de plástico en cuanto a distancia y pérdidas, sin embargo, suelen ser más costosas, frágiles y pesadas. Por otro lado, la fibra puede clasificarse de acuerdo al perfil de índice de refracción y en base al número de modos de propagación en la fibra.

El perfil de índice de refracción es una función gráfica que indica la forma como varia  $n$  con respecto al eje de la fibra, de manera general se dividen en dos categorías: perfiles escalonados y perfiles graduales; y, los modos de propagación representan el número de rayos de luz que pueden transmitirse en la fibra, de tal manera que se clasifican en fibras multimodo y fibras monomodo.

#### 1.3.6.1. Fibras multimodo

Las fibras multimodo son aquellas que permiten el paso de múltiples rayos de luz en su interior, cada uno de los ellos tiene una diferente trayectoria o modo de propagación. Entre las características más destacadas de este tipo de fibra se encuentran: diámetros típicos del núcleo entre 50 y 62.5  $\mu\text{m}$ , aunque se fabrican también con valores más altos, el diámetro típico del manto está por los 125  $\mu\text{m}$ , alcanzando hasta algunas pocas centenas de micrómetros ( $\mu\text{m}$ ); el tipo de fuentes que requieren no son de gran precisión, bastaría con una fuente tipo LED (*Light Emitting Diode*); el alcance se restringe a un par de kilómetros; la atenuación presente en la fibra es considerable, pero aun así es mejor que los medios de cobre; la apertura numérica es amplia por lo que permite el paso de varios haces de luz, típicamente entre 0.2 y 0.5.

Por otro lado, debido a la presencia de múltiples rayos de luz, la trayectoria que sigue cada rayo es diferente, lo que produce que cada uno de ellos llegue en diferentes tiempos y haya un ensanchamiento de los pulsos de luz, este efecto es mejor conocido como dispersión modal, el cual es acumulativo con la distancia por lo que limita el ancho de banda [7].

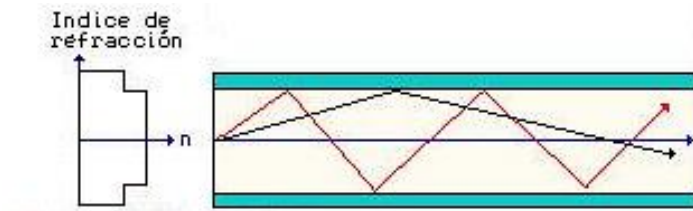
Existen dos subtipos de fibra multimodo que se presentan a continuación [9]:

- Fibras multimodo de índice escalonado MMSI:

Son aquellas donde el índice de refracción del núcleo y del manto son uniformes, y se cumple que  $n_a$  es mayor a  $n_b$ , en este tipo de fibras los rayos de luz viajan con velocidad constante a través del núcleo, dado que, cada rayo sigue trayectorias diferentes, éstos llegan a tiempos desiguales al otro extremo de la fibra, y se produce

una fuerte presencia de dispersión modal. El número de modos en este tipo de fibras se rige bajo la Ecuación 1.10. Donde  $d_N$  es el diámetro del núcleo,  $AN$  es la apertura numérica y  $\lambda$  es la longitud de onda de operación. En la Figura 1.7 se puede observar la forma de propagación de algunos rayos de luz en una fibra multimodo de índice escalonado.

$$M = 0.5 \left( \frac{\pi d_N AN}{\lambda} \right)^2 \quad (1.10)$$

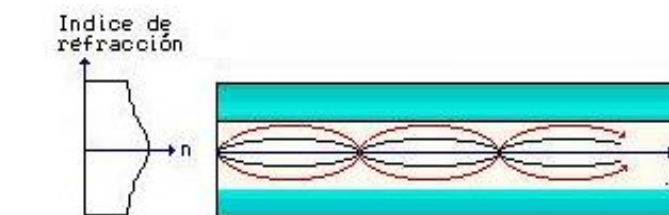


**Figura 1.7.** Propagación en una fibra multimodo de índice escalonado [10]

- Fibra multimodo de índice gradual MMGI:

En este tipo de fibra el índice de refracción del manto es constante, pero el del núcleo varía siendo más denso en el centro y disminuyendo conforme se aleja del mismo hasta la frontera núcleo – manto. En esta fibra los rayos de luz viajan a diferentes velocidades, debido a que como se mencionó antes la velocidad de un haz dependía del índice de refracción según la Ecuación 1.2, mientras más alejado del centro de la fibra está el rayo de luz, irá más rápido, a pesar de que la distancia que recorre es mayor, llega casi al mismo tiempo que aquel rayo que viaja cerca del centro de la fibra; por lo que se reduce la dispersión modal y a su vez presenta mayor ancho de banda respecto de las MMSI. El número de modos en este tipo de fibras está dado por la Ecuación 1.11, y la forma de propagación de los haces de luz se puede observar en la Figura 1.8.

$$M = 0.25 \left( \frac{\pi d_N AN}{\lambda} \right)^2 \quad (1.11)$$



**Figura 1.8.** Propagación en una fibra multimodo de índice gradual [10]

### 1.3.6.2. Fibras monomodo

En las fibras monomodo, la idea es transmitir un solo rayo de luz, es decir, un solo modo de propagación, por lo que el diámetro del núcleo se reduce considerablemente en comparación al de las fibras multimodo, esto permite que no exista dispersión modal, lo cual representa un mayor ancho de banda. Los diámetros típicos de núcleo en este tipo de fibra están alrededor de los 10  $\mu\text{m}$ . [3] Como se observa en la Figura 1.9 el rayo de luz es mucho más directivo. Sin embargo, en el momento de introducir un rayo de luz en la fibra se requieren usar fuentes de alta precisión (tipo láser).



**Figura 1.9.** Propagación en una fibra monomodo de índice escalonado [10]

Al inicio se estandarizó un solo tipo de fibra conocido como *Standard Single Mode Fiber* (SSMF), cuyo perfil de índice de refracción era escalonado; sin embargo, en la actualidad se fabrican fibras monomodo con otros tipos de perfiles, tales como: perfil “W”, perfil “A” y/o el doble ranurado [3]. Para hacer posible la transmisión, se debe cumplir que la frecuencia normalizada esté entre 0 y 2.405 [9].

La atenuación y otro tipo de pérdidas en las fibras monomodo es significativamente baja en comparación con las fibras multimodo, además, las longitudes de onda en donde trabajan son diferentes. Por último, las distancias que pueden alcanzar las fibras monomodo son considerables por encima de los 100 km sin necesidad de algún tipo de regeneración, conocidas también como fibra para redes *long haul*. No obstante, en este tipo de redes de largo alcance, el uso de amplificadores si suele ser necesario alrededor de los 100 km o menos.

### 1.3.7. CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Como en todo medio de transmisión existen factores que afectan/alteran el rendimiento de la fibra óptica, entre estos factores están pérdidas, las cuales son necesarias de considerar para el correcto funcionamiento de un sistema de comunicaciones, en especial si éste es de largo alcance; debido a que algunas de ellas son más críticas en ciertas longitudes de onda, se acumulan con la distancia o son propias de la composición de la fibra. Según [9], se tienen varios tipos de pérdidas que se detallan en las siguientes subsecciones.

### 1.3.7.1. Atenuación

La atenuación se considera como la pérdida de potencia que sufre una señal, para el caso una señal óptica, conforme se propaga en la fibra. El cálculo de la atenuación “ $\alpha$ ” en un enlace de comunicaciones se lo realiza en base a la potencia de salida  $P_S$  con respecto a la potencia de entrada  $P_E$ , conforme a la Ecuación 1.12. Normalmente el fabricante expresa las pérdidas de una fibra en dB/km [11].

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_S}{P_E} \text{ [dB]} \quad (1.12)$$

### 1.3.7.2. Pérdidas por absorción de material

Este tipo de pérdidas van relacionadas con la composición de la fibra, puesto que, existen impurezas en el vidrio que son imposibles de eliminar en su totalidad, pese a la aplicación de los más altos estándares de calidad en los procesos de fabricación actuales, lo que produce la absorción de luz a nivel molecular que se transforma en calor. Éstas pueden ser intrínsecas, causadas por la interacción con uno o más de los componentes de vidrio; y extrínsecas, ocasionadas por las impurezas dentro del vidrio como es la absorción por iones hidroxilo, debido a que no se puede eliminar el 100% de agua en el vidrio, la relación de agua en el vidrio debe mantenerse en  $1/10^9$  para tratar de reducir las pérdidas por este fenómeno a lo más mínimo posible [9].

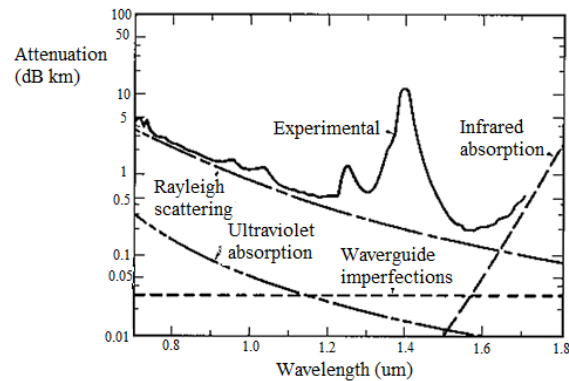
- Pérdidas intrínsecas:

Esta clase de pérdidas son función de la longitud de onda, en este grupo se encuentran las pérdidas por absorción ultravioleta que son significativas hasta los 1000 nm, decreciendo exponencialmente con la longitud de onda, y las pérdidas por absorción infrarroja que son considerables a partir de los 1400 nm y crecen de forma exponencial con la longitud de onda, como se puede observar en la Figura 1.10.

- Pérdidas extrínsecas:

En este grupo se tiene absorción por la aparición de los iones hidroxilo debido al vapor de agua presente en la fabricación del vidrio. Estos grupos de iones hidroxilo se esparcen a lo largo de la estructura del vidrio y afectan fundamentalmente en 3 picos que están ubicados en 0.72  $\mu\text{m}$ , 0.95  $\mu\text{m}$  y el más significativo en 1.38  $\mu\text{m}$ , como se muestran en la Figura 1.10 [9]. Existen otros tipos de impurezas por residuos metálicos tales como: cromo, cobre, las cuales pueden causar pérdidas de 1 dB por km cerca de la región infrarroja; adicionalmente hay presencia de Carbono, Hierro, Níquel, Manganeso, Vanadio; sin embargo, hoy en día, con el avance y mejoramiento de las técnicas de fabricación se han logrado reducir estas pérdidas, por lo que no representan un problema considerable. Un ejemplo bastante bueno de

aplacamiento de los picos de este tipo de absorción son las fibras *Zero Water Peak* (ZWP) o *Low Water Peak* (LPW)<sup>1</sup> [3].



**Figura 1.10.** Pérdidas por absorción y *scattering* de Rayleigh [9]

### 1.3.7.3. Pérdidas por *Scattering* lineal

El término *scattering* (dispersión) en este contexto se refiere al esparcimiento de la luz, es decir cuando un rayo de luz incide sobre un obstáculo, y en vez de reflejarse un rayo, se reflejan varios en distintas direcciones (reflexión difusa<sup>2</sup>). Las pérdidas por *scattering* lineal produce una atenuación en la luz, pues parte de ella se fuga hacia el manto. Se dice que es un proceso lineal, puesto que, no hay cambio de frecuencia. En esta clasificación hay dos tipos, *Scattering* de Rayleigh y *Scattering* de Mie, que se explican a continuación:

- *Scattering* de Rayleigh:

Tiene lugar en las longitudes de onda comprendidas desde la región ultravioleta hasta la infrarroja, debido a las inhomogeneidades de la fibra, las mismas que producen cambios en el índice de refracción. En el instante que ingresan los rayos de luz y chocan con alguna de estas irregularidades, cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda del haz que ingresa, los rayos de luz se difractan, produciendo pérdidas a causa de que parte de la luz escapa al manto [9]. Decece exponencialmente con la longitud de onda elevada a la cuarta potencia, como muestra la Ecuación 1.13, para evitar este inconveniente es recomendable trabajar en longitudes de onda grandes, de tal forma que las pérdidas por este fenómeno disminuyan como se puede observar en la Figura 1.10.

<sup>1</sup> Fibras ZWP: Es un tipo de fibra que presenta mínima atenuación en tercera ventana, reduce al máximo los efectos ocasionados por la absorción debida a la presencia de iones hidroxilo OH.

<sup>2</sup> Reflexión difusa: Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie y en vez de reflejarse un rayo, se reflejan varios en distintas direcciones.



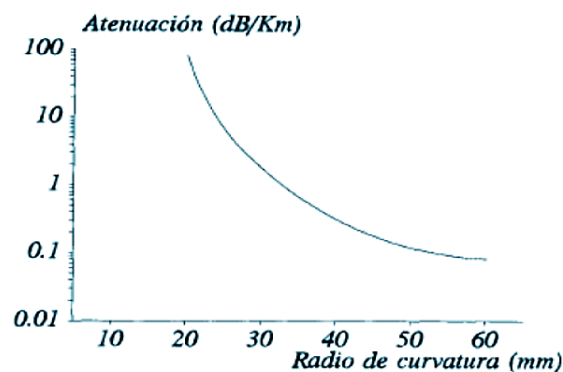
$$P_{Rayleigh} \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.13)$$

- *Scattering* de Mie

Éstas se dan cuando los diámetros de las imperfecciones dentro de la fibra son comparables o mayores que el tamaño de la longitud de onda de la luz. Para reducir el efecto por esta dispersión se tienen tres soluciones: la primera es reducir las imperfecciones durante la fabricación del vidrio, la segunda es tener un control adecuado en los procesos de extrusión y revestimiento de la fibra y finalmente incrementar la diferencia de índices de refracción del manto y del núcleo. Con todas estas recomendaciones se ha logrado prácticamente eliminar las pérdidas por este fenómeno.

#### 1.3.7.4. Pérdidas por curvaturas

Los cables de fibra óptica en el momento del tendido o bobinado de la fibra, se prestan a que haya una alteración en el ángulo de incidencia en la interfaz núcleo - manto, lo cual conlleva a una modificación en el principio de reflexión interna total y a su vez produce fugas de luz hacia el manto. Mientras no se sobrepase un radio de curvatura crítico, estas pérdidas no serán de relevancia; además, entre menor sea el radio de curvatura, mayor será la atenuación, presentando una variación exponencial como se puede observar en la Figura 1.11 [3].



**Figura 1.11.** Pérdidas por curvaturas [3]

Es importante destacar que hay pérdidas por microcurvaturas, mismas que se deben a las irregularidades y/o variaciones entre los tamaños del núcleo y el manto, alteraciones en el material del cual está hecho el cable debido a cambios de temperatura y por fuerzas aplicadas en la parte lateral del cable. Típicamente, este tipo de pérdidas están presentes alrededor de los 1500 nm, en longitudes de onda altas, crecen casi exponencialmente.

### 1.3.7.5. Dispersión

En este contexto dispersión hace referencia al ensanchamiento temporal de un pulso de luz en el trayecto hasta el destino, y como consecuencia de ello se puede producir el solapamiento con los otros pulsos vecinos, por lo que causa que el receptor no sea capaz de distinguir la información que le fue enviada, este efecto es mejor conocido como Interferencia Inter Símbolo (ISI), la cual introduce errores en los datos [9]. En la Figura 1.12 se puede observar la señal de entrada, su comportamiento al pasar por los diferentes tipos de fibra y finalmente su salida.

Retomando los argumentos de la sección 1.3.5, en el primer caso se tiene una fibra MMSI, seguida de una MMGI y finalmente una monomodo. Se puede observar que el peor escenario se tiene en la MMSI, en el caso de las MMGI se presenta una mejoría y el escenario más apropiado es con las fibras monomodo. En los siguientes puntos se explicará de mejor manera este tipo de dispersión.

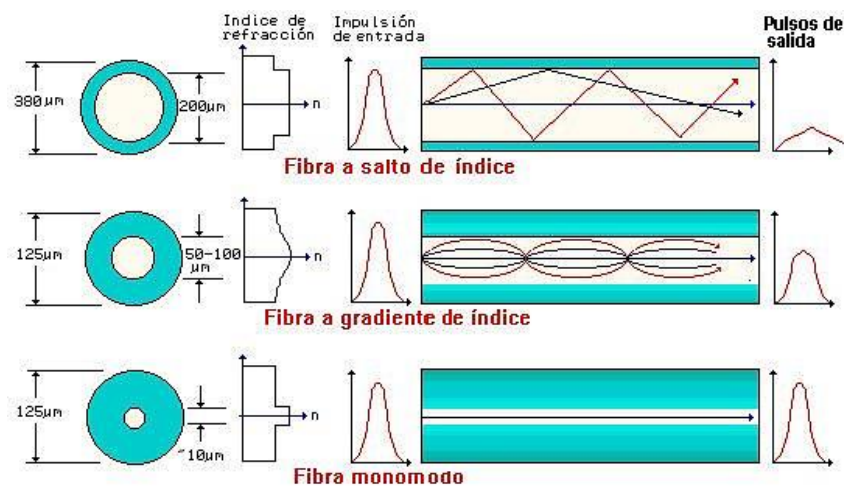


Figura 1.12. Ensanchamiento de pulso en los diferentes tipos de fibra [10]

### 1.3.7.6. Dispersión intramodal $T_c$

Más conocida como dispersión cromática, se debe a que las fuentes de luz no emiten una sola frecuencia, sino un conjunto de frecuencias caracterizadas por el parámetro anchura espectral; como consecuencia de ello, existen retardos entre las diferentes componentes espectrales de la señal transmitida. Esto produce un ensanchamiento de los pulsos ópticos y por lo tanto este tipo de dispersión. Existen dos componentes de la dispersión cromática que se detallan a continuación.

- Dispersión Cromática de Material  $T_e$

Este tipo de dispersión resulta de las distintas velocidades de las varias componentes espectrales de la luz que provienen de la fuente dado que el índice de

refracción varía con la longitud de onda, por tanto estas experimentan diferentes retardos, los cuales producen ensanchamiento en los pulsos de luz [9], se define el coeficiente de dispersión de material, el cual se mide en ps/km.nm. Para obtener el valor de esta dispersión en ps/nm, hay que multiplicar el valor típico de dicho coeficiente de la fibra que se esté utilizando por la distancia de la fibra. Los valores típicos para las fibras que trabajan en primera ventana van de 80 a 100 ps/km.nm, a medida que aumenta la longitud de onda este valor disminuye, cerca de segunda ventana este valor baja alrededor de 5 ps/km.nm [3].

#### - Dispersión Cromática de Guía de Onda $T_g$

Son de consideración en las fibras monomodo, debido a que el 80% de la energía lumínica viaja por el núcleo y el restante viaja a una mayor velocidad por el manto, llegando antes al otro extremo de la fibra, esto produce este tipo de dispersión. Su coeficiente tiene las mismas unidades que el de la dispersión cromática de material. Puede ser de ayuda, ya que, alrededor de segunda ventana contrarresta el efecto de la dispersión cromática de material, esta longitud de onda se conoce mejor como longitud de onda de dispersión cromática nula.

Además, pueden hacerse cambios en el perfil de índice de refracción para conseguir que el cero de dispersión cromática se dé en la tercera ventana, esto se puede lograr con las fibras de dispersión desplazada DFS (*Dispersion Shifted Fiber*)<sup>3</sup> [3].

#### **1.3.7.7. Dispersión intermodal $T_m$**

Se conoce mejor como dispersión modal, este tipo de dispersión únicamente tiene relevancia en las fibras multimodo, ya que se produce debido a que los diferentes modos de propagación de la fibra llegan al otro extremo de la misma en tiempos distintos, como se vio en la sección 1.3.6.1. Las unidades que se manejan para este tipo de dispersión son los ns.

#### **1.3.7.8. Dispersión total de la fibra**

La expresión para calcular la dispersión total en una fibra en términos de la dispersión intra e intermodal, de manera explícita viene dada por la Ecuación 1.14 [3]. A partir de esta expresión se puede determinar la dispersión total de acuerdo al tipo de fibra. La dispersión cromática total  $T_c$  es la suma de la dispersión de material  $T_e$  y la de guía de onda  $T_g$ .

---

<sup>3</sup> DSF: Tipo de fibra que tiene un incremento en la dispersión de guía de onda para conseguir dispersión cromática nula en tercera ventana, donde también se tiene mínima atenuación [3].

$$\tau^2 = \tau_m^2 + (\tau_e + \tau_g)^2 \quad (1.14)$$

En fibras multimodo, la dispersión total viene dado por la Ecuación 1.15. La dispersión por guía de onda no tiene lugar en esta expresión.

$$\tau_T = \sqrt{(\tau_m^2 + \tau_e^2)} \quad (1.15)$$

Para las fibras monomodo, no tiene sentido hablar de dispersión modal, ya que ésta es nula, en virtud de eso la expresión para la dispersión total en este tipo de fibras se expresa de acuerdo a la Ecuación 1.16. Hay que considerar que esta expresión es válida únicamente hasta tasas de transmisión menores a 10 Gbps.

$$\tau_T = (\tau_e + \tau_g) \quad (1.16)$$

### 1.3.7.9. Dispersión por Modo de Polarización $\tau_p$

Sólo tiene importancia en las fibras monomodo. En el eje de propagación hay polarizaciones ortogonales (campo eléctrico y magnético) cuyas componentes viajan a diferentes velocidades, producto de las asimetrías del núcleo, como si el núcleo tuviera dos índices de refracción distintos.

Para que este fenómeno sea de consideración, el sistema debe tener una tasa de transmisión por encima de 10 Gbps. Los valores más comunes del coeficiente de este tipo de dispersión se encuentran en el rango de 0.1 a 1 ps/km<sup>1/2</sup>, lo cual significa que a grandes distancias no representan un problema. El valor del coeficiente de esta dispersión tiene que ser especificado por el fabricante, dependiendo del tipo de fibra que se utilice.

### 1.3.8. EFECTOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA

Existe otro tipo de efectos no lineales provocados por una intensidad óptica excesiva aplicada a la fibra y son más intensos en fibras con área efectiva<sup>4</sup> reducida. Hay tres tipos que se describen a continuación:

- Automodulación de Fase SPM (*Self Phase Modulation*)

Consiste en la modificación (ensanchamiento) de un pulso de un canal óptico (longitud de onda), debido a la excesiva intensidad de luz, que produce un ligero incremento en el índice de refracción, lo cual trae como consecuencia un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad del pulso. Este fenómeno combinado con la dispersión cromática puede deteriorar la forma de los pulsos que

---

<sup>4</sup> Área efectiva: Es un parámetro que especifica el área de la fibra por el cual viaja la luz, determinada por el diámetro de campo modal.

se están transmitiendo, sin embargo, a determinada longitud de onda se puede lograr que la SPM contrarreste a la dispersión cromática. Cabe recalcar que este efecto como depende de la intensidad de potencia de la luz, y ésta se va perdiendo conforme avanza en distancia, no representa un problema a largas distancias.

- *Modulación de Fase Cruzada XPM/CPM (Cross Phase Modulation)*

A diferencia del caso anterior de la SPM, este efecto se debe no solo a la intensidad de una señal, sino de las señales adyacentes que viajen junto a ella, y pueden provocar cambios de fase en el resto de pulsos de las demás longitudes de onda que se estén propagando en la misma fibra. Es de vital importancia en los sistemas de comunicaciones que manejan WDM, puesto que, como viajan varias longitudes de onda en el mismo medio, éstas interactúan entre si causando el ensanchamiento de los pulsos y constituyen un limitante en la capacidad de dichos sistemas.

- *Mezcla de Cuatro Ondas FWM (Four Wave Mixing)*

Este efecto no lineal se basa en la creación de nuevas frecuencias como resultado de la combinación de tres frecuencias de los canales presentes en el sistema, y puede afectar de dos formas: la primera es que la frecuencia resultante se alimenta de la potencia de las frecuencias que sí son del sistema y la segunda que la nueva frecuencia puede coincidir con una de las frecuencias propias del sistema causando interferencia y degenerando los pulsos de información. Una solución para combatir este efecto es utilizar fibras monomodo de dispersión desplazada no nula (NZDSF)<sup>5</sup>, debido a que este fenómeno se presenta cuando la dispersión cromática es cero.

### **1.3.9. CABLES PARA FIBRA ÓPTICA**

Los cables de fibra óptica son necesarios para facilitar la manipulación de la misma, evitar daños físicos, servir de soporte, entre otras funcionalidades. La composición del cable consta de algunos elementos que son importantes considerar para la protección e integridad de la fibra, puesto que, ésta no siempre va a estar en un ambiente con todas las condiciones para mantenerla a salvo de los averíos que puede sufrir; la mayoría de ambientes son agresivos, debido a esto es necesario salvaguardarla para que no sufra mayores alteraciones en su estructura y el sistema de comunicaciones óptico tenga un mejor desempeño.

---

<sup>5</sup> NZDSF: Son fibras monomodo donde el punto de dispersión cromática nula se desplaza a longitudes de onda superiores o inferiores a 1550nm, contrarrestando el efecto de FWM.

Adicionalmente, el cable debe tener ciertas características para lograr una adecuada protección en la fibra, entre las más importantes se tiene:

- Debe ser flexible, y con gran resistencia a la vibración, tracción y torsión.
- Ser de bajo peso para evitar daños físicos en la fibra.
- Presentar facilidad de alineación, identificación, limpieza, corte y empalme.
- Ser resistente a factores como la humedad, fuego y agua.
- Permitir una atenuación estable.

En la sección 1.3.3 se mencionó sobre la composición de la fibra, en esta parte del documento se incluye la composición del cable de fibra óptica; existen algunos elementos cuya presencia varía dependiendo del tipo de cable que se emplee. Entre los más importantes se encuentran [3]:

- Revestimientos de protección (*jacket*)

Aíslan a la fibra del medio externo, protegiéndola de los cambios de temperatura, sustancias tóxicas/químicas que los puedan dañar. Hay varios tipos de estos revestimientos, de diferentes materiales tales como: polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano, fluoropolímeros, vinilacetato de etileno. La elección del material va a depender de si el cable se va a instalar en un ambiente externo o interno. La mayoría de estos materiales poseen buena resistencia y/o retardo al fuego y a agentes tóxicos, algunos de ellos son libres de halógenos.

- Recubrimientos

Por otro lado, en la fibra se tienen dos recubrimientos. El primero llamado recubrimiento primario, es la protección inicial de la fibra evitando la formación de microcurvaturas, éste tiene contacto directo con el manto y puede ser de acetato de celulosa o resinas de silicona; el segundo recubrimiento es el secundario y dependiendo de la situación puede ir adosado al recubrimiento primario o puede contener algunas fibras con recubrimiento primario dentro de él. De acuerdo al tipo de cable, basados en la estructura del mismo, estos recubrimientos son de diferentes colores para ayudar a distinguir cada uno de los hilos de fibra o grupos de fibras dentro del cable (tubos).

- Kevlar

Son hilos de aramida y a pesar de ser muy ligeros, son capaces de soportar un gran esfuerzo mecánico. Son de mucha utilidad contra los roedores, ya que son muy difíciles de romper y tienen un mal sabor.

- Miembro central de refuerzo

Este elemento ayuda con el soporte del cable ya que le brinda fuerza, generalmente son de acero, pero también el kevlar puede ser utilizado para esta función (cables dieléctricos). Puede ser puesto tanto en cables para interiores como exteriores.

- Coraza de acero

Puede ser utilizada tanto en cables para interiores como exteriores, y sirve para ayudar en el soporte de carga debido a esfuerzos mecánicos como la compresión cuando un cable es enterrado. Se debe considerar que como este material es un conductor, debe estar conectado correctamente a tierra.

- Relleno intersticial

Es de un material hidrófugo, como la gelatina de petróleo. Proporciona impermeabilidad a los cables, sólo se utiliza en cables de estructura holgada, rellenando el recubrimiento secundario con él.

- Hilo de rasgado

La función de este hilo es facilitar la ruptura de los recubrimientos es muy fuerte por lo cual es de suma utilidad para cortar el *jacket* de protección.

Por otra parte, existen varios tipos de cable para fibra óptica, esto se debe a que no todos los ambientes donde se instalan los sistemas ópticos son iguales. De manera general hay ambientes internos y externos; yendo más a fondo el tipo de cable depende también de otros factores como: los dispositivos terminales e intermedios, el tipo de instalación, el tipo de cableado, la distancia, el tipo de aplicación, entre otros.

Entre los cables para ambientes internos más importantes se tiene: cables intradispositivos, cables intraedificio, cables *riser* (cableado vertical), cables *plenum* (cielo falso o ductos), cables *breakout* (intraedificio multifibra). En cambio, en los cables para exteriores se tiene: cables aéreos (tienen miembro de refuerzo como el *All Dielectric Self Support (ADSS)* u *Optical Ground Wire (OPGW)*), cables subterráneos (acorazados) y cables submarinos. Sumado a lo anterior, hay cables de estructura holgada o *loose tube* (varias fibras en el recubrimiento secundario cubiertas por el relleno intersticial), y de estructura ajustada o *tight buffer* (una sola fibra en el recubrimiento secundario, adosado al recubrimiento primario) [3]. En la siguiente subsección se abordará el estudio del cable submarino.

## **1.3.10. CABLE SUBMARINO**

### **1.3.10.1. Generalidades**

El cable submarino es un tipo de cable exterior *loose tube*, que reposa en las profundidades marinas, conforme a lo dicho, hay cables de baja y media profundidad (hasta 4000 m), y cables de alta profundidad (hasta 8000 m). Este tipo de cable sirve para la interconexión con el mundo debido a sus altas prestaciones en capacidad, velocidad, ancho de banda, baja atenuación, largas distancias e inmunidad a la interferencia electromagnética. Adicionalmente, son de gran importancia a nivel global, ya que transportan mayor cantidad de tráfico que cualquier otro sistema de comunicaciones.

El primer cable submarino de la historia (cable de cobre) fue inaugurado el 16 de agosto 1858 por manos del experto en telégrafos Cyrus Field y el físico William Thomson, conectaba Europa (Foilhommerum Bay – Irlanda) y América (Terranova – Canadá) atravesando el océano Atlántico alrededor de 3000 km de distancia, su interconexión se logró por medio del encuentro de dos barcos en el océano, tras dos intentos fallidos se logró la conexión, sin embargo, apenas duró tres semanas en funcionamiento dando un escenario a futuro para el desarrollo de la tecnología de comunicaciones por cables submarinos transoceánicos [12]. Para el año 1866 se logró instalar otro cable submarino de cobre con mejores características de eficiencia y calidad y para finales del siglo XVIII ya había quince cables en funcionamiento, conforme fue avanzando la tecnología en comunicaciones, se migró de cables submarinos de cobre a cables submarinos de fibra óptica debido a su alta eficiencia y capacidad, logrando así la interconexión mundial.

El primer cable submarino óptico fue instalado en el año 1988, llamado TAT – 8; unía Estados Unidos, Gran Bretaña y Francia, los auspiciantes fueron AT&T Corporation, British Telecom y France Télécom, respectivamente. Estaba compuesto por dos pares de fibra en uso y un par adicional para redundancia, el cual tuvo una serie de inconvenientes entre ellos el ataque de los tiburones, daños por redes de arrastre, sin embargo, operó con una capacidad 20 Mbps por cada hilo de fibra, tenía regeneradores de señal cada 40 km y marcó el desarrollo futuro de los cables ópticos submarinos, el retiro de operación de este cable fue en el año 2002.

Los siguientes cables que se implementaron tuvieron varias mejoras en capacidad, técnicas de empalme, amplificadores, regeneradores de señal, protecciones del cable contra el ataque de la fauna marina, redes de arrastre y corrientes marinas; entre otros factores a corregir. En el esquema de la Figura 1.13 se pueden observar todos los cables submarinos que a la fecha existen. [Última actualización 4 de octubre de 2019].



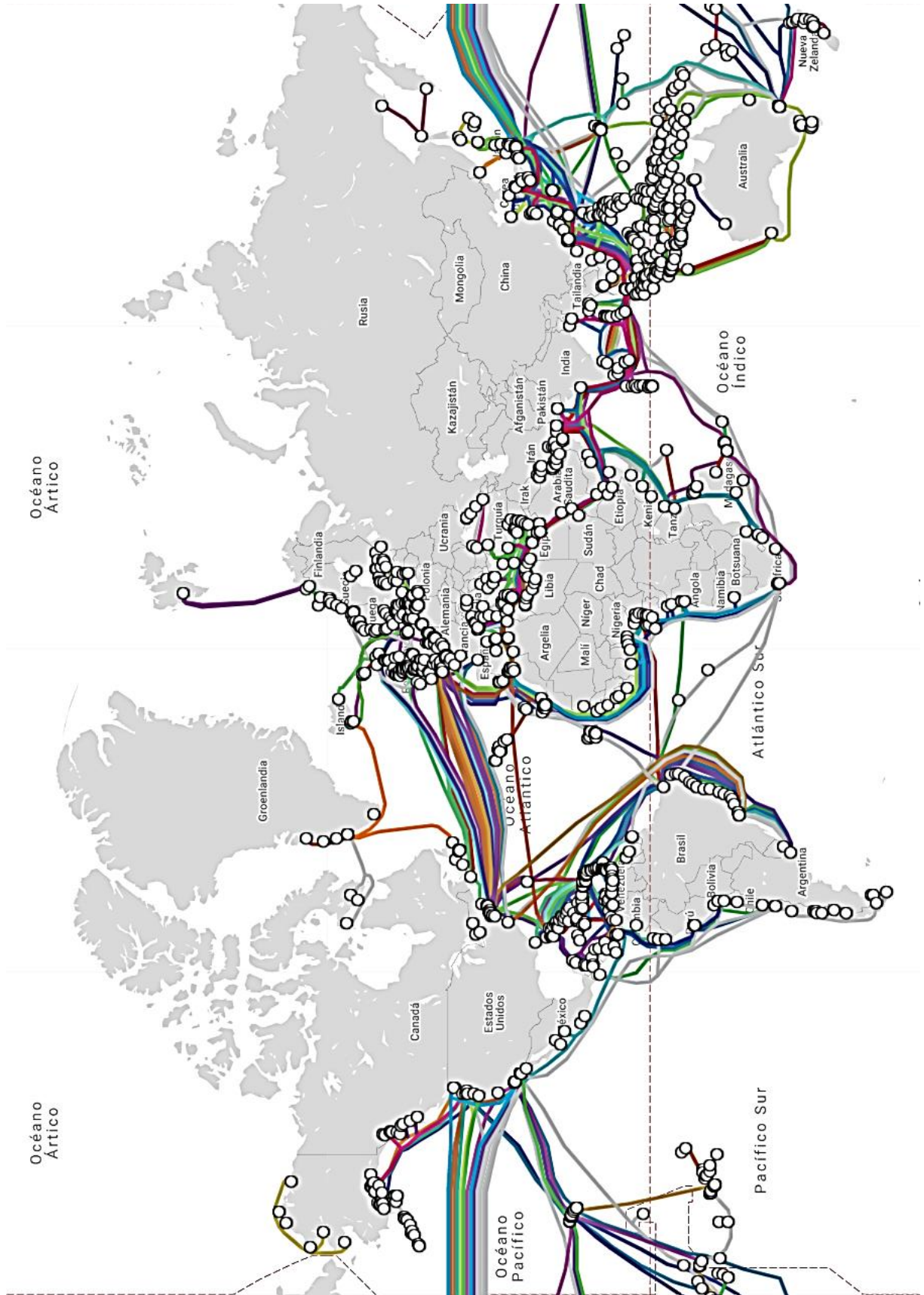
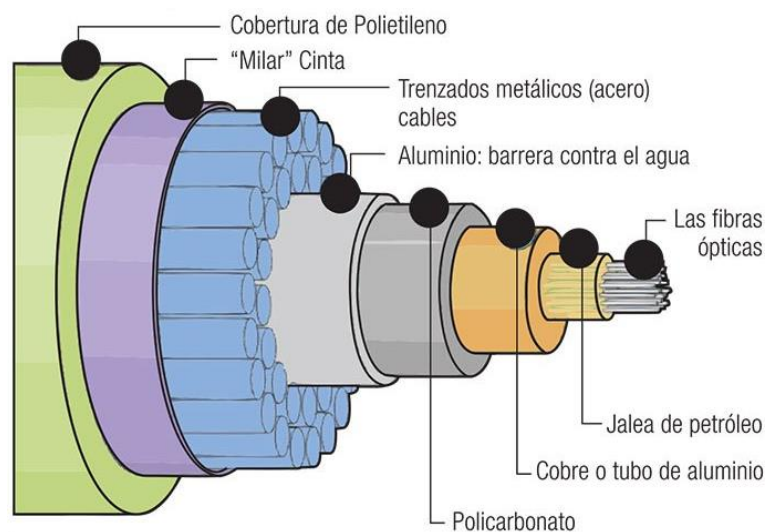


Figura 1.13. Mapa de cables submarinos en el mundo a la fecha [13]

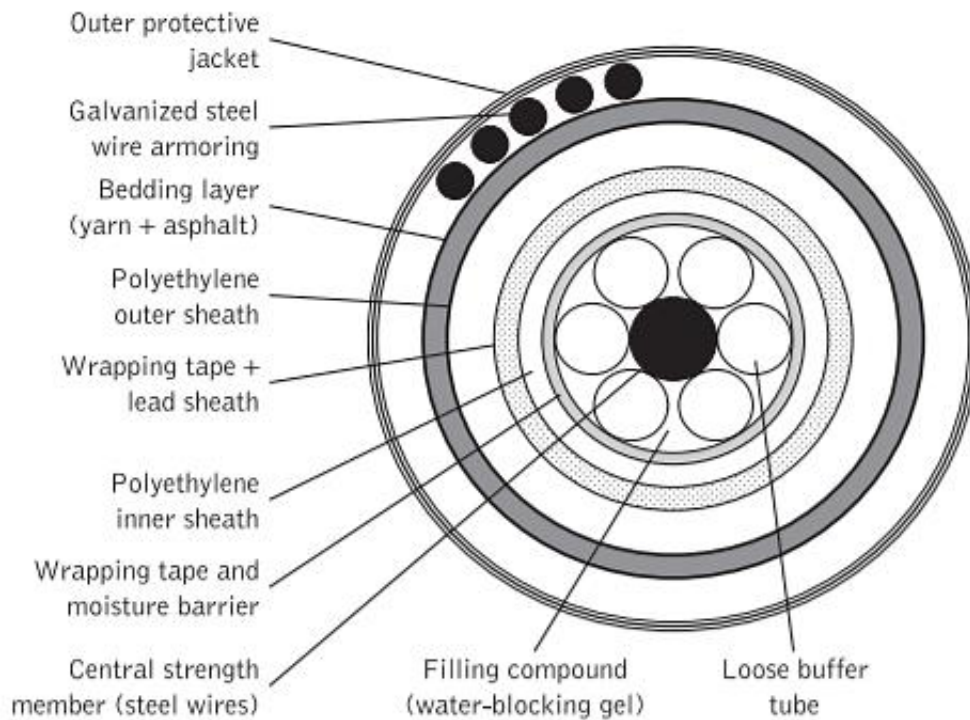
En Ecuador hay tres cables submarinos a los que se tiene acceso, los cuales son [13]:

- *Pacific Caribbean Cable System*, PCCS: Es el más reciente de los tres cables submarinos, ya que fue inaugurado en septiembre del 2015 y cuya longitud es de 6000 km. Una asociación de compañías son las propietarias del cable, en Ecuador el representante es Telconet. El punto de amarre es en el puerto de Manta.
- *South American – 1*, SAM – 1: Se lo conoce también como Emergia, este cable fue instalado en marzo del 2001, con una longitud de 25000 km. Telxius es el propietario de este cable, se tiene acceso a este cable por medio del cable *Telefónica Internacional Wholesale Services* (TIWS), que va desde Punta Carnero hasta el lugar donde se enlaza con SAM – 1, la longitud de este cable es 797 km.
- *Pan American*, PAN – AM: Mejor conocido como cable panamericano, puesto en funcionamiento en febrero de 1999, el más antiguo con una longitud de 7225 km, los propietarios del cable son varias empresas, en Ecuador es CNT, al igual que SAM – 1 su cabeza de amarre está en Punta Carnero.

La composición del cable submarino, consta de varios elementos que son fundamentales para la protección de la fibra, posee varias capas de protección de diversos materiales tales como: variaciones de polímeros, algunos metales, cintas, relleno intersticial (que como se mencionó en los párrafos anteriores es necesario para mantener la impermeabilidad del cable), entre otras partes que se pueden observar en la Figura 1.14 y en la Figura 1.15, se puede decir que éste es un cable de tipo *loose tube*. Los componentes del cable submarino fueron detallados en la sección 1.3.9.



**Figura 1.14.** Vista lateral del cable submarino [14]



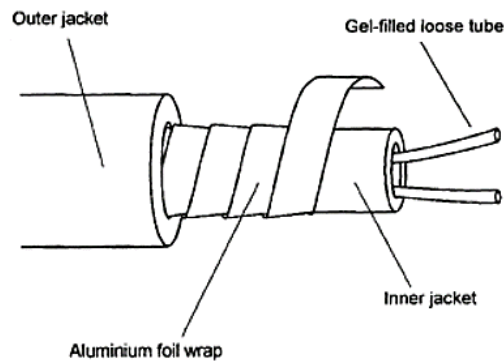
**Figura 1.15.** Vista frontal del cable submarino [9]

### 1.3.10.2. Parámetros a considerar en el cable submarino

En general, existen algunos parámetros de los cables de fibra óptica que son de suma importancia considerar para el correcto funcionamiento de un sistema óptico; en el caso de un sistema por cable submarino se toman en cuenta los siguientes aspectos [8]:

- Humedad

No todas las capas de protección son suficientes para evitar el ingreso de agua dentro del cable, lo que puede ocasionar grandes pérdidas en el caso que se filtren. Normalmente, un cable submarino es del tipo *loose tube*, en este tipo de cable la fibra óptica tiene el recubrimiento primario coloreado (identificación) y en el recubrimiento secundario relleno de gelatina de petróleo donde reposan varias fibras holgadamente; dependiendo de cuantos hilos de fibra contenga el cable puede haber varios tubos (recubrimiento secundario) alrededor del miembro central de refuerzo como se puede observar en la Figura 1.15, o puede ir solo un tubo relleno con el gel hidrófugo y unas pocas fibras dentro recubierto del resto de capas de protección. Una cubierta de aluminio es colocada debajo del recubrimiento secundario para asegurar una mayor protección contra el ingreso de agua como se puede apreciar en la Figura 1.16; para mejor comprensión, sólo se muestra uno de los tubos que contienen las fibras, omitiendo el resto de la estructura del cable.



**Figura 1.16.** Cable a prueba de agua [8]

- Protección ultravioleta

Dependiendo de la profundidad del cable, los rayos ultravioletas pueden ser un factor a considerarse en la degradación del mismo, por lo cual se debe añadir una capa de polietileno contra rayos UV, también puede ser de algún metal en situaciones extremas.

- Hidrocarburos

Son compuestos orgánicos de hidrógeno y carbón que incluyen solventes, aceites, benceno, metano y petróleo. La capa externa de polietileno brinda protección contra la mayoría de hidrocarburos, en caso que se requiera una mejor protección se puede añadir una capa de plomo debajo de la capa externa de polietileno.

- Peso

La forma más común de expresarlo es en kilogramo por kilómetro, en el caso de los cables submarinos, los fabricantes ofrecen una gran variedad de cables, y este dato cambia dependiendo de factores tales como: profundidad, capacidad del cable (cuantas fibras va a transportar), tipo de protecciones externas, entre otros factores. Sin embargo, se puede decir que van desde algunas decenas hasta unas pocas centenas de kilogramos por kilómetro [8].

- Radio de curvatura

Como se pudo ver en la sección 1.3.7.4, realizar cualquier tipo de manipulación en la fibra produce la aparición de curvaturas, y debido a esto se generan pérdidas, si se manobra inadecuadamente el cable se puede producir hasta la ruptura de la fibra. Con el fin de disminuir este riesgo se establece un parámetro denominado radio de curvatura mínimo, dicho factor viene dado de acuerdo al cable que se utilice;

de manera general este valor oscila entre diez y doce veces el diámetro del cable (incluidas todas las protecciones externas). Las microcurvaturas también son un problema que se puede evitar con ciertas precauciones como: incrementando el diámetro del manto, utilizando estructuras holgadas y/o reforzando el espesor del revestimiento.

- Identificación de las fibras dentro del cable

En cables que llevan algunas fibras en su interior, se necesita algún tipo de identificativo para distinguir cada uno de los hilos, esto se logra mediante la coloración del recubrimiento primario y un código de colores que se puede apreciar en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Código de colores Fibra óptica [8]

| Número de fibra | Color    |
|-----------------|----------|
| 1               | Azul     |
| 2               | Naranja  |
| 3               | Verde    |
| 4               | Café     |
| 5               | Gris     |
| 6               | Blanco   |
| 7               | Rojo     |
| 8               | Negro    |
| 9               | Amarillo |
| 10              | Violeta  |
| 11              | Rosado   |
| 12              | Turquesa |

- Resistencia mecánica

Este factor mide cuánta fuerza/tensión se puede aplicar al cable durante el proceso de instalación de la fibra óptica, las capas externas del cable le brindan resistencia a la fuerza aplicada de tal forma que no se produzcan elongaciones que puedan dañar a la fibra, si se habla en porcentaje no debe sufrir una elongación que supere el 0.3%. Por otro lado, la duración de la fibra óptica dependerá del tiempo y la fuerza que se le aplique durante y después de la instalación. Hay dos tipos de fuerza que se pueden encontrar en las hojas de especificaciones y se explican a continuación [3]:

- ✓ Fuerza de tracción máxima para instalación: Es la tensión máxima a la que se puede someter al cable en el proceso de instalación, en el caso particular del cable submarino, al momento que el cable sale del barco para ingresar en el océano se debe utilizar maquinaria especial porque debido a su peso

sin el cuidado necesario puede haber un exceso de tensión que puede ocasionar fisuras o rupturas de la fibra dentro del cable. En la sección 1.3.10.5, se tratará con mayor detalle el tema de la instalación del cable submarino.

- ✓ Fuerza de tracción máxima permanente: Después del proceso de instalación, el cable se encuentra expuesto al entorno donde fue colocado y es necesario especificar un valor máximo de fuerza al que puede ser sometido una vez puesto en servicio ya que el tiempo que permanecerá así es indefinido. Obviamente el valor de esta fuerza para cables externos (cable submarino) será mucho menor al valor de la fuerza de tracción máxima de instalación.

#### - Rango de temperatura

Se tienen tres rangos de temperatura: instalación, operación y almacenamiento. En la etapa de instalación, este rango se limita debido a que, en el lapso de tiempo que se realiza esta acción el cable está sometido a una alta tensión. Los rangos típicos de temperatura se muestran a continuación, para obtener datos mucho más exactos se debe verificar en la hoja de especificaciones de cada uno de los fabricantes [8].

- ✓ Rango típico de instalación: 0°C a +60°
- ✓ Rango de operación: -30°C a +70°C
- ✓ Rango de almacenamiento: -40°C a +80°C

### **1.3.10.3. Empalmes**

Los empalmes son necesarios cuando se habla de largas distancias, en el caso de los cables submarinos es fundamental ya que son centenas de kilómetros las que cruzan. Un empalme es la unión permanente de dos fibras (de preferencia del mismo tipo para no aumentar la probabilidad de que incrementen pérdidas) por medio de algún procedimiento de empate.

Dependiendo de la precisión del método que se utilice, se insertan pérdidas en gran o baja escala por varios factores, sean éstos intrínsecos o extrínsecos, los más relevantes se detallan a continuación [15]:

- Pérdidas asociadas a los radios de núcleos: Son de tipo intrínseco, en el caso de que el radio del núcleo de la fibra receptora sea mayor que el de la transmisora no hay problema, puesto que, la luz proveniente entra totalmente en la fibra receptora, si el caso es el contrario se insertan pérdidas dadas por la

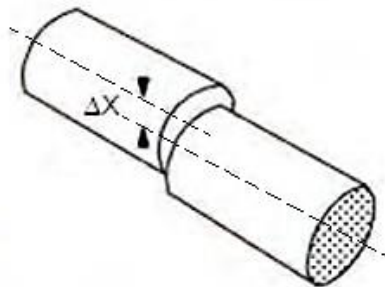
Ecuación 1.17, donde R representa el radio del núcleo, típicamente son hasta 0.4 dB [15].

$$P_{radio} = 20 \log \frac{R_{receptora}}{R_{transmisora}} \quad (1.17)$$

- Pérdidas relacionadas a variaciones en el índice de refracción: Al igual que el caso anterior es una pérdida de tipo intrínseca, si el índice de la fibra receptora es mayor que el de la transmisora no hay problema, pero si es el caso opuesto por lo mencionado en la sección 1.3.4 causará que haya pérdida de luz.
- Pérdidas debidas a diferencias en la apertura numérica: Sólo son de consideración cuando la apertura numérica de la fibra receptora es menor que la de la transmisora, y se calculan de acuerdo a la Ecuación 1.18 [15], dependiendo de las fibras que se empaten, pueden llegar a unas pocas unidades de dB. Es una pérdida intrínseca.

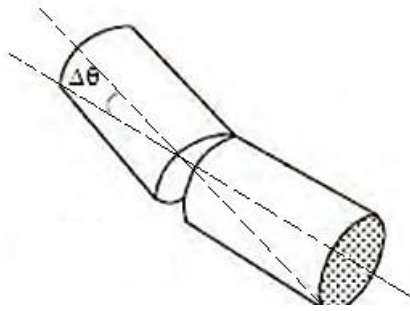
$$P_{AN} = 20 \log \frac{AN_{receptora}}{AN_{transmisora}} \quad (1.18)$$

- Pérdidas por desalineamiento de los ejes de las fibras: Es una pérdida de tipo extrínseco, consiste en el desplazamiento transversal de las caras de la fibra, como se puede apreciar en la Figura 1.17, por lo cual hay pérdida de luz. Si hay una diferencia de un cuarto del diámetro del núcleo se pueden generar pérdidas alrededor de 1.5 dB [3].



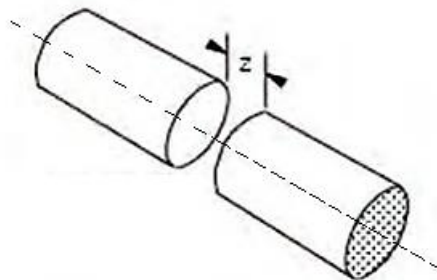
**Figura 1.17.** Desalineamiento de las fibras [16]

- Pérdidas por desajuste angular: En la Figura 1.18 se puede ver cómo los extremos de ambas fibras no están alineados y aparece un ángulo de desviación, por lo cual el rayo de luz que proviene de la fibra transmisora cambia sus ángulos y así su rumbo y parte de la luz se fugará al manto, el valor de pérdida que se puede generar depende mucho también de la apertura numérica [15]. Desviaciones de 3 o 4 grados pueden causar pérdidas de 1.5 dB [3].



**Figura 1.18.** Desajuste angular [16]

- Pérdidas por separación entre las caras de las fibras: Más conocido como separación longitudinal, similar a los dos anteriores es de tipo extrínseco, como se observa en la Figura 1.19 las caras frontales de las fibras están separadas longitudinalmente, entonces parte de la radiación de la fibra transmisora no penetra hacia el núcleo de la receptora, lo cual ocasiona que la luz se escape hacia el manto o bien salga de la fibra. Si la separación es de tamaño comparable al diámetro del núcleo de la fibra, se pueden ocasionar pérdidas en el orden de 0.5 dB [3].



**Figura 1.19.** Separación longitudinal [16]

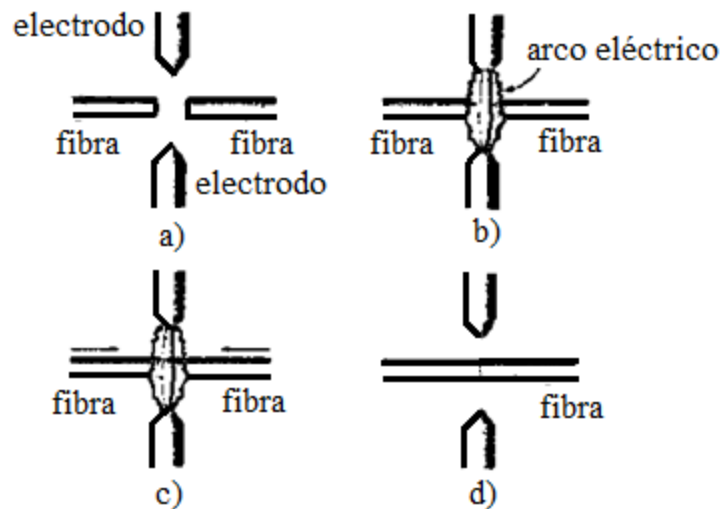
Además de lo mencionado, existen más factores por los cuales se puede ocasionar pérdidas, como por ejemplo: diferentes perfiles de índice de refracción, deformidades en los extremos a unir, errores de concentricidad, pérdidas de Fresnel (radiación óptica que pasa de un medio a otro con diferentes índices de refracción, caso general el aire en los empalmes mecánicos).

Por otro lado, en cuanto a las técnicas de empalme, normalmente se tienen dos formas de hacerlo. Los empalmes de tipo mecánico y los empalmes por fusión, los primeros se utilizan cuando se trata de unir dos fibras multimodo; para las fibras monomodo, puesto que, éstas requieren más precisión en el instante de unir los extremos se utiliza la



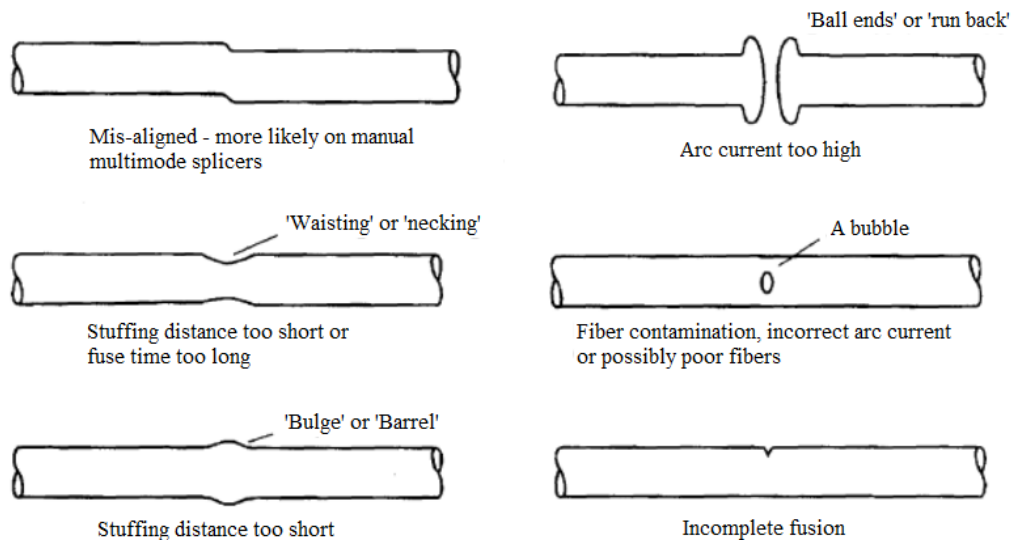
técnica de fusión, no obstante, este método también es aplicable a las fibras multimodo. En los enlaces por cable submarino, debido a la distancia, nunca será una opción ni la fibra multimodo ni un empalme mecánico, por lo cual, únicamente se considerarán los empalmes por fusión.

Los empalmes por fusión son mucho más estables que un empalme mecánico, ya que, las dos fibras se unen soldando sus extremos, la parte soldada posee características muy similares a las de las fibras, por lo que introduce menos pérdidas. Para el proceso se emplea una máquina fusionadora, en la cual se coloca frente a frente los extremos de la fibra desnuda (sin ningún recubrimiento) a unir, con ayuda de los posicionadores se alinea ambas puntas y mediante una fuente de calor, ya sea láser o arco eléctrico (dos electrodos enfrentados que descargan 7000 V con corriente ajustable hasta 25 mA) [8] se fusiona las fibras como se puede apreciar en la Figura 1.20, el procedimiento se debe realizar con sumo cuidado debido a que las fibras son sumamente frágiles y delgadas, una alineación incorrecta o una mala manipulación puede ocasionar un empalme incorrecto o ruptura de los extremos.



**Figura 1.20.** Empalme por fusión [15]

Hay varios casos de fallas en las fibras fusionadas como se puede observar en la Figura 1.21, que pueden ser de consideración y es necesario realizar el procedimiento hasta que quede apropiadamente empalmado y así, se generen la menor cantidad de pérdidas. Las pérdidas están en el orden de 0.01 a 0.2 dB si se ejecuta bien el proceso de empalme, inclusive si el empalme es muy preciso se puede alcanzar pérdidas realmente bajas alrededor de 0.001 dB [3].



**Figura 1.21.** Errores de empalme por fusión [8]

Factores que son críticos en el adecuado proceso de empalme son: el tiempo, la distancia y la intensidad del arco de corriente al que se someten los extremos de las fibras en la fusión; se debe prestar especial atención al momento de realizar el empalme ya que, como se ve en la Figura 1.21 se pueden presentar esas anomalías en la unión de las dos fibras y como ya se ha mencionado, introducir pérdida de luz.

Finalmente, después de que el proceso de empalme concluye, se tienen que realizar algunas pruebas con un equipo de *test* para verificar el estado del empalme y poder estimar las pérdidas introducidas en el mismo. Un detalle adicional es la protección del empalme con un manguillo termotráctil que se ajusta simétricamente en las dos partes de la unión, se debe tener precaución al ponerlo, ya que una fuerza mal ejecutada puede romper el empalme, la comprobación del estado del empalme se recomienda hacer después de este procedimiento.

#### 1.3.10.4. Conectorización

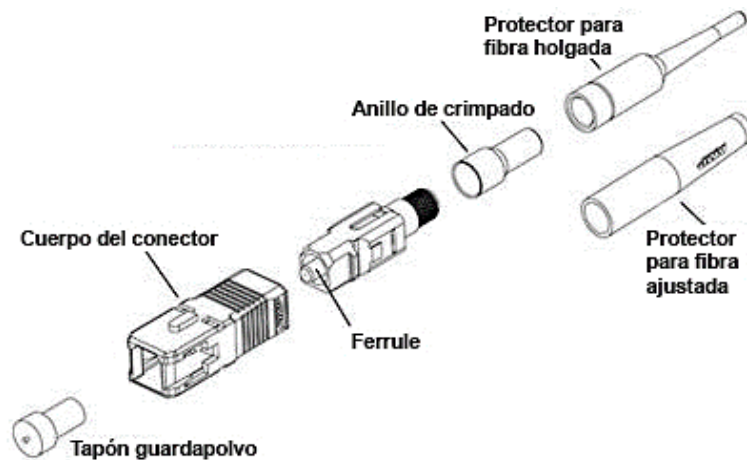
Un conector permite la unión no fija entre dos fibras, se utilizan generalmente para unir los cables de fibra a los transmisores y/o receptores (cuartos de equipos), o en lugares cuyos sistemas tenga configuraciones susceptibles a cambios. Entre los requisitos más comunes que debe tener un conector están: bajas pérdidas por inserción y por reflexión, alta fiabilidad, facilidad de instalación, interoperatividad, baja sensibilidad frente cambios ambientales y bajo costo.

Se debe considerar dos parámetros importantes en un conector, las pérdidas por inserción y las pérdidas por retorno. En el caso de las primeras, son las que determinan la pérdida de potencia por la inserción de un conector en un sistema de fibra óptica, es

fundamental puesto que mide el rendimiento de un conector, típicamente están en el rango de 0.2 a 0.5 dB; las segundas, son capaces de medir la potencia reflejada desde el conector de regreso por ejemplo hacia la fuente de luz, son de consideración en sistemas de fibra monomodo generando una salida ruidosa, el valor típico de éstas es -60 dB [3]. Estos valores vienen especificados por cada fabricante.

En cuanto a la estructura de un conector, básicamente se compone de las siguientes partes [17]:

- Férula: Encargada de proteger, sujetar y alinear la fibra; típicamente las férulas son de cerámica y metal o plástico de buena calidad.
- Mecanismo de acoplamiento: Su función es mantener al conector fijo en su lugar cuando está acoplado a otro dispositivo.
- Cuerpo del conector: Componente encargado de sostener a la férula, el mecanismo de acoplamiento y la bota, hecho de metal o plástico.
- Maguito descargador de tensión: Ayuda en la protección de la unión del cable al cuerpo del conector.



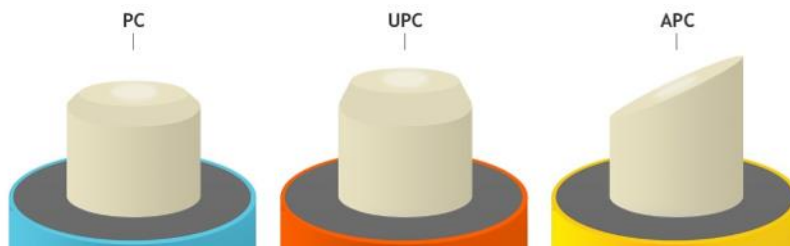
**Figura 1.22.** Estructura general de un conector [18]

En la Figura 1.22 se puede observar los principales componentes de un conector, éstos pueden variar de acuerdo al tipo de conector que se emplee (cuerpo de conector principalmente), pero siempre manteniendo la forma básica. Las férulas tienen diferentes tipos de pulidos, los más utilizados son los siguientes [17]:

- *Physical Contact (PC)*: Tienen una ligera curvatura, lo cual suprime el espacio de aire entre las férulas. Pérdida de retorno entre -30 dB y -40 dB.

- *Ultra Physical Contact (UPC)*: Poseen una curvatura mucho más pronunciada que los PC. Pérdida de retorno entre -40 dB y -55 dB.
- *Angled Physical Contact (APC)*: Tienen un ángulo de 8°, lo que permite que las conexiones sean mucho más unidas (mejor acoplamiento). Pérdida de retorno de -60 dB.

En la Figura 1.23 se puede apreciar cómo son físicamente los tipos de pulidos mencionados.



**Figura 1.23.** Tipos de pulido más comunes [17]

Hay varios tipos de conectores en el mercado, en la Tabla 1.4 se puede observar las características principales de los tipos de conectores más comunes.

**Tabla 1.4.** Características de los conectores [3]

| Tipo de conector                 | Pérdidas (dB) | Tipo de fibra        | Aplicación   | Material                     | Tipo de inserción |
|----------------------------------|---------------|----------------------|--|------------------------------|-------------------|
| <i>Suscriber Connection (SC)</i> | 0.15 a 0.2    | Monomodo y multimodo | Redes LAN de alta velocidad  | Plástico                     | <i>Push-pull</i>  |
| <i>Fiber Conector (FC)</i>       | 0.5 a 1       | Monomodo y multimodo | Redes LAN de alta velocidad  | Acero inoxidable y cerámica  | Rosca             |
| Suscriber Termination (ST)       | 0.1 a 0.4     | Monomodo y multimodo | Redes LAN de alta velocidad  | Metálico                     | Bajo presión      |
| Little Connector (LC)            | 0.2           | Monomodo y multimodo | Cables de estructura ajustada <sup>6</sup> , redes de alta velocidad, redes de voz, aplicaciones sobre <i>racks</i> de alta densidad | Plástico y cerámica          | <i>Push-pull</i>  |
| E-2000 / LSH                     | 0.15 a 0.3    | Monomodo y multimodo | Redes LAN, redes MAN, CATV, sensores y equipos de medición   | Plástico y óxido de zirconia | <i>Push-pull</i>  |

<sup>6</sup> Cable de estructura ajustada: Cable cuyas fibras tienen adosado el revestimiento secundario al revestimiento primario, y es diseñado para ambientes interiores en edificios.

En la Figura 1.24 se observa la forma que tienen los conectores descritos en la Tabla 1.4, comercialmente por parte de la compañía Silex Fiber, para los otros fabricantes pueden variar ciertos detalles, pero siempre manteniendo la estructura base en cada uno de los casos.



**Figura 1.24.** Conectores a) SC, b) FC, c) ST, d) LC y e) E-2000 [19]

Finalmente, como datos adicionales, las pérdidas de inserción aumentan luego de que el conector haya sido conectado y desconectado varias veces (comúnmente 0.2 dB por cada mil conexiones), la temperatura de operación debe ser compatible con la temperatura de los cables de fibra óptica (-65° C a 80° C) y la fuerza de tensión o carga de halado que es la fuerza aplicada al cable previo al desprendimiento del conector (típicamente 200 N) [3].

#### **1.3.10.5. Instalación del Cable Submarino**

La instalación del cable submarino es un procedimiento que se debe realizar con cierto tipo de cuidado, debido a la complejidad que presenta. En primer lugar, se requiere un estudio del suelo en las profundidades marinas para determinar la ruta por donde se asentará y/o soterrará el cable, puesto que, se debe considerar los sitios donde se encuentran ciertas irregularidades de terreno tales como: fosas marinas, abismos, llanuras, montañas submarinas, entre otros accidentes geográficos y fallas geológicas;

dicho estudio se conoce mejor como batimetría<sup>7</sup>. Una vez ubicada las zonas por donde pasará el cable, se debe seleccionar el tipo de cable que se montará sobre el lecho marino de acuerdo a las características del mismo, esto va de la mano con el diseño del cable y los equipos intermedios que habrá en el enlace submarino. En algunas zonas el cable únicamente estará asentado sobre el fondo marino y en las zonas susceptibles a accidentes puede ser necesario el soterramiento del cable, lo cual implica costos adicionales debido a que, se necesita maquinaria especializada para realizar el trabajo. Entre los accidentes más comunes se tiene: impactos de anclas de barcos, desastres naturales, ataque de la fauna marina (especialmente tiburones y ballenas) y redes de arrastre.

El proceso de instalación del cable requiere el uso de barcos y/o buques especiales que contienen el rollo de cable, incluido empalmes y equipos intermedios tales como: amplificadores, regeneradores y/o repetidores, con sus debidas protecciones contra agua, todo listo para desplegar al fondo del océano. En el ANEXO A (imágenes tomadas del video “*SubCom - Installation Animation - Undersea Fiber Optic Cable*”) [20], se puede observar cómo es a detalle la instalación del cable submarino.

Primero se parte de la estación terrena, donde llega uno de los extremos del cable submarino, se tienden varios metros de cable en la orilla con ayuda de una embarcación proveniente del barco. Después, se comienza a halar el extremo de cable colocado en tierra desde el barco y así empieza el tendido principal del cable.

Una vez liberado el cable en el mar, siempre y cuando el fondo marino sea uniforme (tan plano como sea posible), se baja una máquina especializada en el soterramiento del cable (arado submarino – *submersible plow*), el cable pasa del barco hacia ésta, se asienta en el lecho marino para comenzar el entierro del cable y luego la nivelación del suelo; conforme va avanzando el despliegue del cable también bajan los equipos ya encapsulados con resistencia a la entrada de agua.

Existen ciertas zonas en el fondo marino donde se puede encontrar cruces con otros cables submarinos, para ello algunos arados marinos disponen de algún tipo de sensor(es) de obstáculos y cámaras que permiten observar remotamente el procedimiento. En el cruce, la máquina tiene que detenerse para no chocar con el otro cable, pasada la zona donde se encuentra el cruce de cables, se reactiva el arado

---

<sup>7</sup> Batimetría: Arte de medir las profundidades del mar y estudio de la distribución de la fauna y flora en sus diversas zonas [64].

marino para continuar con el entierro del cable hasta donde las condiciones de relieve del suelo lo permitan.

Después de pasar la zona de cruce de cables, se baja un ROV<sup>8</sup> desde la zona donde se interrumpió el procedimiento, hasta donde se lo reanudó. Este equipo ayuda en la inspección y con el soterramiento de la porción de cable que quedó fuera del suelo marino después del tendido, pasa muy lenta y cuidadosamente sobre dicha parte para dejar el cable cubierto.

Finalmente, en las zonas donde la topografía del terreno es irregular y prácticamente es imposible arar el fondo marino, el barco administra holgadamente el cable, con esto se puede asegurar que se cumple con las características de relieve del lecho marino y queda situado libremente en él hasta encontrar otra llanura o planicie. El proceso continúa hasta llegar a punto final del proyecto, donde va a haber otra estación terrena a la cual llegará el otro extremo del cable para terminar la conexión entre los puntos ya establecidos y empezar la comunicación entre los mismos. Además, se debe considerar que es necesario dejar unas cuantas decenas de metros de cable; primero, para holgura del mismo y así evitar que alguna fuerza de tensión no deseada pueda dañar el cable, y segundo para las futuras reparaciones en caso de que se presente algún accidente que provoque la ruptura del cable o de la fibra dentro de él.

Como ya se mencionó, en ciertos casos el tendido del cable simplemente reposa sobre el lecho marino sin necesidad de soterrarlo, todo dependerá de las necesidades del proyecto que encamine la puesta del cable en el océano. Además, se debe tomar en cuenta que no todos los procesos descritos previamente son obligatorios, dependen de varios factores, entre los más destacados: optimización de recursos, estudios de suelo marino, puntos críticos de riesgo ante el ataque de fauna marina y/o anclaje de barcos, y limitaciones en los costos de contratación de servicios.

#### **1.3.10.6. Reparación del cable submarino**

Como todo sistema de comunicaciones, los cables submarinos son susceptibles a daños o fallos que interrumpen la conexión, los accidentes que fueron descritos en la sección previa pueden ocasionar la ruptura en un punto o en una porción del cable, por lo cual es necesario reparar a la brevedad posible, ya que, la naturaleza del tráfico y el alto volumen de información que transportan son críticos. Similar a la instalación del cable,

---

<sup>8</sup> ROV: Proveniente de las siglas ROUV *Remote Operated Underwater Vehicle*, para el caso específico que se está tratando en el documento, es un robot sumergible no tripulado que está conectado al barco por medio de un cable (energía y datos) para transmitir imágenes del fondo del océano, datos de los sensores y en ciertos casos con ayuda de unos brazos mecánicos ejecutar las instrucciones que se remitan.

la reparación del mismo necesita de equipo y personal especializado, primero hay que identificar el sitio donde ocurrió la ruptura, luego los barcos se desplazan por el océano hasta el lugar y se empieza con el proceso. La forma más simple de detectar un daño en un cable submarino es una variación repentina en el voltaje (en el conductor eléctrico), cuando esto ocurre el tráfico se re-direcciona a otro sistema de cableado y así se evita que se caiga completamente la transmisión de datos [21], se utilizan ROVs en la localización de la parte dañada.

Por otra parte, el tiempo que demora el proceso de reparación aproximadamente es de quince días, sin contar con los días de tránsito hasta llegar al punto de falla, este tiempo se puede prolongar debido a factores como: la profundidad del cable, condiciones meteorológicas, obtención de permisos de operación, disponibilidad de los barcos, causa de la ruptura del cable y el punto donde se encuentre. Por ejemplo, si la causa fue por un desastre natural (terremoto), el procedimiento puede tomarse hasta alrededor de dos meses [22].

La reparación del cable no se realiza bajo el agua, se recupera el cable al barco y ahí se procede con el arreglo, dependiendo el tipo de daño que sufrió el cable. En las imágenes del ANEXO B (imágenes tomadas del video “*SubCom - Repair Animation - Undersea Fiber Optic Cable System*”) [20], se puede apreciar cómo es el proceso de reparación del cable una vez que el barco llega al sitio donde se encuentra el fallo. En este caso el cable no está cortado, está dañada la fibra, por lo cual el procedimiento que se toma es el siguiente.

En primer lugar, se despliega un garfio de corte hasta el fondo del mar para cortar el cable objetivo, después con un rezón<sup>9</sup> se extrae el primer extremo del cable, el cual es llevado a bordo del barco de reparación para ser atado a una boya que servirá como punto de señalización (punto de referencia). Luego, el barco de nuevo suelta el rezón para alzar el segundo extremo del cable, éste es recuperado y llevado al taller de reparación a bordo. Una vez ubicado el extremo del cable en el taller se inicia con el proceso de fusión al extremo de un cable de iguales características que se llamará “cable de repuesto”, se recubre el empalme con un material antideslizante y se lo ensambla de tal forma que queda completamente sellado y hermético. El empalme y el cable de repuesto son desplegados al mar a medida que el barco avanza al lugar donde se dejó la boya de señalización para recuperar el primer extremo del cable, el barco utiliza posicionamiento dinámico para poder maniobrar. Finalmente, el primer extremo del cable es recuperado y llevado al taller donde se lo empalmará al otro extremo del

---

<sup>9</sup> Rezón: Ancla pequeña.



cable de repuesto, para desplegar este segundo empalme al fondo marino, de esta manera el proceso de reparación queda completo [20].

El barco de reparación no se retira del lugar hasta no asegurar que la conexión ha sido reestablecida de manera exitosa, se realizan todas las pruebas necesarias para confirmar que todo está bien [21].

### **1.3.11. FUENTES DE LUZ**

Son las que permiten emitir luz en longitudes de onda determinadas por las ventanas de transmisión (sección 1.3.2.2), de acuerdo al tipo de aplicación que se vaya a utilizar. Estas fuentes deben tener un control adecuado de potencia para no saturar la fibra y evitar que se produzcan efectos no deseados, pero que se logre llegar a la cobertura deseada.

Las fuentes de luz son componentes activos en un sistema de comunicaciones hechas a base de semiconductores, cuando se polarizan directamente, su función es convertir la energía eléctrica en luz de forma eficiente de tal forma que la potencia de salida esté acoplada para que se pueda transmitir por la fibra. La emisión de luz se produce por el paso de un electrón de un semiconductor desde un nivel de energía superior a un nivel de energía inferior, en el proceso se libera energía la cual es equivalente a la diferencia de energía de los dos niveles. La representación matemática de esta energía viene dada por la Ecuación 1.19, donde  $h$  es el valor de la constante de *Planck* y  $f$  es la frecuencia. Hay emisiones espontáneas (fuentes LED) y emisiones estimuladas (fuentes LASER).

$$E = hf \quad (1.19)$$

Por lo tanto, existen dos tipos de fuentes, las fuentes tipo LASER y las fuentes tipo LED. En los siguientes párrafos se aborda las características de cada una de ellas, con mayor énfasis en las fuentes tipo LASER, ya que son las que se requieren para el desarrollo de este proyecto.

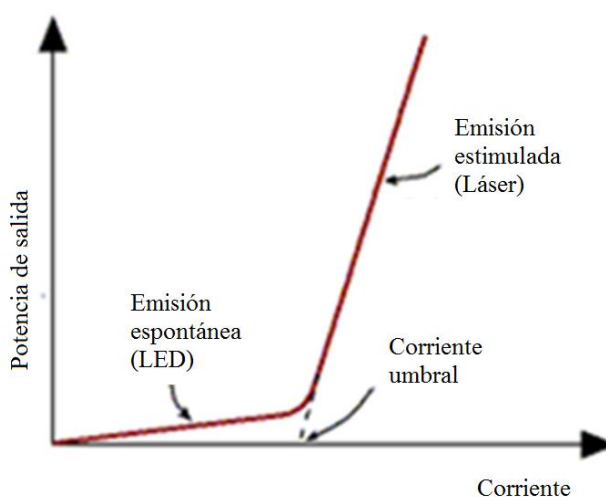
#### **1.3.11.1. Fuentes LED**

Este tipo de fuentes a menudo se usan como fuentes multimodo debido a su estructura, sin embargo, el acoplamiento con una fibra monomodo puede resultar exitoso, particularmente si se utiliza estructuras avanzadas. Las características más sobresalientes de las fuentes LED son: baja potencia de emisión alrededor de los microwatts, menor ancho de banda, amplia anchura espectral (en el rango de 20 a 150 nm), presentan distorsión armónica, su fabricación es muy simple, el costo es relativamente bajo, menor dependencia de temperatura, circuitería sencilla, linealidad,

la emisión de luz de este tipo de fuentes es espontánea (luz incoherente<sup>10</sup>), el tiempo de respuesta es más grande (tiempo que se toma desde que la fuente es excitada hasta que entrega la potencia óptica) [8]. Estas fuentes son básicamente un diodo de juntura p-n, que cuando se polariza directamente es capaz de emitir luz. Típicamente la composición de estos LEDs puede ser de: GaAs, AlGaAs, InGaAsP o InP.

### 1.3.11.2. Fuentes LASER

Para que una fuente sea considerada como LASER debe cumplir tres condiciones fundamentales: debe ser lo más monocromática posible (es decir que en la radiación de luz esté únicamente una frecuencia), la emisión de luz debe ser estimulada (luz coherente, haces de luz en fase) y que la luz sea lo más direccional posible [15]. Las características más importantes de una fuente láser son: anchura espectral reducida (típicamente menores a 5 nm), limitado cono de emisión, corriente de excitación pequeña, tiempo de respuesta reducido, potencias de emisión en el orden de los miliwatts, mayor sensibilidad a los cambios de temperatura, tiempo de vida útil limitado, son más costosas y la circuitería interna es mucho más compleja. Una fuente LASER añade un par de espejos (formando una cavidad resonante), para ayudar en la proliferación de nuevos fotones y descartar los desfases que se pueden generar. Nótese que el LASER se comporta como LED hasta lograr alcanzar el valor de corriente umbral<sup>11</sup>, como se observa en la Figura 1.25. Finalmente se puede acotar que este tipo de fuentes son adecuadas tanto para sistemas que utilicen fibras monomodo, pero también pueden operar con fibras multimodo.



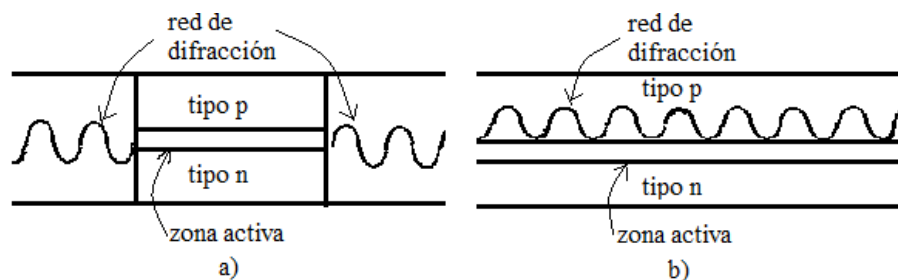
**Figura 1.25.** Potencia de salida para el láser [23]

<sup>10</sup> Luz incoherente: Tipo de luz donde las ondas de luz no se encuentran en fase.

<sup>11</sup> Corriente umbral: Es el valor mínimo de corriente que necesita una fuente láser para poder entrar en funcionamiento de emisión estimulada.

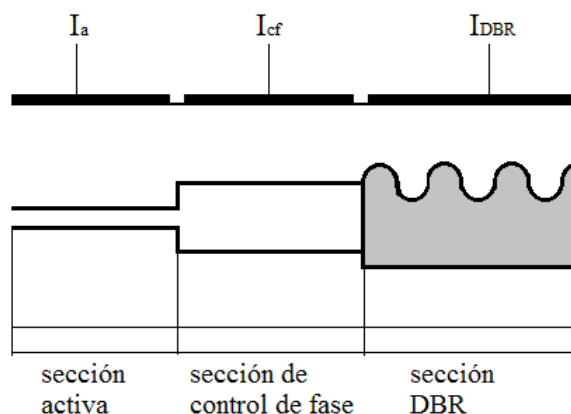
Entre los láseres más comunes se tiene: VCSEL, DBR, DBF, sintonizables y pozo cuántico, que se describen a continuación:

- *Vertical Cavity Surface Emitting LASER*, VCSEL: Adecuado para sistemas multimodo, se dice que es vertical, debido a que tiene espejos resonantes en la parte superior e inferior de la capa activa, la luz surge por un orificio en la superficie; la corriente umbral de este LASER es pequeña por lo que ayuda a conservar por más tiempo la utilidad de la fuente.
- *Distributed FeddBack LASER*, DFB: Es un tipo de LASER para sistemas monomodo, utiliza una red de difracción de Bragg (rejilla de Bragg), cuya función es variar el índice de refracción para provocar reflexiones selectivas de ciertas frecuencias centradas en cierta longitud de onda, se comporta como un circuito sintonizable para limitar la transmisión a un solo modo (longitud de onda). El rango sintonizable de éstos el limitado. Su anchura espectral es muy pequeña. La rejilla está debajo de la zona activa del LASER, como se puede observar en la Figura 1.26. (b).
- *Distributed Bragg Reflection LASER*, DBR: El funcionamiento es igual que el anterior, en la Figura 1.26 (a) se puede observar que la rejilla de Bragg va afuera de la zona activa del LASER. Son más sensibles a los cambios de temperatura que los láseres DFB.



**Figura 1.26.** Esquema de los láseres DBR (a) y DFB (b) [15]

- Láseres sintonizables: Tienen la virtud de permitir la sintonización de cualquier valor de longitud de onda, para lo cual hace uso de prismas o rejillas de difracción. Consta de tres secciones que no guardan relación la una con la otra, y son: región activa, control de fase y rejilla de Bragg, como se puede observar en la Figura 1.27. Donde  $I_a$  es la corriente de la sección activa,  $I_{cf}$  es la corriente de la sección de control de fase e  $I_{DBR}$  es la corriente de la sección DBR.



**Figura 1.27** Estructura del láser sintonizable [15]

- Láseres de pozo cuántico: Denominados así porque contienen una estructura semiconductor (pozo cuántico), donde se da el movimiento confinado de los electrones y los huecos, que no superen los 10 nm de tamaño. Son adecuados para bajar el valor de la corriente umbral, aumentar la frecuencia de modulación y tener una anchura espectral reducida.

#### 1.3.11.2.1. Condiciones de seguridad en fuentes LASER

En la manipulación de fuentes LASER, se debe tener ciertas condiciones de seguridad para hacer un uso adecuado sin riesgo de sufrir alguna consecuencia de salud. La luz visible e infrarroja provenientes de las fuentes, pueden ocasionar daños temporales o permanentes en la vista, las longitudes de onda pequeñas ocasionan daño a nivel de la retina, mientras que las longitudes de onda grandes atacan la córnea, para ninguno de los dos casos la medicina da solución, el daño es irreversible. Bajo ninguna circunstancia se debe observar la luz de la fuente, una fuente de luz desconocida y ninguna fibra hasta verificar que es seguro [8].

En base a lo mencionado, el estándar internacional “*Radiation Safety of Laser Products, Equipment Classification, Requirements and User’s Guide*”, proporcionado por la *International Electrotechnical Commission (IEC)*, mejor conocido como estándar IEC 825, especifica las clases de LASER, como se puede apreciar en la Tabla 1.5 [7].

**Tabla 1.5.** Clasificaciones según la IEC

| Tipo de Laser | Características  | Medidas de control |
|---------------|--|--------------------|
| Clase 1       | Seguro bajo condiciones de operación razonablemente previsible, no bajo cualquier condición. | N/A                |

| Tipo de Laser | Características  | Medidas de control  |
|---------------|--|---|
| Clase 2       | Láseres con salida de luz en el espectro visible. Se supone que La exposición prolongada puede causar daño, pero el reflejo parpadeante hará que los ojos se cierren por una fracción de segundo y eso provee cierta protección. | <i>Interlocks</i> <sup>12</sup> , llaves, luces de aviso ( <i>on/off</i> ), <i>switching</i> remoto, prevención de reflexiones. |
| Clase 3a      | Inseguro si se observa con instrumentos, a simple vista no causa daño.   | <i>Interlocks</i> , llaves, luces de aviso ( <i>on/off</i> ), <i>switching</i> remoto, prevención de reflexiones.               |
| Clase 3b      | Peligro en exposición directa hacia la vista, los reflejos pueden ser percibidos pero es mejor evitar; no ver con instrumentos.  | <i>Interlocks</i> , llaves, luces de aviso ( <i>on/off</i> ), <i>switching</i> remoto, prevención de reflexiones.               |
| Clase 4       | Daño muy severo, incluso las reflexiones son muy peligrosas y si los rayos de luz caen de forma directa pueden causar daños en la piel y quemaduras, normalmente no se usan en comunicaciones .                                  | <i>Interlocks</i> , llaves, luces de aviso ( <i>on/off</i> ), <i>switching</i> remoto, prevención de reflexiones.               |

### 1.3.12. DETECTORES ÓPTICOS

Básicamente su proceso es inverso a lo que hace una fuente, por lo cual su polarización es inversa. Su función es detectar la luz y convertirla en señal eléctrica a través de un conjunto de junturas p – n, los más comunes son los detectores basados en fotodiodos semiconductores. Las características deseables en un detector de luz son: altamente sensitivo, tiempo de respuesta corto, linealidad y mínimo ruido interno. Entre los detectores de luz más comunes se encuentran: fotodiodo P-N, PIN y APD.

- Detectores PIN (*P – Intrinsic- N*): Consta de dos capas semiconductoras y en medio de ellas existe una región intrínseca (no muy dopada), responsable de

<sup>12</sup> *Interlocks*: Dispositivo de protección contra ciertos estados no deseados en un equipo.

mejorar la sensibilidad<sup>13</sup> del detector y disminuir el tiempo de respuesta, se polariza de manera inversa, típicamente con 8 o 10 V.

- Detectores APD (*Avalanche Photo Diode*): Similares al detector PIN, pero en la región intrínseca se dopa ligeramente con semiconductores tipo p. Son más sensibles y tienen menores tiempos de respuesta que los detectores anteriores. Para lograr el efecto avalancha tienen que polarizarse inversamente entre 40 y 400 V. Son menos tolerantes a variaciones de temperatura.

### **1.3.13. OTROS COMPONENTES**

Tanto en el transmisor como en el receptor se pueden encontrar otro tipo de equipos además de las fuentes de luz y de los detectores ópticos, para completar el sistema de comunicaciones, tales como los amplificadores ópticos.

#### **1.3.13.1. Amplificadores ópticos**

Son de mucha utilidad en sistemas *long haul*, pues debido a la distancia que estos cubren, factores como la atenuación se presentan. Hay dos tipos de amplificaciones, la eléctrica y la óptica, sin embargo, en este documento sólo se tratará de la amplificación óptica, que es la predominante hoy en día.

Los amplificadores ópticos son capaces de amplificar cualquier señal óptica sin importar a qué longitud de onda se estén transportando, dentro de sus límites de operación; pueden ser colocados en cualquier parte del tramo entre el transmisor y el receptor, eso es cuestión de criterio del diseñador del enlace. Existen los amplificadores de semiconductor y los de fibra; amplifican un haz de luz débil que llega a la entrada del amplificador y genera una señal fuerte en la salida del mismo. La longitud de onda de operación es un valor crítico puesto que determina la compatibilidad con los sistemas existentes y los nuevos. La mayoría de amplificadores ópticos funcionan mejor en tercera ventana.

Como se mencionó hay amplificadores de semiconductor y los de fibra, para los fines de este proyecto, el estudio se centra en los amplificadores de fibra, entre los cuales se tiene *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) y los Raman, que se describen a continuación.

##### *1.3.13.1.1. Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA)*

Son amplificadores de alta ganancia (entre 30 y 50 dB), entre los atributos más destacados se tiene: bajo ruido, potencias de salida en el orden de decenas de dBm,

---

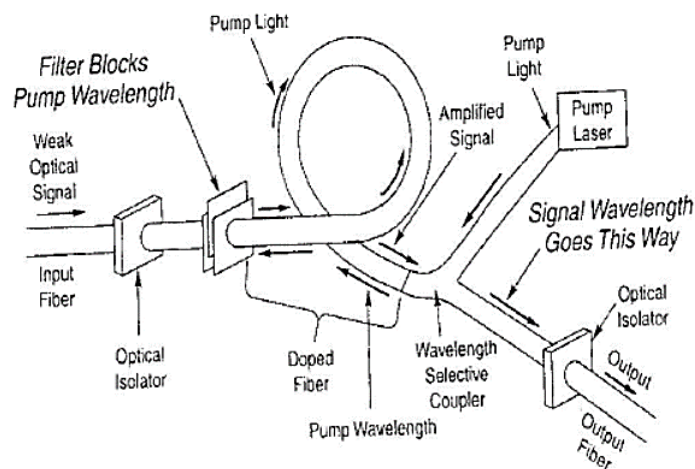
<sup>13</sup> Sensitividad: Ver en la sección 1.3.15.

bajas pérdidas, pequeñas no linealidades y anchura espectral amplia.

La estructura de un amplificador EDFA consta esencialmente de un diodo láser de bombeo y una sección de fibra dopada con impurezas provenientes de tierras raras, en este caso el erbio (Er).

En la Figura 1.28 se puede apreciar los componentes de un amplificador EDFA, su funcionamiento consiste en los siguientes pasos [3]:

- La señal de luz entra por la izquierda, pasa hacia un aislador óptico ubicado en la entrada, cuya función es bloquear la luz que podría generar ruido.
- Dicha señal avanza hasta un filtro óptico que permite el paso únicamente de esta señal, bloqueando la longitud de onda del láser de bombeo.
- El láser de bombeo suministra una radiación infrarroja de 980 nm o 1480 nm (potencia en el orden de las decenas de mW), ésta es absorbida por los átomos de Erblio que pasan a un estado de excitación.
- La señal filtrada estimula los átomos de Erblio excitados (de la fibra dopada) para la emisión de luz a la longitud de onda de esta señal y en fase con la misma, de esta manera genera la amplificación.
- Un acoplador ubicado al final de la fibra dopada realiza la separación de la señal amplificada de la longitud de onda de bombeo.
- Finalmente, la señal pasa de nuevo hacia un aislador ubicado en el final del amplificador (para el paso de la luz en una sola dirección) y se obtiene la señal de salida.



**Figura 1.28.** Estructura interna de un amplificador EDFA [3]

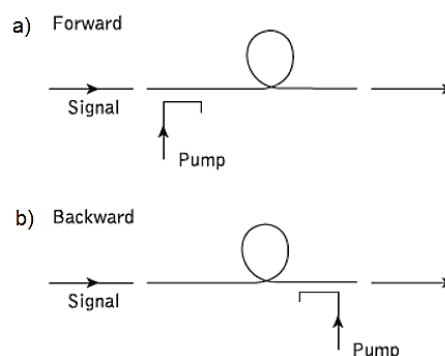
La radiación del láser de bombeo puede ser en el mismo sentido que la señal (bombeo codireccional) o en sentido contrario (bombeo contradireccional) para generar mayor ganancia.

Entre otras cualidades de los amplificadores están: soporta WDM en el rango de longitudes de onda que se encuentren en el espectro de ganancia (banda C, L y S [8]), gran uso para cables submarinos (redes *long haul*) debido a sus buenas prestaciones y simplicidad.

#### 1.3.13.1.2. Amplificadores Raman

Antes de hablar sobre los amplificadores Raman, es necesario mencionar el principio de funcionamiento en el que se basa este amplificador. En el efecto Raman se tiene una señal óptica de bombeo que ingresa a una fibra óptica y experimenta dispersión espacial ocasionada por vibraciones moleculares, la luz dispersa se desplaza en frecuencia un valor igual a la diferencia entre la frecuencia de bombeo y la frecuencia de las vibraciones de cristal, la señal desplazada se denomina campo de *Stokes* y el proceso no lineal se conoce como *scattering* de Raman; dicho campo puede mezclarse de nuevo con la señal óptica de entrada produciendo frecuencias adicionales, esta señales guían las vibraciones del cristal y dan como resultado un campo de *Stokes* más intenso, este fenómeno es denominado como dispersión estimulada Raman [24].

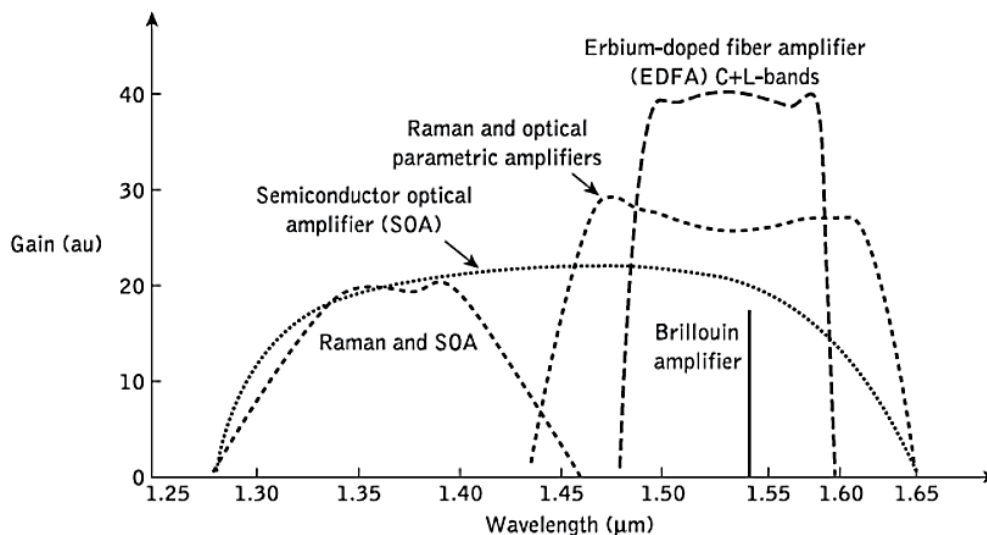
Los amplificadores Raman basan su funcionamiento en una interacción no lineal (efecto Raman) entre la señal óptica de entrada y la señal de bombeo de alta potencia (1 W a 1.2 W para banda L en SSMF [3]), la señal de bombeo puede acoplarse en el mismo sentido de la señal de entrada (bombeo codireccional) o en sentido opuesto (bombeo contradireccional) más comúnmente para evitar la amplificación de las componentes no lineales, en la Figura 1.29 se puede apreciar ambos tipos de bombeo; la ganancia máxima se obtiene 100 nm debajo de la longitud de onda de bombeo, una de las ventajas de este tipo de amplificador es su bajo nivel de ruido.



**Figura 1.29.** Ejemplos de tipos de bombeo en un amplificador Raman, a) Bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional [9]



Son adecuados en equipos terminales en las etapas de post-amplificación (después del transmisor) y pre-amplificación (antes del receptor), útiles en aplicaciones WDM y su curva de ganancia comprende desde la banda S hasta la L (rango de longitudes de onda más amplio que el de los EDFA) como se puede apreciar en la Figura 1.30 [9].



**Figura 1.30.** Características de ganancia – ancho de banda en los diferentes amplificadores ópticos [9]

En la Tabla 1.6 se presentan las características más destacadas de los amplificadores EDFA y Raman, que además son los más comerciales en la actualidad [3].

**Tabla 1.6.** Comparación entre amplificadores EDFA y RAMAN [3]

| Parámetro                               | EDFA   | RAMAN   |
|---|--|---|
| Ganancia                                | Alrededor de 30 dB, máximo 50 dB                     | De 20 a 25 dB, máximo 30 dB   |
| Potencia de salida                      | Alta   | Alta  |
| Potencia de entrada                     | Normal   | Alta  |
| Interferencia                           | Baja   | Baja  |
| Aplicaciones                            | Redes metropolitanas, redes de <i>long haul</i>      | Redes de <i>long haul</i>   |
| Potencia de saturación                  | Dependiente de la ganancia y constantes del material | Aproximadamente igual a la potencia de la fuente de bombeo                            |
| Bandas de operación                     | Banda C y L  | Comúnmente desde S hasta L (depende de la disponibilidad de la fuente de bombeo)      |
| Amplificación de ruido                  | Sí   | No  |
| Longitud de onda de la fuente de bombeo | 980 nm o 1480 nm                                     | Aproximadamente 100 nm por debajo de la longitud de onda de la señal en ganancia pico |
| Potencia de bombeo                      | Decenas de mW  | Centenas de mW hasta aproximadamente 1 W  |

### 1.3.14. RENDIMIENTO DEL TRANSMISOR

En el caso de un sistema que utilice como medio de transmisión un cable submarino óptico, las fuentes que se utilizan obligatoriamente deben ser tipo LASER, ya que como se mencionó, éstas son mucho más directivas y ofrecen mejores prestaciones que las de tipo LED. Existen algunos parámetros que son necesarios mencionar para conocer qué tan bueno es el rendimiento del transmisor, éstos son:

- Tipo de transmisión: Hay transmisiones de tipo analógica y de tipo digital, en la actualidad las transmisiones analógicas son un tanto obsoletas para la implementación de sistemas por las desventajas que presentan en relación a una transmisión digital. Una de las ventajas de la transmisión digital es los canales regenerativos, es decir, conforme avanza la información en forma de pulsos de luz en el medio, pierde su forma original, los canales regenerativos ayudan a recuperar la forma original de los pulsos de luz (detección de los pulsos, 1 o 0) sin necesidad de amplificar el ruido como sería en el caso de una transmisión analógica.
- Tiempo de respuesta: Se considera como el tiempo desde que una fuente es excitada con corriente eléctrica hasta que produce la potencia óptica. El tiempo de subida es el tiempo en el que la fuente pasa de entregar el 10 % de su potencia máxima, a entregar el 90 % de la misma; en un sistema se considera que el tiempo de bajada ( $t_f$ ) es lo contrario al de subida ( $t_r$ ), pero igual en valor.
- Ancho de banda y velocidad de transmisión: Hay dos tipos de ancho de banda en sistemas ópticos, el eléctrico y el óptico, los que se relacionan bajo la Ecuación 1.21 [3], el ancho de banda óptico también puede ser función del tiempo de subida  $t_r$  como se puede apreciar en la Ecuación 1.20 [3]. La velocidad de transmisión en un sistema digital definirá la capacidad del mismo.

$$AB_{\text{óptico}} = 0.35/t_r \quad (1.20)$$

$$AB_{\text{eléctrico}} = 0.707AB_{\text{óptico}} \quad (1.21)$$

- Longitud de onda de operación: Es un factor decisivo en una transmisión por medio óptico, como se vio en la sección 1.3.7, donde se hablaba de pérdidas, hay longitudes de onda donde éstas son más críticas. Al seleccionar la longitud de onda de operación se debe considerar cuál es la más apropiada según la aplicación en función de la demanda de ancho de banda y de la distancia. Una solución puede ser también el tipo de fibra, ya que, en largas distancias, como

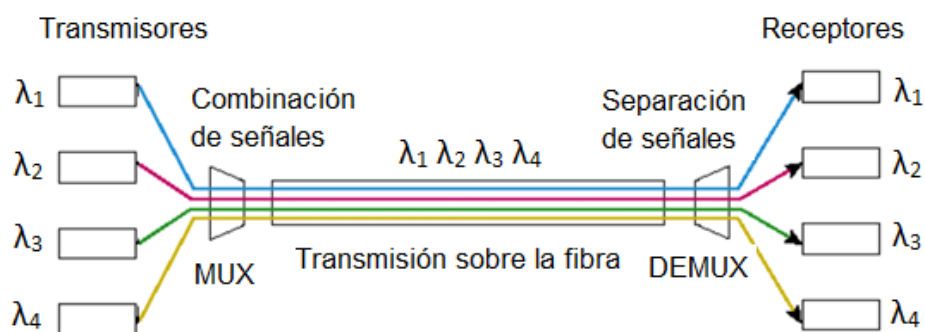
es el caso del cable submarino, ciertos tipos de pérdidas se van acumulando y de cierta forma hay que contrarrestar ese efecto.

- Potencia de salida: Se define como la potencia media óptica del haz de luz que se acopla a la fibra, es función de la temperatura y del tiempo de operación del transmisor; por efecto de los amplificadores esta potencia puede elevarse, en lo cual hay que tener bastante cuidado, puesto que, no debe ser muy grande como para saturar el receptor (fase de detección), ni muy baja como para no ser detectada. Se deben tener presentes los niveles máximos de tolerancia en cuanto a potencia de entrada en los detectores (potencia de salida de la fibra).
- Eficiencia: Existen varios tipos de eficiencia, interna o cuántica, externa o en potencia, de acoplamiento y la total. Sin embargo, el parámetro más importante a considerar, es la eficiencia total en el transmisor que se relaciona según la Ecuación 1.22.

$$\eta_T = \frac{P_{\text{óptica entrada FO}}}{P_{\text{eléctrica entrada fuente}}} \quad (1.22)$$

### 1.3.15. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

De las siglas *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), esta técnica de multiplexación consiste en el envío de información a través de varias portadoras ópticas (longitudes de onda) individuales por el mismo medio, en este caso la fibra óptica; cada portadora representa un canal óptico independiente sobre el cual se envía una señal, todas las portadoras se agrupan en una única señal óptica para viajar por un solo hilo de fibra como se puede apreciar en la Figura 1.31. Con el uso de esta técnica se aprovecha al máximo la capacidad del canal, ya que, permite la comunicación bidireccional a través de un solo hilo de fibra. WDM es adecuada en sistemas de alta capacidad y que están en continuo crecimiento (escalables).



**Figura 1.31.** Esquema básico de funcionamiento de WDM

El sistema WDM puede ser unidireccional o bidireccional. En el primer caso se facilita su diseño e instalación puesto que se utiliza dos fibras, una para la transmisión en un sentido, y la otra para la transmisión en el sentido opuesto, además que no requiere bandas de guarda entre los dos conjuntos de longitudes de onda para eliminar el crosstalk. Para el segundo caso solo hay una fibra para la transmisión en ambos sentidos que puede ser simétrico, donde la mitad de las longitudes de onda son para un sentido y la otra mitad para el otro sentido; o asimétrico, donde el número de longitudes de onda en un sentido, no es igual para el sentido opuesto.

Un sistema WDM está compuesto por:

- Transpondedor: Es el componente que se encarga entre otras tareas de adaptar las longitudes de onda recibidas a una longitud de onda estándar (Grilla de frecuencias G 694.1), estable y que sea apta de multiplexar y demultiplexar.
- Multiplexor óptico (MUX): Es el elemento que se encarga de unir todas las señales que provienen de los diferentes transmisores a distintas longitudes de onda en una sola señal para transmitir sobre la misma fibra.
- Demultiplexor óptico (DEMUX): Es el opuesto al multiplexor, su tarea es separar las diferentes longitudes de onda que provienen de la fibra óptica, y hacer llegar cada señal a su respectivo receptor.
- Amplificador óptico: Componente encargado de incrementar la potencia en las señales ópticas que se propagan en el canal de comunicaciones, en caso de degradación en la señal debido a la distancia.

Cabe mencionar que los componentes del sistema hacen uso de filtros para realizar sus funciones (multiplexado, demultiplexado, ecualización de ganancias de los amplificadores y filtrado de ruido), entre los filtros más comunes se tiene: filtros de película delgada (*Thin Film Filters*, TFF), filtros de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG) y filtros de arreglos rejillas (*Arrayed Waveguide Grating* AWG).

En esta técnica de multiplexación actualmente hay dos subcategorías esenciales, *Coarse Wavelength Division Multiplexing* (CWDM) y *Dense Wavelength Division Multiplexing* (DWDM), que se pueden elegir de acuerdo al tipo de aplicación que se requiere, en la Tabla 1.7 se puede observar las principales características y diferencias de las dos tecnologías. En DWDM hay dos versiones, una considerada normal utilizada en sistemas de largo alcance, y la segunda que se puede considerar una versión extendida para ultra largo alcance (aplicable a distancias intercontinentales).

**Tabla 1.7.** Comparación de tecnologías WDM [3]

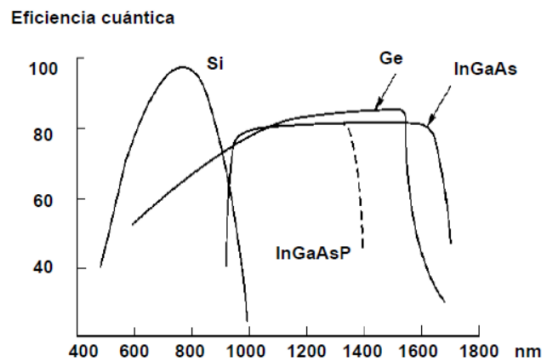
| <b>Característica</b>               | <b>CWDM</b>  | <b>DWDM</b>                         |                                   |
|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tipo de red                         | Redes de acceso, Redes de Área Metropolitano (MAN) | MAN o Redes de Área Extendida (WAN) | Redes de ultra largo alcance      |
| Canales por fibra                   | 4 a 16   | 32 a 80                             | 80 a 640                          |
| Espectro utilizado (Bandas ópticas) | O, E, S, C, L                                      | C, L                                | C, L, S                           |
| Espaciado entre canales             | 20 nm (2500 GHz)                                   | 0.8 nm (100GHz)                     | 0.1 nm (12.5 GHz) o menor         |
| Capacidad por canal                 | 2.5 Gbps   | 10 Gbps                             | 10 a 400 Gbps [25]                |
| Capacidad de la fibra               | 20 a 40 Gbps                                       | 100 a 1000 Gbps                     | Mayor a 1 Tbps                    |
| Tipo de LASER                       | DFB (sin necesidad de enfriamiento)                | DFB (con algún tipo enfriamiento)   | DFB (con algún tipo enfriamiento) |
| Tecnología de filtros               | TFF  | TFF, FBG, AWG                       | TFF, FBG, AWG                     |
| Distancia                           | Hasta 80 km  | Cientos de km                       | Miles de km                       |
| Costo                               | Bajo   | Medio                               | Alto                              |
| Amplificación óptica                | No aplica  | EDFA                                | EDFA, Raman                       |

### 1.3.16. RENDIMIENTO DEL RECEPTOR

De la misma forma que los transmisores, los receptores tienen ciertos indicadores para conocer que tan bien trabaja un receptor, los cuales se mencionan a continuación:

- Responsividad o sensibilidad radiante: Es la encargada de medir que tan bien responde un receptor a una señal de luz conforme a la intensidad de dicha señal, es la relación entre la corriente eléctrica de salida del detector y la potencia óptica de entrada que recibe el mismo. Este factor depende también de la longitud de onda de la señal óptica que ingresa al receptor, la respuesta que se tenga depende en gran medida del tipo de detector que esté en el receptor (composición del detector). Por ejemplo, los detectores que son basados en Silicio (Si) son adecuados para longitudes de onda menores a 1  $\mu m$ , los que son basados en Germanio Ge, Arseniuro de Indio y Galio (InGaAs<sub>2</sub>) y Fosfoarseniuro de Indio y Galio (InGaAsP) trabajan mejor a longitudes de onda mayores. Los detectores que poseen una mejor responsividad son los que tienen una etapa de amplificación, tales como: fototransistores, APD y PIN-FET.
- Eficiencia cuántica: Es la relación entre los electrones de salida y los fotones de entrada al detector, depende del material que esté constituido, de la estructura del detector y de la longitud de onda donde se esté operando. En casos donde

el detector incluye una etapa de amplificación la eficiencia es mayor a uno, en la Figura 1.32 se puede observar el comportamiento de eficiencia según el tipo de semiconductor conforme a la longitud de onda.



**Figura 1.32.** Eficiencia Cuántica según el tipo de dopante [3]

- Corriente de oscuridad: Mide el ruido eléctrico que sale de la señal eléctrica del detector cuando éste no está iluminado, y ayuda a establecer un mínimo detectable, ya que una señal perceptible debe producir un nivel de corriente más alto que el de la corriente de oscuridad; puede considerarse una corriente de fuga en ausencia de luz generada por efectos térmicos que pueden ser producidos por factores tales como: voltaje de polarización, temperatura de operación, tipo de detector.
- Velocidad y ancho de banda: La velocidad es la relación del número de bits que se reciben en un tiempo determinado y es un factor que depende del tiempo de bajada del detector, que por motivos de simplicidad se considera igual al tiempo de subida. El ancho de banda de un detector se considera a la frecuencia donde la respuesta (en frecuencia) del detector ha decaído en 3 dB y es inversamente proporcional al tiempo de respuesta del mismo.
- Rango dinámico del detector: Se define como el intervalo entre la mínima potencia óptica detectable (sensibilidad) y la máxima potencia que admite el receptor óptico para cumplir con cierto BER sin saturar el receptor. Las potencias de cada una de las señales que se reciben deben encajar en el rango dinámico de tal forma que no se generen distorsiones; por ejemplo, si ingresa una señal con una potencia muy grande, producirá demasiado ruido y en consecuencia un mayor BER.
- Sensibilidad del detector: Es la mínima potencia óptica requerida en la entrada del conversor opto-electrónico para tener una tasa de error de bits (BER)

deseada, por tanto, es el límite inferior del rango dinámico del receptor; depende de la temperatura y de la longitud de onda de operación.

En la Tabla 1.8 se pueden apreciar los parámetros más importantes en los detectores más utilizados.

**Tabla 1.8** Comparación de parámetros entre tipos de detectores [3]

| Detector               | Responsividad (A/W) | Potencia de ruido equivalente (W/Hz <sup>1/2</sup> ) | Tiempo de respuesta (ns) | Corriente de oscuridad (nA) |
|------------------------|---------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| Fotodiodo PIN (Si)     | 0.6 – 0.8           | 10 <sup>-13</sup> – 10 <sup>-14</sup>                | 1 – 5                    | 3 – 300                     |
| Fotodiodo PIN (InGaAs) | 0.8                 | 10 <sup>-13</sup> – 10 <sup>-14</sup>                | 1 – 3                    | 10 – 30                     |
| APD (Si)               | 7.4 – 100           | 10 <sup>-14</sup>                                    | 0.5 – 2                  | 1                           |

Para complementar, la parte más sensible del receptor es el detector, por lo cual parámetros como el área son muy importantes tomar en cuenta; el área del detector debe ser mayor al diámetro de la fibra para que la cantidad de luz que salga de ésta entre en su totalidad en el detector; la velocidad que también se ve afectada por el área del detector debido a que, si ésta aumenta el tiempo de respuesta también lo hará; la alineación se debe considerar, puesto que, si la fibra y el detector se encuentran mal alineados, habrá pérdidas de luz.

El material del que esté constituido el detector es de suma importancia, ya que, características como la velocidad, la corriente de oscuridad y el rango de longitudes de onda de trabajo dependen de la composición del mismo.

Finalmente, cuando se tratan de equipos que requieren conversión electro-óptica o viceversa, se debe tomar en cuenta los tiempos y el resto de parámetros eléctricos que afectan el rendimiento del receptor. Hay en la actualidad equipos que son netamente ópticos y no necesitan dicha conversión, lo cual mejora notablemente el desempeño del receptor.

### 1.3.17. PRESUPUESTO DEL ENLACE

Conocido también como presupuesto de potencias o presupuesto de pérdidas, sirve para garantizar que la señal llegue al receptor de forma adecuada, y así tener un buen rendimiento en un sistema de comunicaciones. En el diseño de un sistema óptico es de vital importancia tomar en consideración algunos factores para que la luz que emita el transmisor sea lo suficientemente potente, de tal forma que llegue al otro extremo de la fibra y asegurar que el ancho de banda del sistema permita llevar los datos a altas tasas

de información. Si la señal de datos es muy débil, en el receptor será más complicado discernir la parte que es información del ruido, lo cual producirá errores; esto incide directamente en el BER, el cual debe estar alrededor de  $10^{-9}$  que es el límite aceptable. Entonces se debe cumplir dos condiciones para obtener una apropiada recepción [8]:

- La potencia en recepción debe ser lo suficientemente alta para mantener el BER lo más bajo posible.
- La potencia en recepción debe ser lo suficientemente baja para no saturar y dañar el receptor.

El objetivo de realizar el presupuesto de potencias es asegurar que la potencia que llega a recepción se encuentre dentro del rango dinámico del receptor, debe considerarse todos los equipos, elementos y/o circunstancias del sistema que puedan introducir pérdidas o ganancias. Da una idea de las necesidades del sistema en cuanto a potencia requerida en transmisión, uso de amplificadores, uso de atenuadores, entre otros.

Otro factor que se debe tomar en cuenta es el margen de seguridad, que ayuda a resguardar al sistema contra degradación propia por el paso del tiempo, reparaciones, nuevos requisitos y/o cualquier imprevisto en cuanto a pérdidas; mientras más complejo sea el sistema de comunicaciones, el margen de seguridad debe ser mayor, el rango del margen de seguridad va de 3 dB a 10 dB, y se selecciona de acuerdo al tipo de sistema, complejidad y necesidad del mismo.

La ganancia únicamente se tiene cuando se utilizan amplificadores para suplir la atenuación del sistema, normalmente son empleados en sistemas *long haul*. Dicho lo anterior, se muestra la relación del balance de potencias en la Ecuación 1.23 [3].

$$Potencia_{TX} - Pérdidas_{TOTALES} + G = Sensibilidad_{RX} + Margen\ de\ Seguridad \quad (1.23)$$

En las pérdidas totales se deben considerar las pérdidas en la transferencia de la luz desde la fuente hacia la fibra y de la fibra hacia el detector, las pérdidas generadas por los conectores, los empalmes, los acopladores, la fibra, etc., y todo factor o circunstancia que sume a las pérdidas totales; se toman en cuenta los valores mínimos que vienen especificados de los *datasheets*. En el caso de sistemas ya instalados, se debe tomar en cuenta si se ha realizado alguna reparación que incluya algún componente que introduzca pérdidas/ganancias. Para los sistemas que son nuevos, se parte de un diseño, y aquí se deben considerar todos los elementos/equipos que son previamente seleccionados y factores que afectan al sistema; y así efectuar el cálculo para asegurar el desempeño del sistema. Un ejemplo muy simple y práctico se puede encontrar en el ANEXO C, para tener una buena noción de cómo realizar el presupuesto de potencias.



## **2. METODOLOGÍA**

En este capítulo se abarcará varios tópicos necesarios para la elaboración del diseño. En primer lugar, se presenta los antecedentes para la proyección de la demanda en la provincia, la explicación de por qué el crecimiento de la población en esta provincia tiene un comportamiento inusual y/o contrario al de las otras provincias (leyes de protección de la provincia de Galápagos) y las estimaciones estadísticas para la proyección de la demanda.

A continuación, se define la ruta estimada para el tendido del cable, definición de las coordenadas donde estarían las estaciones terrenas, cálculo de la distancia para la longitud del cable submarino, selección del tipo de fibra y del tipo de cable (protección), equipos que conforman un sistema de cable submarino (planta seca y planta húmeda) y requerimientos del diseño del sistema.

Finalmente, se incluye una descripción técnica de los equipos necesarios en el diseño del sistema de cable submarino y características principales de los equipos que conforman el sistema (seleccionados entre los fabricantes).

### **2.1. PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE INTERNET**

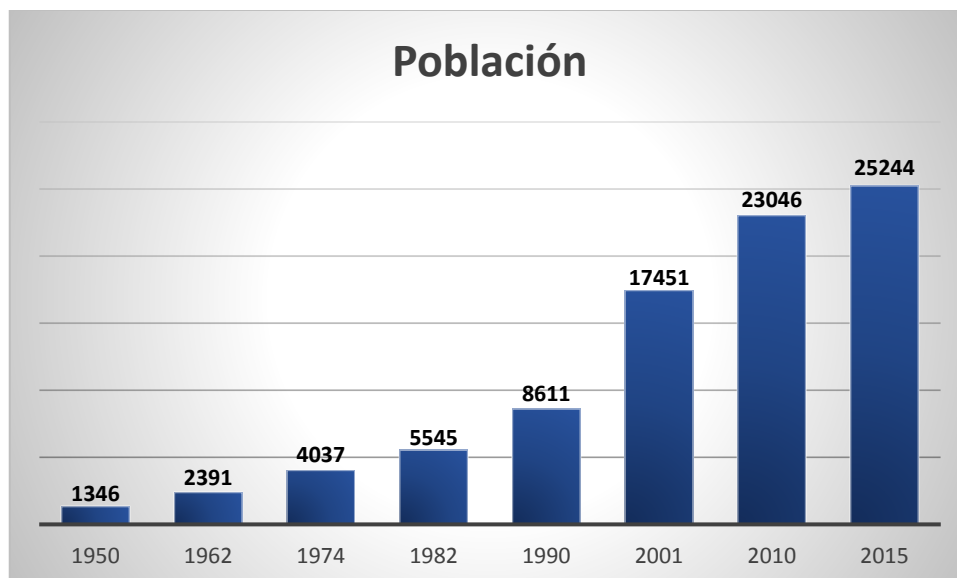
#### **2.1.1. ANTECEDENTES**

En Ecuador, el último censo a nivel nacional fue realizado en el año 2010 por parte del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), de acuerdo al cual el Archipiélago de Galápagos tenía con 23046 habitantes. Poco tiempo después, el INEC a través del Censo de Población y Vivienda de Galápagos (CPVG) realizó un censo exclusivamente en la provincia en el año 2015, el cual reflejaba que el Archipiélago de Galápagos contaba con 25244 habitantes, de los cuales 12318 eran mujeres y 12926 hombres; entre los resultados obtenidos se tuvo que la concentración poblacional se distribuye en tres de las islas de la provincia, donde Santa Cruz contaba con 15701 personas, San Cristóbal tenía 7199 e Isabela 2344 [26].

En la Figura 2.1 se puede apreciar el histórico de la población a lo largo de los años según los censos por parte del INEC, donde se tienen los siguientes resultados: del año 1950 al 2010 se puede apreciar un crecimiento exponencial muy marcado, y del año 2010 al 2015 cambia la forma como venía dándose la estadística. Según datos del INEC se tenía una tasa de crecimiento intercensal promedio anual<sup>14</sup> del 3.1% en el periodo 2001-2010 y para el periodo 2010-2015 decayó al 1.8% [27].

---

<sup>14</sup> Tasa de crecimiento promedio anual: Es el incremento anual en la población por cada 100 habitantes.



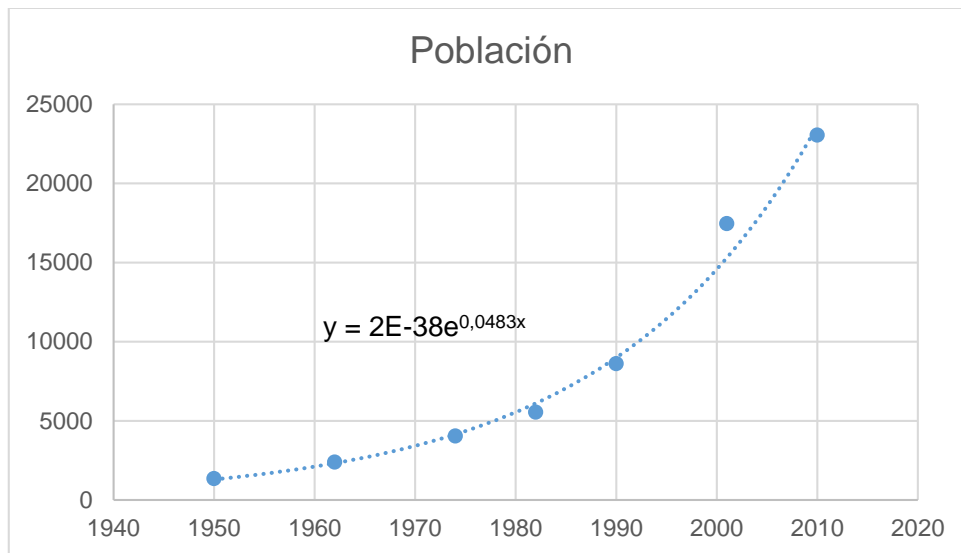
**Figura 2.1.** Censos de Población y Vivienda 1950, 1962, 1974, 1982, 1990, 2001 y 2010, Censos de población y Vivienda Galápagos 2015 [27]

El modelo matemático que se muestra en la Ecuación 2.1 (obtenido por medio de Excel) es el que mejor se ajusta a la tendencia según los datos tomados de los informes oficiales del INEC, los mismos que se muestran en la Tabla 2.1; y es válido únicamente en ese dominio de tiempo ( $1950 \leq x \leq 2010$ ), en la Figura 2.2 se puede apreciar la curva de dicho modelo. Estos valores fueron recalculados en el último informe que presentó el INEC en el año 2015 [27], puesto que, los datos que se obtuvieron de los censos anteriores no diferenciaron la población habitual de la temporal, a las personas que declararon ser residentes habituales se las empadronó en la provincia.

$$y = 2 \cdot 10^{-38} \cdot e^{0.0483x} \quad (2.1)$$

**Tabla 2.1** Datos de población en la provincia de Galápagos según los censos realizados [27]

| Año  | Población | Tasa de crecimiento anual promedio (%) |
|------|-----------|--|
| 1950 | 1346      | -                                      |
| 1962 | 2391      | 4.8                                    |
| 1974 | 4037      | 4.4                                    |
| 1982 | 5545      | 4                                      |
| 1990 | 8611      | 5.5                                    |
| 2001 | 17541     | 6.4                                    |
| 2010 | 23046     | 3.1                                    |



**Figura 2.2.** Curva ajustada en Excel a los datos de la Tabla 2.1

Por otro lado, la provincia de Galápagos a lo largo de los años ha obtenido algunas distinciones a nivel mundial por la conservación de la fauna y flora del Archipiélago, por ejemplo:

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en el año 1978 declaró a Galápagos como Patrimonio Natural de la Humanidad, en 1984 como Reserva de la Biosfera y en 2001 como Sitio Ramsar<sup>15</sup> [28], puesto que, el archipiélago conserva el 95% de la biodiversidad original según la Dirección del Parque Nacional Galápagos (DPNG). Para el año 2007 debido al turismo masivo y especies invasoras, Galápagos pasó a la lista de Patrimonios Naturales en Peligro de la UNESCO, a pesar de ello unos años después se la retiró de la lista roja [29], en el mismo año el Gobierno declaró que Galápagos es un patrimonio en riesgo y es prioridad nacional y estableció una política de reforma y fortalecimiento de la gestión del Estado en el manejo de las islas [30]. En el año 2015, el Gobierno Nacional a través del Ministerio del Ambiente fortaleció la conservación y sostenibilidad de las Islas Galápagos mediante la aprobación de la Ley Orgánica de Régimen Especial de Galápagos (LOREG), la cual fue aprobada el 11 de junio de ese año, en la que se toman algunas medidas para no afectar a la fauna nativa de la provincia.

La intención de las organizaciones sociales y/o ambientales a nivel nacional, regional o mundial es crear conciencia en la gente sobre la importancia de las islas, y la conservación del ecosistema frente al crecimiento acelerado de la economía y la

<sup>15</sup> Sitio Ramsar: Se refiere a las zonas que poseen alto grado de humedad y sitios de importancia internacional para la conservación de la diversidad biológica [65].

población de la provincia, por lo cual se hacen reuniones periódicas para tratar sobre el estado de esta zona y verificar si se requieren nuevas medidas para el cuidado de la misma.

### **2.1.1.1. Leyes vigentes en el Archipiélago de Galápagos**

#### *2.1.1.1.1. Ley Orgánica de Régimen Especial de la provincia de Galápagos LOREG*

De acuerdo con el Segundo Suplemento del Registro Oficial No. 520 de la Asamblea Nacional de la República del Ecuador se aprobó la LOREG, la cual contempla las siguientes normativas en relación a la capacidad poblacional admisible de las islas [31]:

- Título V: Régimen de Migración y Residencia en la Provincia de Galápagos

#### Capítulo I: Consideraciones Generales

Contemplan desde el Artículo 35 al 49, donde se habla de las condiciones de ingreso a la provincia (calificación en una de las categorías migratorias obligatorio, caso contrario no puede ingresar a la provincia por ningún medio de transporte), capacitación sobre “Conservación de Recursos Naturales, Protección Ambiental y Desarrollo Sustentable” impartida por la secretaría técnica del Consejo de Gobierno del Régimen Especial de la provincia de Galápagos (CGREG), puntos de ingreso (puertos y aeropuertos habilitados, calificados y autorizados por el CGREG), categorías migratorias y residencias (residente permanente, residente temporal, turista y transeúnte), obligaciones para los transeúntes y turistas (documento de control y pasaje de ida/vuelta), actividades de los residentes (los residentes permanentes: actividades productivas y servicios en la provincia y los temporales: sólo las actividades que motivaron su ingreso), concurso para contratación de personal (preferencia para los residentes permanentes con derecho a nombramiento fijo, para los servidores públicos que caen en categoría de residentes temporales únicamente se puede otorgar un nombramiento provisional con un máximo de 5 años), procedimientos para la contratación pública (preferencia para los productores y proveedores locales), término para el trámite de residencia (solicitud para la obtención de una categoría migratoria con un plazo de treinta días para recibir una respuesta) y seguro de salud (todo turista antes de ingresar a la provincia debe contar con un seguro de salud privado).

En cuanto a las categorías migratorias: se considera residente permanente a la persona que vive y trabaja de forma permanente en la provincia (personas cuyos padres tengan residencia permanente, cónyuge de un residente permanente que al menos tengan diez años de casados y conviviente que se encuentre en relación de

hecho demostrable por al menos diez años); los residentes temporales son las personas que pueden permanecer en la provincia por un tiempo fijo con la obtención de un permiso de trabajo a cambio de una remuneración (entre los más comunes se tiene a los cónyuges o convivientes de un residente permanente mientras transcurren los diez años para la legalización de su residencia permanente, hijos menores de dieciocho años que no estén emancipados y dependan de residentes temporales cuando posean alguna enfermedad/discapacidad debidamente calificada por la autoridad competente, servidores públicos que estén cumpliendo sus labores por más de noventa días en las islas, representantes legales de empresas que se encuentren en Galápagos, Fuerzas Armadas y Policía Nacional que hayan sido designadas para cumplir sus funciones en la provincia, científicos máximo por cuatro años (dos la primera vez con una única renovación por dos años más), voluntarios, becarios, entre otros); transeúntes que son personas nacionales y extranjeras que estén de paso por las islas con un máximo de noventa días por año (servidores públicos, profesionales de todas las ramas, deportistas, artistas, colaboradores frente a desastres naturales o catástrofes, etc.); y finalmente la categoría turista que se refiere a las persona que entra a la provincia con el fin de visitar las áreas protegidas y no realizar ninguna actividad lucrativa por un máximo de sesenta días por año.

## Capítulo II: Procedimientos de Control

Comprende desde el Artículo 50 al 55, donde dice que: la secretaría técnica del CGREG será la encargada del control migratorio, establecerá los requisitos y procedimientos referente a los derechos y demostración de hechos que sustentan la calidad de residencia de una persona, y además tiene la facultad de definir los controles integrales y/o aleatorios; también contempla las condiciones de retorno voluntario, salida forzosa (estado irregular, es decir que no esté en alguna de las categorías migratorias o infracción de las leyes, como por ejemplo: aquellas personas que se realicen actividades a las cuales no fueron autorizadas en el momento del ingreso y/o permanencia en las islas) y responsabilidad solidaria (cuando una persona ha infringido la ley debe colaborar con su salida forzosa).

### - Título VI: Las Actividades Productivas en la Provincia de Galápagos

En el Capítulo II sobre Actividad Turística, se menciona el Artículo 72.- Construcción de infraestructuras de alojamiento turístico, donde se impide la construcción de nueva infraestructura o ampliación de las existentes si es que no se cumple con lo establecido en el Plan de Regulación Hotelera determinado por la Autoridad

Nacional de Turismo, el cual realiza un estudio ambiental que debe estar aprobado por el Pleno del CGREG.

- Título VIII: Régimen Sancionatorio

En la Sección Tercera Otras Infracciones Administrativas en el Artículo 102.- Construcciones irregulares donde se menciona que si no hay cumplimiento de lo descrito en el Artículo 72 del Capítulo II del Título VI, la sanción será la demolición de la infraestructura por parte de la secretaría técnica del CGREG.

- Disposiciones Generales

Según la disposición quinta de esta sección, se establece que el Pleno del CGREG, previa solicitud puede establecer los periodos de moratoria para la construcción de edificaciones de carácter turístico y la adjudicación de concesiones de operación turística.

2.1.1.1.2. *Decreto Ejecutivo 1363*

Emitido el 21 de abril del año 2017 por parte del Presidente de la República de aquel entonces, Rafael Correa, donde se expidió por decreto el Reglamento General de Aplicación de la Ley Orgánica de Régimen Especial de la Provincia de Galápagos. En el Título VII de este documento se trata tres capítulos referentes al Régimen de Migración y Residencia [32].

- Capítulo I: Control de Migración y Residencia

Se encuentra desde el Artículo 28 al 34, los cuales describen las siguientes normativas: la regulación del flujo migratorio y residencia, que toda persona que ingrese a la isla deberá contar con la tarjeta de control de tránsito emitida por el CGREG, solicitudes de turistas y transeúntes para acceder a los servicios que oferte la provincia está obligado a presentar la tarjeta de control de tránsito a los funcionarios de las entidades (con excepción de servicios de salud), todo ingreso o salida serán registrados, plazo de estancia de los transeúntes (noventa días), residencias permanentes y temporales.

- Capítulo II: Régimen laboral en la provincia de Galápagos

Comprende desde el Artículo 35 al 42, donde se describen los procedimientos de contratación tanto pública como privada a través de la Bolsa de Empleo (mecanismo empleado por el CGREG para recibir las ofertas y peticiones de trabajo), se preferirán a los residentes permanentes en cualquier situación, únicamente si no se satisfacen las necesidades del perfil requerido para el puesto de trabajo, puede

ingresar un residente temporal o transeúnte. Los concursos para la contratación, los servidores públicos (concurso de méritos y oposición) y los servidores privados (concurso para la contratación privada), siempre serán verificados primero en la Bolsa de Empleo y en caso de que no existieren candidatos, la secretaría técnica del CGREG será la encargada de lanzar el concurso tanto para residentes como para gente del continente; únicamente en el caso de la empresa privada, el empleador puede contratar directamente a los residentes permanentes que no se encuentren como candidatos en la Bolsa de Empleo y tienen que informar a esta entidad en el plazo de 72 horas. Los plazos para realizar los concursos son de treinta días, si el proceso no finaliza en ese lapso, el empleador está en libertad de contratar directamente a la persona que satisfaga con los requisitos impuestos, sea residente en las islas o no.

- Capítulo III: Extinción de las categorías migratorias

Contiene desde el Artículo 43 al 48, se habla de los procesos de salida por: abandono voluntario y cese de funciones (el cual se debe informar en un plazo de 72 horas a la secretaría técnica del CGREG). Además, trata las revocatorias de las categorías migratorias y sus respectivas sanciones (expulsión de la provincia y multas económicas), si es que, en cualquiera de los casos no se efectúa el cumplimiento de la ley. Las multas generadas darán lugar al financiamiento de los procesos de control de migración y residencia en la provincia.

Finalmente, se puede decir que el Decreto Ejecutivo 1363 es un refuerzo a lo que ya fue aprobado por la Asamblea Nacional a través de la LOREG, la cual hasta la fecha se encuentra en estado vigente.

### **2.1.2. CURVAS DE POBLACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN**

Los antecedentes descritos en la sección previa sobre las medidas ambientales de protección y de conservación de la fauna nativa del Archipiélago indican que el crecimiento de la población de Galápagos no puede ser descontrolado, por lo que para el periodo comprendido entre los años 2010 y 2015, ya se puede percibir una diferencia en el comportamiento del crecimiento de la población; según los datos oficiales del INEC y del CPVG, en cinco años la población incremento únicamente en 2198 personas, lo que quiere decir que la tasa de crecimiento intercensal en esos cinco años fue 9.537% y la tasa de crecimiento anual promedio fue de 1.84%, es decir, hubo una drástica reducción del valor promedio anual de crecimiento que se tenía en relación a los periodos anteriores. Estos últimos datos alteran la forma como venía dándose la proyección del periodo 1950-2010.

En el plan de trabajo de este proyecto de titulación, se mencionó que se haría una proyección de 5 años desde el presente año (2019). El criterio que se tomará como base para realizar dicha proyección incluye las siguientes condiciones:

- Galápagos es una zona de vulnerabilidad ecológica, por lo cual su población debe mantenerse tan estable como sea posible.
- A partir del 2001, el valor de la tasa de crecimiento anual promedio se ha reducido alrededor de la mitad de un periodo a otro (ver Tabla 2.1), el cambio más evidente fue en el periodo 2010-2015 donde en tan solo cinco años la tasa de población se redujo a casi la mitad (pasó del 3.1% al 1.8%), para el año 2020 se prevé que esta tasa bajará al 0.9% y para 2025 se reducirá al 0.45%, siguiendo el criterio que baja en razón de aproximadamente la mitad cada cinco años.
- La predicción de la población comprendida entre el periodo 2010-2015 realizada por el INEC fue considerando una tasa de crecimiento anual promedio del 1.8% [27], en este periodo la tendencia sufre un cambio radical con respecto a los periodos anteriores (censos comprendidos entre 1950 y 2010).
- El crecimiento poblacional seguirá siendo considerado creciente, sin embargo, debido a todas las normativas aprobadas, tanto por el poder legislativo como por el ejecutivo, en cuanto al control de la población en la provincia descritas en la sección 2.1.1.1, la tasa de crecimiento anual promedio seguirá decreciendo a un valor mucho menor al de los años anteriores.
- La densidad de población residencial en la provincia de Galápagos está alcanzando su límite, según información de la plataforma pública de geodatos de la Fundación Charles Darwin [33].

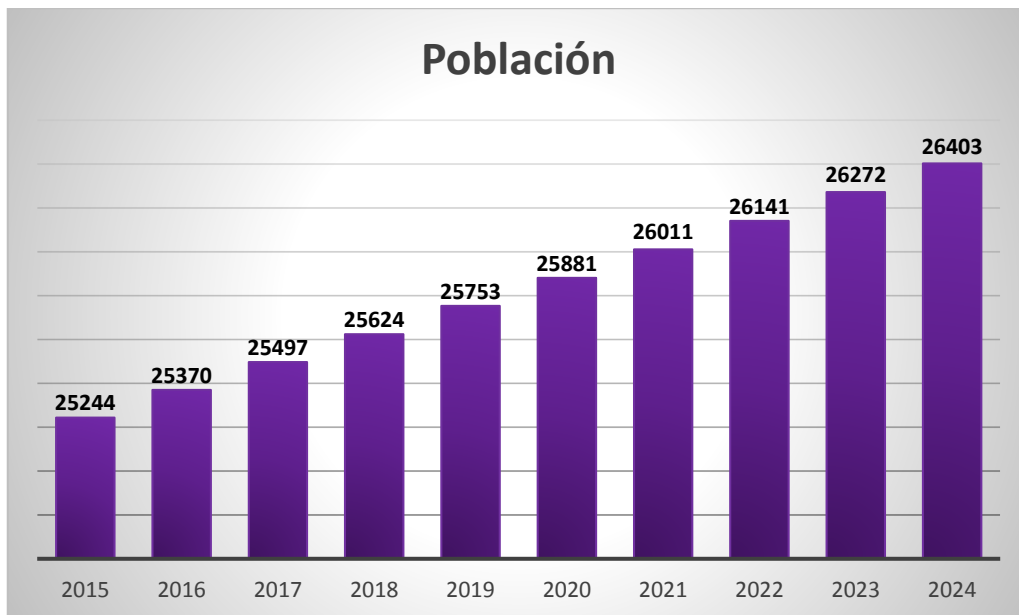
Considerando todo lo anterior, se asume que la tasa de crecimiento anual promedio para los siguientes años tendrá un valor del 0.5% (valor entre el rango de tasas de crecimiento anuales promedio estimados en el punto dos de las condiciones descritas anteriormente), lo cual avizora una población con tendencia creciente, pero en bajas proporciones, este criterio es el que se toma para poder realizar el cálculo de la población para Galápagos en los años futuros. En la Tabla 2.2 se tiene los valores aproximados de población, tomando como punto de partida el último censo realizado en el 2015 y los siguientes valores calculados con la nueva estimación de tasa de crecimiento promedio anual (0.5%) hasta el año 2024.



**Tabla 2.2.** Datos estimados con una tasa de crecimiento anual promedio de 0.5%

| <b>Año</b> | <b>Población</b> |
|------------|------------------|
| 2015       | 25244            |
| 2016       | 25370            |
| 2017       | 25497            |
| 2018       | 25624            |
| 2019       | 25753            |
| 2020       | 25881            |
| 2021       | 26011            |
| 2022       | 26141            |
| 2023       | 26272            |
| 2024       | 26403            |

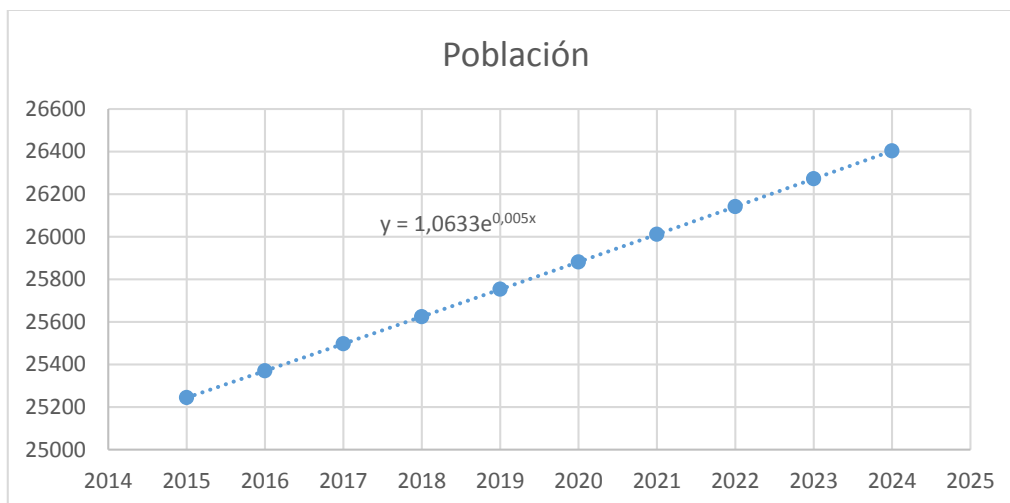
De esta manera, en la Figura 2.3, se puede apreciar la proyección del crecimiento de la población para el periodo requerido en la presente investigación.



**Figura 2.3.** Proyección de la población hasta 2024

Según la aproximación realizada, se puede sacar una función matemática válida para el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2015 al 2024, la cual indica la nueva tendencia de crecimiento de la población y se expresa según la Ecuación 2.2. La gráfica de dicha Ecuación se puede observar en la Figura 2.4.

$$y = 1.0633 \cdot e^{0.005x} \quad (2.2)$$



**Figura 2.4.** Representación gráfica de la función matemática de la Ecuación 2.2

Siendo así, la población total del Archipiélago de Galápagos para el año 2024 alcanzaría los 26403 habitantes, en esta estimación únicamente cuentan los residentes permanentes de la zona, mas no los residentes temporales, transeúntes e infantes (fuerzas militares).

Por otra parte, según el informe del primer semestre del 2019 presentado por parte de la Dirección del Parque Nacional Galápagos (DPNG), hubo un total de 140807 arribos turísticos hasta el 17 de junio [34] (en seis meses 14807, lo que en promedio representa 23468 por mes y aproximadamente 782 por día), los cuales se pueden distribuir en todo el año tomando como referencia los datos de *Metro Journeys by Metropolitan Touring*, una empresa dedicada a la oferta de turismo en el archipiélago, donde se dice que el tiempo de estancia recomendado en las islas es de cinco a siete días por temas de costos, tiempo y tamaño del Archipiélago [35]. Sumado al ingreso de turistas, en los arribos que llegan a las islas también se incluyen las personas que se encuentran en las otras categorías migratorias (transeúntes, residentes temporales e infantes). Entonces, se puede asumir que en promedio en la provincia hay cerca de 2000 personas por día que no son residentes permanentes (en promedio mil personas por la parte turística y se considera un valor igual para las otras categorías migratorias), contando que siempre hay un flujo constante, es decir, mientras arriban unos, otros salen de la zona.

Además, se tienen datos de un censo erróneo en el 2010 (25124 habitantes), cuyos datos incluían a todas las personas que de momento estuvieron en las islas, luego para el 2015 corrigieron ese valor donde se incluía únicamente a los residentes habituales (23046 habitantes) [27]; producto de esta diferencia, se tiene un excedente de 2078 personas, lo cual se aproxima con el valor que se estimó en el párrafo anterior.

De esta manera, el número total de personas presentes que se tendrán en un día para el año 2024 en Galápagos está alrededor de 28403 (26403 de la estimación de residentes permanentes de la Tabla 2.2 más 2000 de los residentes con otras categorías migratorias), siempre y cuando se mantenga lo más constante posible el número de ingresos de no residentes permanentes.

Como datos adicionales, en el año 2015 se tuvo un total de 11986 viviendas (particulares y colectivas<sup>16</sup>) en la provincia, 11674 fueron viviendas particulares; de las cuales 9622 viviendas estaban ocupadas (82.4%), 1352 desocupadas (11.6%) y 700 en construcción (6%). El 95.2% de estas viviendas son consideradas como casas, villas y cuartos de inquilinato, en tanto que el restante son mediaguas, ranchos, covachas, otras. En cuanto al número promedio de personas por hogar, las estadísticas reflejan que es 3, y que el número total de hogares en el 2015 fue de 8360 [27]. Sumado a lo anterior, la memoria estadística de Galápagos 2017 informó que en el 2010 se realizó el último censo nacional económico, donde constaban hasta esa fecha un total de 1126 establecimientos, de los cuales sólo el 21.9% indicó que usaba Internet [36].

### **2.1.3. CÁLCULO DE LA DEMANDA DE ACCESO A INTERNET**

#### **2.1.3.1. Actuales prestadores de servicio y tecnologías de acceso**

Hoy en día, la única forma de que las islas tengan acceso a Internet es por medio de la tecnología satelital, las empresas que prestan este servicio a la provincia son: Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP como líder en la zona, Ifotoncorp S.A., Puntonet, Claro Ecuador (en convenio con la empresa latinoamericana de soluciones satelitales Axesat y con la compañía europea de telecomunicaciones Eutelsat), entre otros proveedores minoritarios.

Un reportaje realizado a finales del 2016 sobre las islas Galápagos, señala que el servicio de Internet es de pésima calidad y extremadamente costoso, lo cual limita el funcionamiento de las actividades privadas, institucionales y negocios; la Federación Nacional de Cámaras Provinciales del Ecuador (FENACAPTUR) indica que los usuarios de este servicio pierden muchas oportunidades, tiempo, competitividad y dinero por la deficiencia del servicio, por lo cual proponen que la implementación de un cable submarino de fibra óptica sería la solución para solventar este inconveniente [37].

Debido a la falta de un buen servicio de Internet, se decide hacer una propuesta que ayude a mejorar los servicios de conectividad a Internet del Archipiélago de Galápagos,

---

<sup>16</sup> Vivienda particular es un recinto de alojamiento separado y con acceso independiente destinado a albergar uno o varios hogares, y la vivienda colectiva es la que es habitada por un grupo de personas que la comparten por motivos de salud, disciplina, religión, entre otros (cuarteles, hospitales, conventos, etc.)

y con ello poner a la provincia al mismo nivel tecnológico que en la parte continental de Ecuador. La fibra óptica debido a sus altas prestaciones es el medio de transmisión seleccionado para esta propuesta y así brindar un acceso de calidad y a costos razonables, tanto a nivel residencial como corporativo. Se debe tomar en cuenta que la inversión en un proyecto de cable submarino no puede ser de un solo inversionista, sino de un conjunto de ellos para la viabilidad económica del mismo.

### 2.1.3.2. Cálculo de la demanda de Internet

Cada año se incrementa el uso de Internet por la facilidad de comunicarse a largas distancias a través de esta red de información, en el caso de la provincia de Galápagos es la forma más sencilla de tener contacto con la parte continental del Ecuador y en sí con el mundo. El INEC realiza periódicamente encuestas tecnológicas a nivel nacional que brindan datos estimativos sobre el uso de las tecnologías de la información y comunicación TICs, que para el propósito de este documento se considera los datos relacionados al uso Internet, la información que se tiene sobre el uso del celular y de la computadora son un referente de cómo ha evolucionado la provincia en la utilización de la tecnología. En la Tabla 2.3 se pueden apreciar los valores correspondientes del uso de cada una de las tecnologías [38], cuya tendencia evidentemente es creciente.

**Tabla 2.3.** Estadísticas del uso de las TICs en Galápagos

| <b>Año</b> | <b>Uso de Internet (%)</b> | <b>Uso de celular (%)</b> | <b>Uso de la computadora (%)</b> |
|------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 2014       | 64.6                       | 65.8                      | 65.6                             |
| 2015       | 67.7                       | 64                        | 64.4                             |
| 2016       | 78.7                       | 70.2                      | 68.4                             |
| 2017       | 81.3                       | 71.3                      | 68.1                             |

No hay datos sobre el año 2018, sin embargo, con la información obtenida se puede hacer una buena aproximación de la demanda de Internet que requiere la provincia para el año 2024, tomando como criterio de diseño la demanda generada por parte de cuentas residenciales y cuentas corporativas, además de los enlaces que pueden ser rentados para otros propósitos por otras compañías y/o empresas.

En el año 2018 se tuvo un total de 4070 cuentas de Internet fijo según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) [39], este valor incluye las cuentas residenciales y las cuentas corporativas, no se tiene información de cuántas de estas son de cada tipo, por lo que se necesita hacer un estimativo en base a los datos que se han obtenido. Así, asumiendo que la población fue para ese año de 25624 habitantes de acuerdo a los datos de la Tabla 2.2, considerando que cada hogar tiene tres miembros, se tiene:

$$\# \text{hogares}_{2018} = \frac{\# \text{de habitantes}}{3} \quad (2.3)$$

$$\# \text{hogares}_{2018} = \frac{25624}{3}$$

$$\# \text{hogares}_{2018} = 8541.3 \cong 8541$$

De esta manera, se tienen 8541 hogares que necesitarían un acceso a Internet fijo al año 2018. Para determinar el número de establecimientos, se utiliza una progresión geométrica (método utilizado por INEC para realizar proyecciones estadísticas), tomando en cuenta una tasa de crecimiento anual del 0.5% desde el 2010 que fue el último dato que se obtuvo, por lo que se tiene (donde  $n$  es el número de años transcurrido desde 2010 hasta 2018):

$$\# \text{establecimientos}_{2018} = \# \text{establecimientos}_{2010} \cdot (\text{tasa de crecimiento anual} + 1)^{n-1} \quad (2.4)$$

$$\# \text{establecimientos}_{2018} = 1126 \cdot (0.005 + 1)^{9-1}$$

$$\# \text{establecimientos}_{2018} = 1171.8 \cong 1172$$

Dicho esto, el número de establecimientos a esa fecha sería de 1172. Esto da un total de 9713 cuentas que requirieron el servicio (87.93% residencial y 12.07% corporativo).

$$\% \text{penetración de Internet}_{2018} = \frac{\# \text{cuentas con servicio de Internet}}{\# \text{total de cuentas requeridas}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$$\% \text{penetración de Internet}_{2018} = \frac{4070}{9713} \cdot 100$$

$$\% \text{penetración de Internet}_{2018} = 41.9 \% \cong 42 \%$$

En conclusión, se puede decir que el 42% del total de las cuentas estimadas tuvieron acceso a Internet en el 2018. Los datos considerados para el cálculo de la demanda son tomados hasta este año en base a que es el último valor proporcionado oficialmente por ARCOTEL (número de cuentas), no se tienen cifras oficiales para el 2019.

Lo que se pretende con el diseño del cable submarino es llegar al mayor número posible de personas para brindar este servicio por todas las razones expuestas en el alcance del proyecto, para ello se va a considerar aumentar el porcentaje de penetración por parte de Internet fijo al menos al 80% tomando como referencia los datos que se tienen en la parte continental (provincia de Pichincha 71% al año 2018) [40].

Para el cálculo del número de cuentas residenciales y de las corporativas, se toma el mismo algoritmo que se realizó para la estimación de datos del año 2018, y que se muestra a continuación:

$$\# \text{hogares}_{2024} = \frac{\# \text{de habitantes}_{2024}}{3} \quad (2.6)$$

$$\# \text{hogares}_{2024} = \frac{26403}{3}$$

$$\# \text{hogares}_{2024} = 8801$$

Considerando n como el número de años transcurridos desde 2010 a 2024

$$\# \text{establecimientos}_{2024} = \# \text{establecimientos}_{2010} \cdot (\text{tasa de crecimiento anual} + 1)^{n-1} \quad (2.7)$$

$$\# \text{establecimientos}_{2024} = 1126 \cdot (0.005 + 1)^{15-1}$$

$$\# \text{establecimientos}_{2024} = 1207.39 \cong 1207$$

En el año 2024 el número de cuentas residenciales que requerirían Internet sería de 8801 y el número de establecimientos (cuentas corporativas) sería alrededor de 1207, lo que suma un total de 10008 posibles cuentas para brindar este servicio (87.93% residencial y 12.07% corporativo); de esas, se tiene que sacar el 80% (porcentaje de penetración esperado) mencionado previamente.

$$\# \text{cuentas beneficiadas}_{2024} = \% \text{de consideración de diseño} \cdot \# \text{total de cuentas}_{2024} \quad (2.8)$$

$$\# \text{cuentas beneficiadas}_{2024} = 0.8 \cdot 10008$$

$$\# \text{cuentas beneficiadas}_{2024} = 8006.4 \cong 8006$$

Las cuentas consideradas para el cálculo de la demanda de capacidad de Internet serían 8006 (conservando los porcentajes se tiene, 7040 cuentas residenciales y 966 corporativas).

Por otro lado, se tienen las cuentas de Internet móvil, a nivel nacional el porcentaje de penetración de este servicio alcanzó el 54.88% en el año 2018 [40]. Según los datos que se estimaron en 2017 (últimos datos en cuanto acceso a las TICs, ver Tabla 2.3), se realizan los siguientes cálculos para determinar el número de usuarios de celular:

$$\# \text{usuarios}_{\text{celular}2017} = \% \text{penetración celular}_{2017} \cdot \text{población}_{2017} \quad (2.9)$$

$$\# usuarios_{celular2017} = 0.713 \cdot 25497$$

$$\# usuarios_{celular2017} = 18179.36 \cong 18179$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2017} = \% penetraci3n nacional_{2017} \cdot \# usuarios_{celular} \quad (2.10)$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2017} = 0.5488 \cdot 18179$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2017} = 9976.8 \cong 9977$$

El número de usuarios de celular fue 18179 (71.3% de la poblaci3n 2017), de estos se estima que 9977 abonados tuvieron este servicio en la provincia de Galápagos.

Para el año 2024 se pretende subir el porcentaje del uso del celular al 80%, y el servicio de Internet m3vil al 60%(referencial a la parte continental, año 2018) considerando que no toda la gente estara dispuesta a contratar este servicio. A continuaci3n, se muestran los siguientes cculos para determinar el número de usuarios de celular para el año 2024:

$$\# usuarios_{celular2024} = \% penetraci3n celular_{2024} \cdot poblaci3n_{2024} \quad (2.11)$$

$$\# usuarios_{celular2024} = 0.8 \cdot 26403$$

$$\# usuarios_{celular2024} = 21122.4$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2024} = \% de diseño \cdot \# usuarios_{celular2024} \quad (2.12)$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2024} = 0.6 \cdot 21122.4$$

$$\# usuarios Internet \acute{m}ovil_{2024} = 12673.44 \cong 12673$$

El número de abonados de telefonía celular para el año 2024 seran 12673.

En el acceso a Internet se debe considerar todo tipo de aplicaci3n susceptible a pasar por esta red, desde consultas básicas vía Web, pasando por redes sociales (Instagram, Facebook, WhatsApp, Telegram, Twitter, Snapchat, etc.), transferencias bancarias nacionales e internacionales, pagos de facturas, y hasta plataformas de video (Netflix, HBO, entre otros) o videoconferencias; en definitiva, todo tipo de aplicaci3n multimedia, por lo cual se debe tomar en consideraci3n que la capacidad del canal debe soportar la demanda que este tipo de aplicaciones puede generar, claro está que no todos los usuarios se conectan al mismo tiempo, por lo que se debe introducir un índice de simultaneidad<sup>17</sup>, el cual se considera en la Tabla 2.4 para el cculo de la demanda de

---

<sup>17</sup> ndice de simultaneidad: En este contexto es el porcentaje de la poblaci3n que va a establecer una conexi3n a Internet al mismo tiempo.

conexiones que va a existir en la hora pico<sup>18</sup>. El propósito de este Trabajo de Titulación no considera un análisis de tráfico a profundidad, pero es necesario tomar en cuenta estos conceptos para la estimación que se pretende hacer.

La capacidad tanto para las cuentas de tipo residencial como las de tipo corporativo se va a tomar en base a los planes que se tiene en la parte continental por parte de la empresa CNT EP, ya que es la mayor proveedora de servicios de Internet tanto en la parte insular como en la continental. En los planes que tiene CNT EP para la parte residencial con fibra óptica se considera una compartición 2:1, y hay planes desde 4 Mbps hasta 100 Mbps, los abonados en promedio contratan planes de 10 Mbps.

Para la parte corporativa se ofrecen planes con compartición 2:1 y planes sin compartición (denominados compartición 1:1), en este diseño se van a considerar planes sin compartición para este sector [41]; los planes que oferta CNT EP van desde 512 Kbps hasta  $n$  Mbps, esto está de acuerdo a la necesidad de cada empresa, sin embargo, las empresas o compañías debido al tipo de ubicación geográfica (zona turística) lo que más demanda son aplicaciones que utilizan Internet tales como: videoconferencias, accesos a plataformas de video, redes sociales, entre otras; además se debe considerar que, en una compañía trabajan cientos de usuarios (si se habla de una empresa mediana va de 51 a 200 empleados) a los que se debe brindar acceso a Internet. Por lo tanto, se va a tomar un valor medio de los planes que oferta CNT EP de 35 Mbps por cada empresa [41].

En la demanda de Internet móvil, se debe considerar que la aplicación crítica que consume más capacidad de canal es el *streaming* de video, por lo cual se toma como referente esta aplicación para calcular la demanda de Internet, el móvil mismo limita a una aplicación a la vez, a pesar de que algunas estén en segundo plano, pero la capacidad que requieren es insignificante frente al *streaming* de video, si se considera un esquema de compresión de video H 264-10 (14KB por cuadro), en una resolución 1280x720 (HD), se estima que se tiene 25 cuadros (imágenes) por segundo para garantizar la experiencia de video [42], por lo que se obtiene lo siguiente:

$$V = \frac{14KB}{cuadro} \times \frac{25cuadros}{segundo} \times \frac{1024bytes}{1KB} \times \frac{8bits}{1byte} = 2.87Mbps$$

---

<sup>18</sup> Hora pico: Lapso de tiempo en el cual se presenta en promedio la máxima ocupación del sistema, va ligado al índice de simultaneidad.



La capacidad que se debe brindar para poder reproducir un video con buena calidad de imagen es por tanto 2.87 Mbps, este dato es considerado como la demanda que se genera por cada usuario en el uso de Internet móvil.

Los datos que se muestran en la Tabla 2.4, son calculados en base a la hora pico individual de cada tipo de usuario, debido a que los usuarios de una cuenta residencial fija cuando se encuentran en sus hogares, en otro instante del día van a estar conectados a una cuenta corporativa (durante su jornada de trabajo) o a la red de datos móviles (mientras se movilizan). Los valores de los índices de simultaneidad son tomados en base a datos que se tiene como referencia por parte de los ingenieros de CNT EP en la parte continental (para los usuarios residenciales 70%, para los usuarios corporativos 40% y para los usuarios de servicio móvil 21%). A continuación, se tienen los cálculos necesarios para las estimaciones:

- Cálculo de la capacidad para servicio residencial (compartición 2:1)

$$Capacidad_{total} = \frac{\# \text{ cuentas al año} \cdot \text{capacidad por cuenta}}{2} \quad (2.13)$$

$$Capacidad_{total} = \frac{7040 \cdot 10 \text{ Mbps}}{2}$$

$$Capacidad_{total} = 35.2 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = \% \text{ índice de simultaneidad} \cdot Capacidad_{total} \quad (2.14)$$

$$Capacidad_{real} = 0.7 \cdot 35.2 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = 24.64 \text{ Gbps}$$

- Cálculo de la capacidad para servicio corporativo (compartición 1:1)

$$Capacidad_{total} = \# \text{ cuentas al año} \cdot \text{capacidad por cuenta} \quad (2.15)$$

$$Capacidad_{total} = 966 \cdot 35 \text{ Mbps}$$

$$Capacidad_{total} = 33.81 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = \% \text{ índice de simultaneidad} \cdot Capacidad_{total}$$

$$Capacidad_{real} = 0.4 \cdot 33.81 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = 13.52 \text{ Gbps}$$

- Cálculo de la capacidad para servicio móvil (compartición 1:1)

$$Capacidad_{total} = \# \text{ cuentas al año} \cdot \text{demanda por usuario} \quad (2.16)$$

$$Capacidad_{total} = 12673 \cdot 2.87 \text{ Mbps}$$

$$Capacidad_{total} = 36.37 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = \% \text{índice de simultaneidad} \cdot Capacidad_{total}$$

$$Capacidad_{real} = 0.21 \cdot 36.37 \text{ Gbps}$$

$$Capacidad_{real} = 7.63 \text{ Gbps}$$

**Tabla 2.4.** Cálculo de la capacidad año 2024

| Tipo de cuenta                          | Número de cuentas al año | Capacidad por cuenta (Mbps) | Capacidad total (Gbps) | Índice de (%) simultaneidad | Capacidad real (Gbps) |
|---|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Cuentas residenciales fijas de Internet | 7040                     | 10                          | 35.2                   | 70                          | 24.64                 |
| Cuentas corporativas fijas de Internet  | 966                      | 35                          | 33.81                  | 40                          | 13.52                 |
| Internet móvil                          | 12673                    | 2.87                        | 36.37                  | 21                          | 7.63                  |

Como se puede observar en los datos de la tabla anterior, el tipo de cuenta que más demanda capacidad son las cuentas residenciales fijas con una capacidad total de 24.64 Gbps. La demanda que generan las cuentas corporativas es 13.52 Gbps, este valor es cuando la red se encuentra en hora pico, sin embargo, para el cálculo de la demanda se considerará asignar una capacidad fija de 4 Mbps (dato otorgado por parte de los ingenieros de administración de red de CNT EP) a cada una de las compañías para sus aplicaciones en segundo plano y/o posibles redes que demanden disponibilidad 24/7, por lo que se debe considerar una capacidad extra de 3.86 Gbps. Por otro lado, se debe considerar la demanda de Internet móvil, con un 15% de la capacidad de la hora pico, lo que representa 1.14 Gbps, debido a que pueden existir algunos usuarios que no estén conectados a través de los otros tipos de redes. Sumando dichos valores se tendría una capacidad total de 29.64 Gbps, aproximando este valor da un total de 30 Gbps.

Por último, se dimensionó la capacidad del sistema hasta el año 2024, sin embargo, el uso de Internet tiende a ser creciente, por lo que se debe considerar un porcentaje de escalabilidad, típicamente en todo diseño es del 20% [43]. Tomando en cuenta lo dicho, la capacidad final del cable submarino requerida es 36 Gbps.

## 2.2. RUTA PARA EL TENDIDO DEL CABLE SUBMARINO

En la presente investigación no se hace el estudio de batimetría, debido a que por falta de recursos económicos y limitaciones de infraestructura de equipos, no se puede realizar. Sin embargo, para suplir este problema es necesario hacer uso de: cartas náuticas<sup>19</sup>, Google Maps y Google Earth; las primeras son proporcionada por el Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), éstas permiten observar la profundidad del lecho marino comprendido entre los dos puntos de interés; y las dos últimas son herramientas web, que permiten obtener con mayor facilidad las coordenadas por donde pasará el cable submarino, medir distancias, observar imágenes satelitales de la geografía del lugar, entre otros datos.

El enlace del cable submarino propuesto tiene como puntos en tierra a la estación terrena de Ecuador continental que se va a ubicar en Punta Carnero en la provincia de Santa Elena y la estación terrena insular en Puerto Baquerizo Moreno, capital de la provincia de Galápagos.

En primer lugar, se debe elegir los puntos donde va a llegar el cable submarino en las costas tanto de la parte insular como de la continental. Como se ha mencionado Galápagos es una zona de vulnerabilidad ecológica, donde no se puede edificar o ampliar una construcción sin un estudio ambiental previo y aprobado, por lo que, la estación terrera no puede ser colocada en un lugar donde genere algún tipo de impacto ambiental, debe ser ubicada en una zona urbana libre de flujo turístico (acceso restringido y/o propiedad privada), cercana a la mayoría de edificios del poblado en especial a los centros o nodos dedicados a servicios de telecomunicaciones, que cuente con carreteras establecidas para el ingreso vehicular, y que tenga los servicios básicos necesarios.

Con la ayuda de la herramienta web Google Maps se puede sondear el lugar donde puede ser instalada la estación; al noroeste de las instalaciones de la Segunda Zona Naval de la Armada se encuentra un terreno apropiado para ubicar la estación, el punto del anclaje del cable submarino sería colocado en un terreno de propiedad privada del aeropuerto situado en la Avenida de la Armada Nacional, para luego ser llevado por cable terrestre hasta la estación, según las imágenes que se pueden observar en la Figura 2.5 a). En tanto que, en la parte continental del Ecuador debe ser ubicada en una zona lo suficientemente cercana a la orilla para el anclaje del cable, pero a su vez lo

---

<sup>19</sup> Carta náutica: Es una representación gráfica (o un mapa) que contiene las características de relieve del fondo de los océanos, así como también indica como el tipo de suelo, la profundidad, entre otros.

suficientemente alejada para que los equipos no sufran algún riesgo de inundación en casos de crecimiento del nivel del mar, por cual se ha seleccionado un terreno localizado al sureste de la playa Mar Bravo para ubicar la estación y su punto de anclaje en un terreno que de igual manera que en el caso del punto de anclaje en Galápagos (ver Figura 2.5 b)), debe ser de propiedad privada para tener un mejor control de la seguridad del cable y desde allí ser llevado hacia la estación terrena.

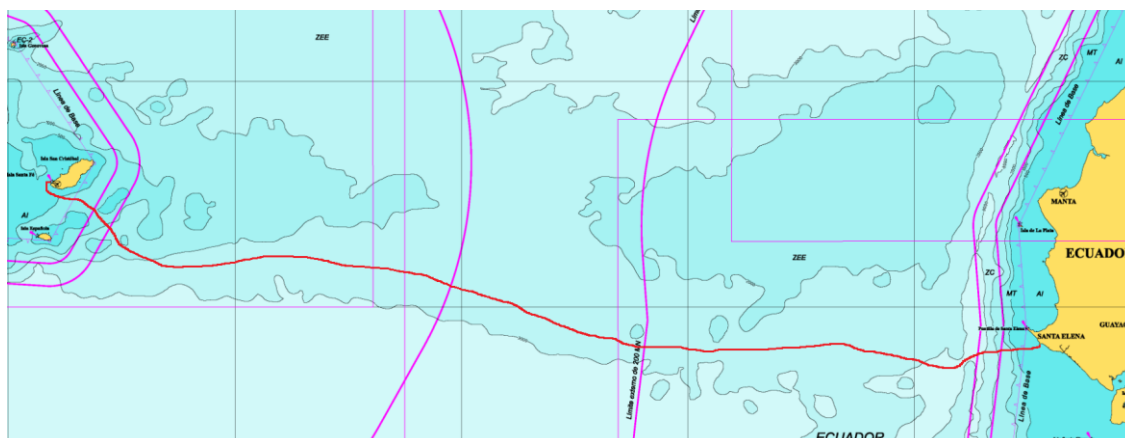
Los puntos de anclaje servirán para recibir el cable submarino, pasar las fibras y el conductor eléctrico contenidos en él hacia un cable de menor blindaje (cable terrestre), en una cámara subterránea colocada cerca de la orilla (mayor detalle, revisar la sección 2.3.4.5).

La ubicación de los puntos mencionados en el párrafo anterior se puede ver en la Figura 2.5, las imágenes fueron tomadas de Google Maps y Google Earth, en base a estas herramientas web se pudo localizar tales puntos, ya que las visitas a la zona no se las puede realizar físicamente.



**Figura 2.5.** Puntos para las estaciones terrenas y puntos de anclaje, a) Puerto Baquerizo Moreno – Isla de San Cristóbal, b) Punta Carnero – Santa Elena

Una vez localizados los puntos terrestres se procede a realizar la elección de la ruta por donde pasará el cable, y para ello se hará uso de la carta náutica I.O.A. 4 (la carta completa se encuentra en el ANEXO D [44]). En la Figura 2.6 se puede apreciar la región de interés, donde es posible identificar las diferentes zonas con sus respectivas profundidades, y así decidir cuál es la mejor ruta para el cable submarino. Para el caso la ruta trazada en rojo se consideró que, el lugar donde se tendría que asentar el cable debe ser lo más plano posible en la mayoría del trayecto submarino, y esto se consigue a los 3000 metros de profundidad. Nótese que éste es un bosquejo borrador, en base a lo que se puede observar en la carta náutica.



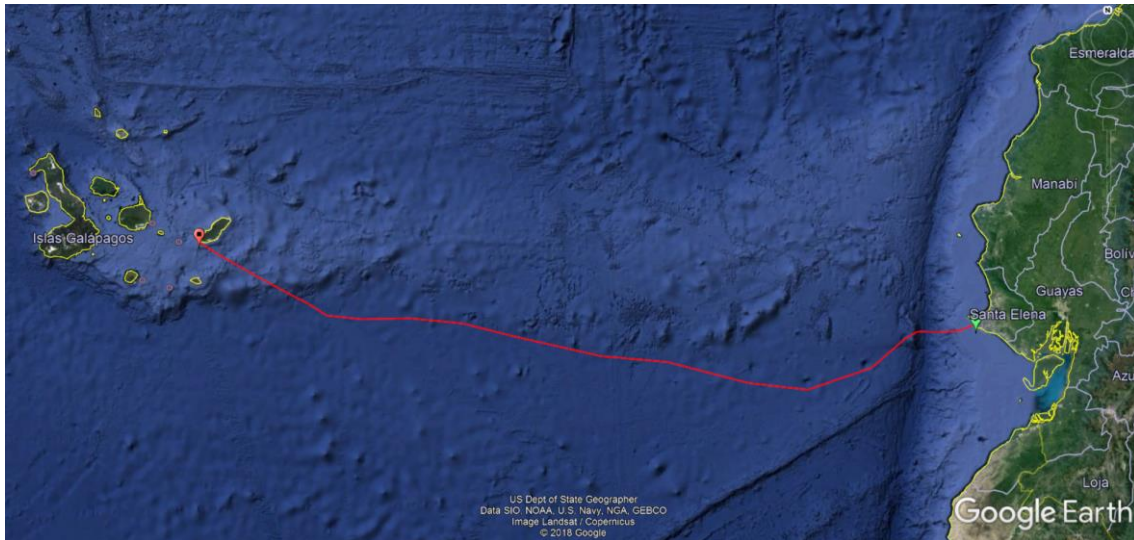
**Figura 2.6.** Tramo Isla San Cristóbal – Punta Carnero

Con la ayuda de Google Earth, se logró determinar las coordenadas por donde iría el cable, en base al bosquejo previo que se hizo en la carta náutica. Por otro lado, esta herramienta permite también medir la profundidad y la altura en cada punto, de esta manera se garantiza que las coordenadas que se tomaron están a la altura promedio de los 3000 m de profundidad estimados. En la Tabla 2.5 se puede observar los datos que fueron tomados del programa y en la Figura 2.7 se encuentra el bosquejo definitivo de cómo quedaría el cable (línea roja). Cabe mencionar que los datos que se muestran a continuación comprenden todo el tramo desde las estaciones terrenas de ambos extremos (cable submarino y cable terrestre).

**Tabla 2.5.** Datos obtenidos de Google Earth sobre la ruta del cable

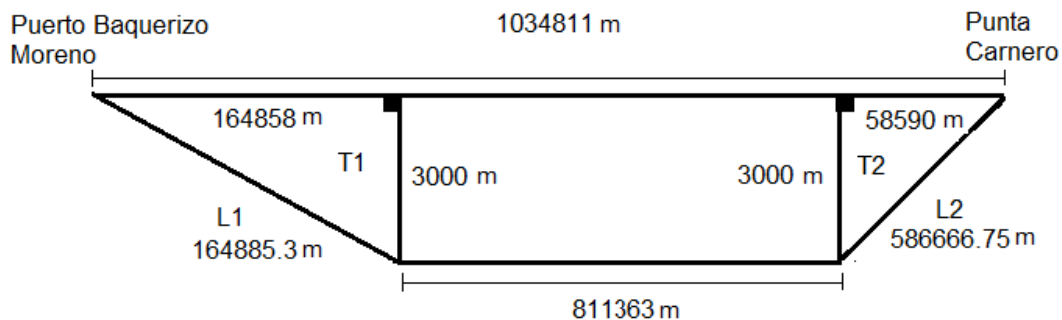
| Número de coordenada                          | Profundidad (m) | Latitud     | Longitud     |
|---|-----------------|-------------|--------------|
| 1 (Estación terrena, Puerto Baquerizo Moreno) | 6               | 0°54'5.60"S | 89°37'3.50"O |
| 2   | 6               | 0°54'4.43"S | 89°37'6.44"O |

| Número de coordenada                             | Profundidad (m) | Latitud      | Longitud      |
|--|-----------------|--------------|---------------|
| 3 (Punto de anclaje, Puerto Baquerizo Moreno)    | 5               | 0°54'3.23"S  | 89°37'7.49"O  |
| 4  | 2               | 0°54'1.45"S  | 89°37'7.37"O  |
| 5  | 2               | 0°54'0"S     | 89°37'7.88"O  |
| 6  | 1               | 0°53'58.07"S | 89°37'10.91"O |
| 7  | 0               | 0°53'57.92"S | 89°37'17.42"O |
| 8  | 0               | 0°54'2.32"S  | 89°37'25.16"O |
| 9  | 0               | 0°54'11.37"S | 89°37'36.68"O |
| 10   | 0               | 0°54'33.87"S | 89°37'51.37"O |
| 11   | 0               | 0°55'4.71"S  | 89°37'56.53"O |
| 12   | -2              | 0°55'40.34"S | 89°37'38.36"O |
| 13   | -69             | 0°58'25.24"S | 89°33'26.6"O  |
| 14   | -667            | 1°2'53.64"S  | 89°28'11.83"O |
| 15   | -658            | 1°10'15.33"S | 89°16'51.83"O |
| 16   | -1080           | 1°17'52.98"S | 89°4'45.42"O  |
| 17   | -1785           | 1°31'28.15"S | 88°42'0.52"O  |
| 18 (Punto inicial de la base menor del trapecio) | -2808           | 1°41'46.94"S | 88°24'11.14"O |
| 19   | -3000           | 1°50'10.53"S | 88°12'9.10"O  |
| 20   | -3000           | 1°53'49.55"S | 87°48'2.25"O  |
| 21   | -3003           | 1°54'37.56"S | 87°16'31.72"O |
| 22   | -3001           | 1°59'45.48"S | 86°41'7.41"O  |
| 23   | -3012           | 2°11'9.93"S  | 86°2'53.12"O  |
| 24   | -3027           | 2°25'38.98"S | 85°10'37.95"O |
| 25   | -3017           | 2°31'53.16"S | 84°25'52.63"O |
| 26   | -3013           | 2°55'9.04"S  | 82°52'44.05"O |
| 27   | -3006           | 2°42'34.53"S | 82°8'17.13"O  |
| 28   | -2980           | 2°23'43.20"S | 81°43'57.83"O |
| 29   | -2972           | 2°19'48.98"S | 81°35'57.96"O |
| 30 (Punto final de la base menor del trapecio)   | -3453           | 2°20'26.42"S | 81°26'7.57"O  |
| 31   | -1108           | 2°21'5.80"S  | 81°13'32.20"O |
| 32   | -258            | 2°20'53.75"S | 81°9'5.81"O   |
| 33   | -81             | 2°20'1.28"S  | 81°4'24.32"O  |
| 34   | -30             | 2°18'4.50"S  | 80°58'41.16"O |
| 35   | -1              | 2°16'50.60"S | 80°55'47.97"O |
| 36 (Punto de anclaje, Punta Carnero)             | 7               | 2°16'25.91"S | 80°55'18.98"O |
| 37   | 4               | 2°16'4.54"S  | 80°55'16.10"O |
| 38   | 4               | 2°16'24.48"S | 80°55'16.04"O |
| 39 (Estación terrena, Punta Carnero)             | 4               | 2°16'23.30"S | 80°55'15.10"O |



**Figura 2.7** Bosquejo definitivo donde se asentará el cable submarino

Para el cálculo de la longitud del cable es necesario considerar la distancia total que va a recorrer tomando en cuenta la profundidad a la que va a estar sometido, para ello la metodología que se va a emplear es el cálculo geométrico de la figura de un trapecio invertido (por facilidad de cálculo) sumado a un margen de seguridad, porque como se conoce en el lecho marino hay algunas partes donde el terreno es irregular. De esta manera, se considera que la base menor está comprendida entre las coordenadas pertenecientes a los números 18 y 30 de la Tabla 2.5, ya que en todo este trayecto la profundidad del lecho marino está alrededor de los 3000 m, la distancia medida entre estos puntos con *Google Earth* es 811363 m, la base mayor sería la distancia comprendida entre las orillas de ambas costas y su valor es 1034811 m. Se asume dos triángulos rectángulos T1 y T2 para el cálculo de los lados del trapecio denominados L1 y L2, cuyos valores determinados son 164885.3 m y 586666.75 m respectivamente. Lo mencionado se ilustra en la Figura 2.8. Los valores de las longitudes de los lados de los triángulos fueron obtenidos mediante el medidor de distancias de *Google Earth*.

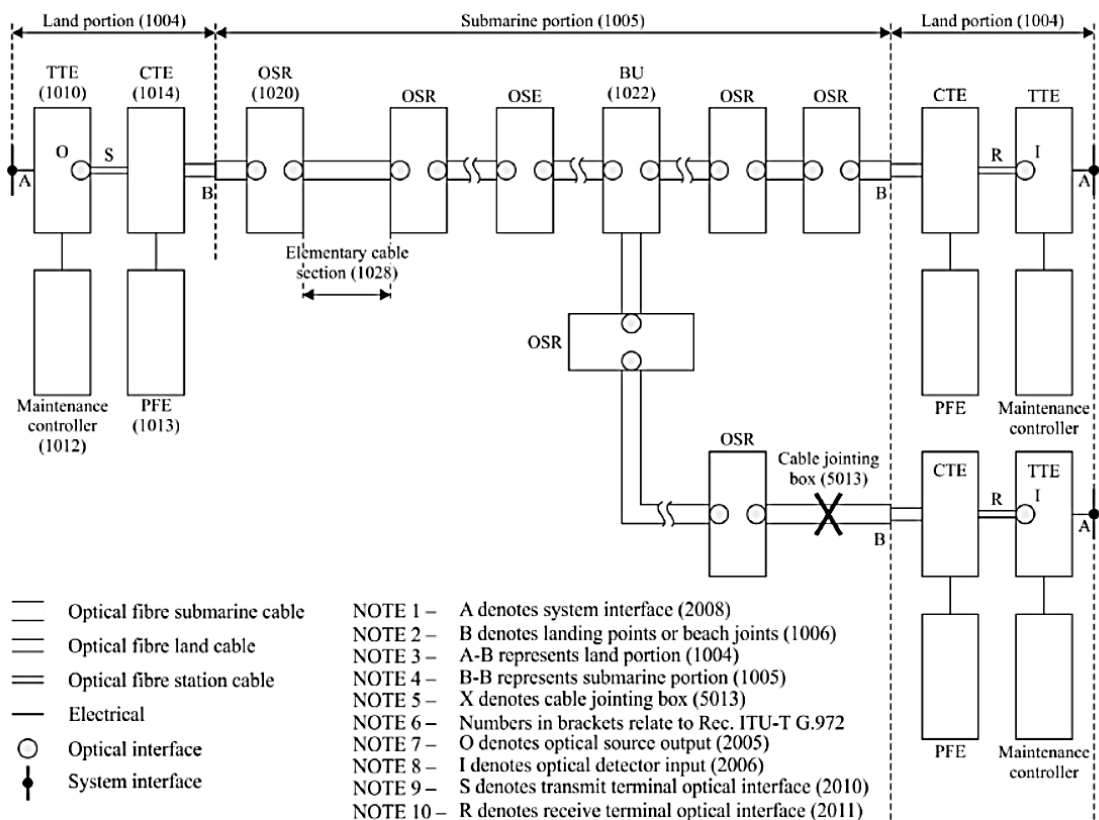


**Figura 2.8.** Forma Geométrica comprendida entre Puerto Baquerizo Moreno y Punta Carnero

En consecuencia, la distancia total que se obtiene es 1034915.05 m, como se mencionó a este valor se le debe agregar un porcentaje de reserva del 10% (valor tomado arbitrariamente debido a la falta de información puesto que no se realiza un estudio batimétrico para tener una mejor precisión) debido a los desniveles existentes en el lecho marino y las futuras reparaciones que pueden implicar daños en un punto o en un tramo del cable; por lo tanto la longitud final del cable es 1138406.55 m (1138.406 km).

### 2.3. SISTEMA DE CABLE SUBMARINO

El sistema de cable submarino como tal comprende dos partes, la planta seca y la planta húmeda. La planta seca o tramo terrestre es la parte del sistema que comprende el tramo entre el extremo del cable submarino y la interfaz de comunicación en la estación terrena, junto con todos los equipos que se encuentran en ella; y la planta húmeda o tramo submarino es la parte que comprende toda la porción del cable que es tendida sobre el fondo marino. En la Figura 2.9, se puede observar el esquema general de los componentes que integran el sistema, que se listan a continuación [45]:



**Figura 2.9.** Ejemplo de sistema de cable submarino con repetidores [45]

- Equipo de transmisión terminal (*Terminal Transmission Equipment, TTE*): Es el equipo del tramo terrestre encargado de las operaciones de multiplexación



demultiplexación del terminal de transmisión, codificación y conversión de los flujos de entrada en señal óptica, conversión y decodificación de la señal óptica recibida en flujos de salida, asegurar la conmutación de protección submarina, la supervisión de la planta submarina y realizar la terminación del cable óptico.

- Repetidor óptico submarino (*Optical Submarine Repeater*, OSR): Esencialmente es un equipo que incluye uno o más regeneradores, amplificadores y equipos asociados en el tramo submarino [46].
- Ecuilizador óptico submarino (*Optical Submarine Equalizer*, OSE): Es un equipo que ayuda a compensar las distorsiones generadas en el canal de comunicaciones, a lo largo de la sección línea digital submarina (*Submarine Digital Line Section*, SDLS), a fin de ser compatible con la capacidad del TTE en el lado del transmisor. Básicamente, un ecualizador balancea el grado de amplificación de las señales a diferentes longitudes de onda (es un tipo de filtro, cuando el amplificador no amplifica equitativamente todas las longitudes de onda, debido a que la ganancia varía con la longitud de onda) [3], dicho de otra manera, ayuda a mitigar la falta de homogeneidad de la ganancia acumulada cuando la capacidad del TTE en el lado del transmisor, no es suficiente para garantizar los requisitos de rendimiento para todos los canales WDM [45].
- Unidad de ramificación (*Branching Unit*, BU): Es la pieza del sistema submarino necesaria para la interconexión óptica y eléctrica de 3 tramos de cable, en el caso del presente trabajo, no se utilizará este componente puesto que, se trata de un enlace punto a punto de cable submarino, mas no de una red de cable submarino<sup>20</sup>.
- Equipo de alimentación eléctrica (*Power Feeding Equipment*, PFE): Este equipo proporciona una corriente eléctrica constante estable para alimentar a los OSRs y/o BUs submarinos a través de un conductor de potencia contenido en el cable submarino de fibra óptica.
- Equipos de terminación del cable (*Cable Terminating Equipment*, CTE): Es el equipo que brinda la interfaz entre la fibra óptica del TTE y el cable de fibra óptica, y la interfaz entre la línea de alimentación del PFE y el conductor de

---

<sup>20</sup> Un enlace de cable submarino se da cuando sólo dos estaciones terminales se conectan por medio del cable, si se conectan más de dos estaciones se denomina una red de cable submarino donde es necesario el uso de BUs. [45]

alimentación del cable de fibra óptica. Generalmente, el CTE es parte del PFE [46].

- Controlador de mantenimiento: Básicamente es una computadora con una interfaz para el equipo de supervisión y mantenimiento remoto, que realiza dichas actividades.

En las siguientes secciones se tratará con mayor detenimiento cada una de las partes y/p equipos que componen el sistema de cable submarino.

### 2.3.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los datos que permiten tomar una decisión sobre el tipo de tecnología WDM que se necesita son la capacidad del sistema que es 36 Gbps y la longitud del enlace que supera los 1000 km de distancia, por lo cual, la tecnología que mejor se acomoda a estos requerimientos es DWDM, CWDM a pesar de que soportaría la demanda de capacidad calculada, no permite cubrir esas distancias de acuerdo a lo señalado en la Tabla 1.7.

La banda de operación que se escoge para el diseño es la banda C, es la más apropiada puesto que, la fibra óptica tiene la menor cantidad de pérdidas (pérdidas por absorción y *scattering* de Rayleigh) y una dispersión cromática baja, lo cual favorece al enlace cuya característica es *long haul*, es una banda donde trabajan muy bien los amplificadores EDFA y Raman; y, además la mayoría de equipos comerciales para cable submarino funcionan en banda C.

Este es un enlace punto a punto, por lo que no requiere BUs. Básicamente el sistema consta de un equipo terminal, la interfaz donde llegará el cable submarino, un equipo de suministración de energía, una unidad de mantenimiento y control, y repetidores. En el esquema de la Figura 2.9 se observa un bloque correspondiente al ecualizador, para este sistema no es necesario, ya que, este elemento se requiere bajo ciertas condiciones que serán mejor explicadas en los siguientes párrafos.

Con la Ecuación 2.17 se puede obtener la cantidad de longitudes de onda requeridas, de acuerdo a la velocidad de los flujos que los equipos admitan; y con la Ecuación 2.18, asumiendo que se utilicen espaciamientos de 0.8 nm (valor tomado de la Tabla 1.7) se puede calcular el espectro utilizado, tomando en consideración que la banda que se escogió para el diseño es la banda C (1530 nm a 1565 nm).

$$\# \text{ de longitudes de onda} = \frac{\text{Capacidad total calculada}}{\text{Capacidad por longitud de onda}} \quad (2.17)$$

$$\text{cantidad de espectro utilizado} = \# \text{ longitudes de onda} \cdot \text{espaciamiento} \quad (2.18)$$

Para el caso que se utilicen longitudes de onda con una tasa de transmisión de 10 Gbps, se tiene lo siguiente:

$$\# \text{ de longitudes de onda} = \frac{36 \text{ Gbps}}{10 \text{ Gbps}}$$

$$\# \text{ de longitudes de onda} = 3.6 \approx 4$$

$$\text{cantidad de espectro utilizado} = 4 \cdot 0.8 \text{ nm}$$

$$\text{cantidad de espectro utilizado} = 3.2 \text{ nm}$$

Si se utilizan flujos STM-16 (2.5 Gbps), el cálculo del número de longitudes de onda queda de esta forma:

$$\# \text{ de longitudes de onda} = \frac{36 \text{ Gbps}}{2.5 \text{ Gbps}}$$

$$\# \text{ de longitudes de onda} = 14.4 \approx 15$$

$$\text{cantidad de espectro utilizado} = 15 \cdot 0.8 \text{ nm}$$

$$\text{cantidad de espectro utilizado} = 12 \text{ nm}$$

En el primer caso únicamente con cuatro longitudes de onda de 10 Gbps; y, en el segundo caso con quince longitudes de onda de 2.5 Gbps se cubre la demanda, ambos casos con un espaciamiento lo suficientemente holgado (0.8 nm), la cantidad de espectro que utilizan (3.2 nm en el caso de 4 lambdas y 12 nm en el caso de 15 lambdas) no es representativa frente a todo el espacio que permite la banda C (35 nm).

Actualmente, con DWDM se pueden multiplexar 640 longitudes de onda y con Ultra DWDM hasta 1022 [3], sin embargo, en el diseño se contempla únicamente el uso de cuatro longitudes de onda de 10 Gbps cada una o quince longitudes de onda de 2.5 Gbps cada una, por lo cual no representa un problema toda vez que el espectro requerido en el peor de los casos sería 12 nm (dado que se puede tomar dicho espectro de la región donde sea más plana la respuesta del amplificador).

Por otra parte, se tiene que entre más baja sea la potencia de entrada al amplificador, se tiende a subir la ganancia del mismo pero su respuesta de frecuencia deja de ser plana, corriendo el riesgo de amplificar más unos canales ópticos que otros (en el ANEXO E se puede observar tal comportamiento).

De esta manera se debe garantizar que la potencia que llegue a la entrada del amplificador sea lo suficientemente grande para que no se presenten las no linealidades (falta de planeidad en la curva de respuesta de frecuencia del amplificador), y que sea

lo suficientemente pequeña para que no sature el equipo (variable de acuerdo a cada fabricante, ver *datasheet*). En consecuencia, no se corre el riesgo que exista alguna circunstancia que implique el uso de ecualizadores en el sistema. En el caso que la demanda siga creciendo, lo que se haría es aumentar el número de canales y verificar si es necesaria la implementación de la etapa de ecualización.

Además de lo anterior, considerando que con DWDM *long haul* se puede tener de 32 a 80 canales por fibra, cada uno con una capacidad de 10 Gbps, por lo cual para satisfacer la demanda sería necesario el uso de un par de fibras (dos hilos para transmisión unidireccional, por facilidad de diseño y debido a que los equipos que son para sistemas de cable submarino utilizan este tipo de implementación); sin embargo, para aprovechar de mejor manera la infraestructura del cable, el sistema estará compuesto por 2 pares de fibra (4 hilos); uno para la utilización del sistema y futuro crecimiento de la demanda de servicio, y el otro par que quedará como fibra oscura.

### 2.3.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE FIBRA ÓPTICA A UTILIZARSE

En un enlace de largas distancias, se debe utilizar fibra monomodo debido a sus características de largo alcance. La UIT-T define varios estándares donde se describe los tipos de fibra monomodo que existen, como se puede ver en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Normas para fibra óptica monomodo según la UIT

| Estándar UIT-T | Tipo de fibra   | $\lambda$ (nm) de operación  | Atenuación (dB/km) | Aplicaciones/ subcategorías  |
|----------------|---|--|--------------------|--|
| G.652 [47]     | Single-mode optical fibre                             | Regiones alrededor de 1310 y 1550<br>Bandas O, E, S y C  | 0.3 – 0.4          | 10GbE, STM-16, STM-64, STM-256 y CDWM / A, B, C y D  |
| G.653 [48]     | Dispersion-shifted, single-mode optical fibre         | 1550 (ideal), 1310 (con restricción) y rango de 1460 a 1625 (condición)<br>Bandas O, E, S, C y L | 0.35               | STM-64, STM-256, CWDM / A y B  |
| G.654 [49]     | Cut-off shifted single-mode optical fibre             | Región entre 1530 y 1625<br>Bandas C y L   | 0.2 – 0.23         | Sistemas de cable submarino que utilizan amplificadores, sistemas de líneas terrestres de largo alcance y altas tasas de transmisión, DWDM (a 1550nm) / A, B, C, D y E |
| G.655 [50]     | Non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre | Región entre 1460 a 1625<br>Bandas S, C y L  | 0.35 – 0.4         | CWDM, DWDM y STM-64 (200km) / A, B, C, D y E   |

| Estándar UIT-T | Tipo de fibra  | $\lambda$ (nm) de operación                               | Atenuación (dB/km) | Aplicaciones/ subcategorías   |
|----------------|--|---|--------------------|---|
| G.656 [51]     | Non-zero dispersion fibre for wideband optical transport | Región entre 1460 y 1625 Bandas S, C y L                  | 0.35 – 0.4         | Aplicaciones específicas de cable submarino, CWDM Y DWDM / no tiene subcategorías |
| G.657 [52]     | Bending-loss insensitive single-mode optical fibre       | Rango comprendido entre 1260 y 1625 Bandas O, E, S, C y L | 0.3 – 0.4          | Redes de acceso (cables interiores) / A1, A2, B2 y B3                             |

Según las características vistas en la Tabla 2.6 y en base a los requerimientos del presente trabajo, la mejor opción a elegir es la fibra monomodo de dispersión no nula para banda ancha (*Wideband Non Zero Dispersion Fibre*, WNZDF) basada en la norma G.656, debido a: su característica de transmisión en banda ancha, adecuada para sistemas DWDM pues por ser de dispersión desplazada no nula disminuye o evita la presencia de efectos no lineales indeseables en la fibra óptica como el FWM (*Four Wave Mixing*) que constituye un serio problema en dichos sistemas y por ser una de las fibras que más se utiliza en cables submarinos. Las características más sobresalientes de esta fibra son: la menor atenuación se tiene en la longitud de onda de 1550 nm (0.35 dB/km); para el intervalo de 1550 nm a 1625 nm, el rango de dispersión cromática mínimo viene dado por la Ecuación 2.19 [51], cuyos valores se calculan a continuación:

$$D_{min} = \frac{0.98}{75}(\lambda - 1550) + 3.6 \quad (2.19)$$

$$D_{min} = \frac{0.98}{75}(1550 - 1550) + 3.6$$

$$D_{min} = 3.6 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

$$D_{min} = \frac{0.98}{75}(1625 - 1550) + 3.6$$

$$D_{min} = 4.58 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

Por lo que, el rango mínimo de dispersión cromática se encuentra entre 3.6 ps/nm·km y 4.58 ps/nm·km. Para el rango de dispersión cromática máximo entre 1550 nm a 1625 nm, se emplea la Ecuación 2.20 [51], de la siguiente manera:

$$D_{max} = \frac{4.72}{75}(\lambda - 1550) + 9.28 \quad (2.20)$$

$$D_{max} = \frac{4.72}{75}(1550 - 1550) + 9.28$$

$$D_{max} = 9.28 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

$$D_{max} = \frac{4.72}{75}(1625 - 1550) + 9.28$$

$$D_{max} = 13.99 \frac{ps}{nm \cdot km}$$

Así, el rango del coeficiente de dispersión cromática está delimitado desde 9.28 ps/nm·km hasta 13.99 ps/nm·km; y el valor del coeficiente de la PMD es de 0.2 ps/km<sup>1/2</sup>. Si bien el valor de atenuación es considerable, con el uso de repetidores que incluyan una etapa de amplificación se puede solventar este inconveniente. Los atributos a detalle de esta fibra se pueden observar en el ANEXO F [51].

En base a los valores calculados del coeficiente de dispersión cromática para la fibra G. 656 se puede determinar el ancho de banda de la fibra, para verificar si cumple con los requisitos del sistema, toda vez que a las velocidades que operará el sistema esta es la dispersión que más limita el ancho de banda de la fibra. Para el efecto se hará uso de la Ecuación 2.21 [3], tanto para valores de dispersión mínima y máxima. En la Ecuación 2.22 se tiene la equivalencia de la dispersión cromática en términos del coeficiente de dispersión cromática, anchura espectral de la fuente y distancia del enlace.

$$AB = \frac{0.5}{\tau_c} \quad (2.21)$$

$$AB = \frac{0.5}{coeficiente \tau_c \cdot \Delta\lambda \cdot distancia \ del \ enlace} \quad (2.22)$$

Donde  $\Delta\lambda$  es la anchura espectral de la fuente, este dato no se encuentra disponible en los equipos de la sección 2.3.5, sin embargo, se tienen valores típicos para las fuentes, por ejemplo, un láser de buena calidad posee una anchura espectral de 0.01 nm, en tanto que un láser excelente tiene un valor de 0.0001 nm [3]. Por lo que se asume el valor de anchura espectral de un láser muy bueno que vendría a ser 0.001 nm.

Para la dispersión mínima en 1550 nm:

$$AB = \frac{0.5}{3.6 \frac{ps}{nm \cdot km} \cdot 0.001 \ nm \cdot 1138.406 \ km}$$

$$AB = 0.122 \ THz = 122 \ GHz$$

Para la dispersión mínima en 1625 nm:

$$AB = \frac{0.5}{4.58 \frac{ps}{nm \cdot km} \cdot 0.001 nm \cdot 1138.406 km}$$

$$AB = 0.09589 THz = 95.89 GHz$$

Si se consideran valores de dispersión mínima, el sistema cumple satisfactoriamente con la capacidad demandada. Incluso si se introducen etapas de compensación de dispersión en los equipos finales y/o intermedios, el ancho de banda puede llegar a ser mucho más amplio, en teoría infinito.

Para la dispersión máxima en 1550 nm:

$$AB = \frac{0.5}{9.28 \frac{ps}{nm \cdot km} \cdot 0.001 nm \cdot 1138.406 km}$$

$$AB = 0.04733 THz = 47.33 GHz$$

Para la dispersión máxima en 1625 nm:

$$AB = \frac{0.5}{13.99 \frac{ps}{nm \cdot km} \cdot 0.001 nm \cdot 1138.406 km}$$

$$AB = 0.03139 THz = 31.39 GHz$$

Para la dispersión máxima, se presenta un problema en 1625 nm, en el caso de considerar la dispersión máxima ya no cumple con la capacidad demandada, por lo que es necesario colocar una o varias etapas de compensación de dispersión en equipos finales y/o intermedios, para que no se vea afectado el rendimiento del sistema.

### 2.3.3. SELECCIÓN DEL TIPO DE CABLE SUBMARINO

Para la elección del cable submarino se debe tomar en cuenta la distancia del tramo, la profundidad del lecho marino, el uso de repetidores, el tipo de blindaje que requiere, entre otros factores. De acuerdo a la norma G.978, se tienen dos clasificaciones: en base a la aplicación, que puede ser cable submarino con repetidores o cable submarino sin repetidores; y en base a la protección del cable, donde se tiene 5 sub-clasificaciones como se indica en la Tabla 2.7.

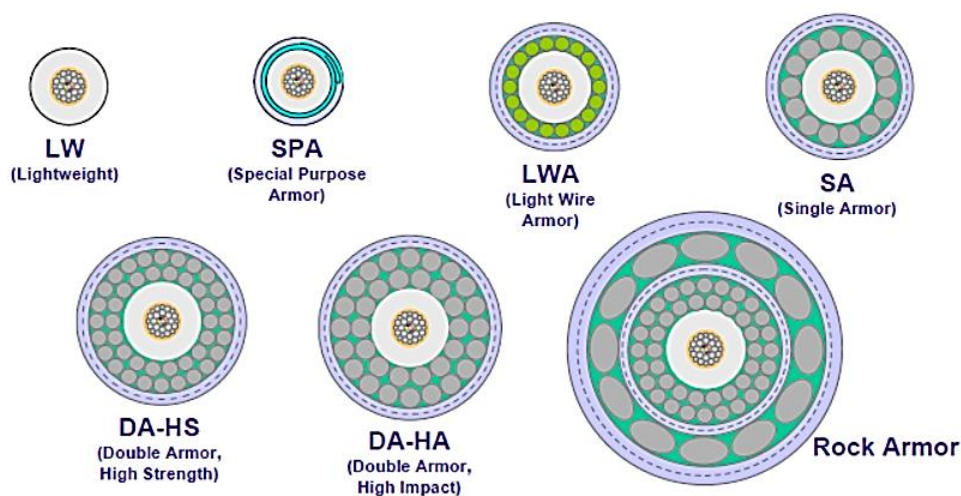
**Tabla 2.7.** Tipos de protección de los cables submarinos según la norma G.978 [53]

| Tipo de protección del cable   | Características   | Profundidad (m) |
|--|---|-----------------|
| Cable de peso ligero ( <i>Lightweight cable</i> , LW)                      | Tramos donde no se requiere un tipo de protección especial. | Mayor a 1000    |
| Cable de peso ligero protegido ( <i>Lightweight protected cable</i> , LWP) | Tramos donde se requiere protección especial.               | Mayor a 1000    |

| Tipo de protección del cable                                   | Características   | Profundidad (m)     |
|--|---|---------------------|
| Cable con blindaje simple ( <i>Single Armoured cable, SA</i> ) | Son cables adecuadamente protegidos para tenderlos y/o enterrarlos, recuperarlos y manipularlos en zonas específicas en aguas poco profundas. | Desde 20 hasta 1500 |
| Cable con blindaje doble ( <i>Double Armoured cable, DA</i> )  |   | 0 a 20              |
| Cable con blindaje de roca ( <i>Rock Armoured cable, RA</i> )  |   | 0 a 20              |

El cable submarino que se va a emplear para este diseño consta de repetidores debido a la distancia que tiene, por lo que debe permitir la alimentación de energía de los repetidores; según la norma G.978 debe incluir un conductor de potencia con una baja resistencia lineal, y un aislante con capacidad de aislamiento de alta tensión.

En cuanto a la protección del cable submarino, ésta debe ser mixta, no se puede emplear un solo tipo de protección en todo el tramo, por lo que se debe tomar en cuenta los datos expuestos en la Tabla 2.7. Conforme como va avanzando el cable en distancia, también lo hace en profundidad, por lo que es necesario hacer el cambio de protección (tipo de blindaje), de tal forma que, para las zonas cercanas a la orilla tanto en la parte insular como en la continental se debería usar un cable DA, si es que hubiese alguna zona rocosa es necesario el uso del cable RA (en especial en la Isla San Cristóbal por su geografía), en las zonas de profundidad media el cable SA y en el resto del lecho marino es conveniente utilizar el cable LW o LWP. En la Tabla 2.8 se puede observar un resumen del tipo de cable que se selecciona para cada tramo, con sus respectivas justificaciones, coordenadas de los puntos considerados para el cambio de protección y distancias.



**Figura 2.10.** Tipos de blindaje en cable submarino [54]



**Tabla 2.8.** Resumen sobre blindajes recomendados para el cable submarino por tramos (longitudes tomadas con el medidor de distancias de Google Earth)

| Punto Inicial   | Punto Final                   | Distancia (m)<br>/ +10% (m) | Tipo de cable | Descripción   |
|---|-------------------------------|-----------------------------|---------------|---|
| 0°54'3.23"S<br>89°37'7.49"O   | 0°57'29.24"S<br>89°35'14.12"O | 9918.28 /<br>10910.11       | RA / DA       | Desde el punto de anclaje en Galápagos hasta el punto a 20 m de profundidad   |
| 0°57'29.24" S<br>89°35'14.12"O  | 1°28'34.80"S<br>88°46'47.05"O | 105022.34 /<br>115524.57    | SA            | Tramo comprendido entre 20 m a 1500 m de profundidad en la parte insular  |
| 1°28'34.80" S<br>88°46'47.05" O   | 2°21'1.90"S<br>81°17'1.60"O   | 878248.35 /<br>966073.18    | LW / LWP      | De 1500 m de profundidad de la zona insular, pasando por el tramo de la base menor hasta llegar a los 1500 m de profundidad de la parte continental |
| 2°21'1.90" S<br>81°17'1.60" O   | 2°17'26.40"S<br>80°57'9 O     | 37869.5 /<br>41656.45       | SA            | Parte continental, desde el punto de 1500 m a 20 m de profundidad   |
| 2°17'26.40" S<br>80°57'9 O  | 2°16'25.91"S<br>80°55'18.98"O | 3856.58 /<br>4242.24        | DA            | Tramo final, hasta el punto de anclaje en Punta Carnero   |
| Longitud total (incluido el 10% de reserva): 1138406.55 m (1138.406 km) |                               |                             |               |   |

Por lo tanto, la longitud final del cable es 1138.406 km como se mencionó en la sección 2.2, repartida en 5 tramos a diferentes profundidades como se puede apreciar en la Tabla 2.8. La reserva proporcionada en cada tramo se debe ir colocando equitativamente en el lecho marino, acomodando de tal forma que el cable no quede enrollado o doblado en un solo sitio. El tipo de fibra en cualquier tramo debe ser el mismo, lo único que va a variar es el tipo de blindaje del cable submarino. En la Figura 2.10 se puede observar la estructura interna de las diferentes clases de protecciones para cada tipo de cable y sus variantes.

#### 2.3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Una vez escogida la banda de operación, la forma de comunicación (dirección en la que viaja el tráfico), número de pares de fibra, y los datos que se tienen respecto a la demanda de capacidad del sistema, se procede a la elección de los equipos que se requieren en el sistema de cable submarino de este trabajo.

La estación terminal o estación terrena es la zona donde se encuentran todos los equipos necesarios para garantizar la comunicación extremo a extremo, se encarga

también de proveer la interfaz con las redes domésticas, es decir, es la zona donde llegan los clientes, proveedores de servicios, entre otros. Forma parte de la planta seca.

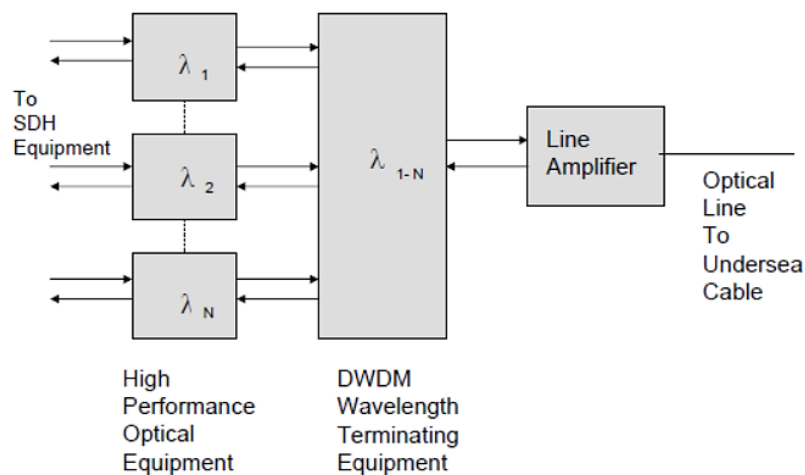
La inversión monetaria depende del tipo de sistema que se va a realizar, por un lado, se encuentran las estaciones más pequeñas cuyo costo está alrededor de cinco millones de dólares y por el otro lado están las más grandes cuyos costos oscilan entre diez y quince millones de dólares [54].

Por otra parte, se encuentran los componentes y/o equipos que pertenecen a la planta húmeda del sistema, para el caso de este proyecto únicamente son el cable (clasificación en base al tipo de protección, ver sección 2.3.3) y los repetidores.

A continuación, se describen cada uno de los equipos que conforman el sistema.

### 2.3.4.1. Equipo Terminal de Línea Submarina (Submarine Line Terminal Equipment, SLTE)

Actúa como el TTE del sistema de cable submarino, es el equipo de la planta seca encargado de brindar la transmisión de señales ópticas multiplexadas de alta calidad sobre distancias transoceánicas, además es el punto donde llegan las comunicaciones provenientes de los distintos clientes en tierra (interfaces hacia tierra) y por otro lado es el punto inicial que se va a unir por medio de otros equipos a la planta húmeda (interfaz hacia la planta húmeda). Un SLTE consta principalmente de tres componentes como se puede observar en la Figura 2.11, y que se describen a continuación.



**Figura 2.11.** Diagrama de estructura interna del SLTE [54]

- Equipo Óptico de Alto Rendimiento (*High Performance Optical Equipment*, HPOE) cuyas características son: provee la transmisión en ambos sentidos para lo cual se vale de un transmisor y receptor de línea, para la corrección de errores

utiliza Forward Error Correction (FEC), contiene un láser sintonizable de longitud de onda ajustable por encima de los límites de longitud de onda que soportan los equipos intermedios (en este caso los repetidores) para proveer longitudes de onda como portadoras ópticas apropiadas para cada canal y posee un amplificador para proporcionar energía óptica mayor en la transmisión de señales. Además, el HPOE posibilita espacios entre repetidores más grandes debido a su etapa de amplificación.

- Equipo Terminal de Longitud de onda (*Wavelength Terminating Equipment, WTE*), es el encargado de realizar las tareas de multiplexación, demultiplexación y compensación de la dispersión en cada canal, entre las funciones más importantes se tienen: filtración del canal de transmisión para mejorar la relación señal a ruido en la parte de transmisión e impedir que se envíe una longitud de onda incorrecta, contiene combinadores y divisores de longitud de onda para la unión y separación de señales ópticas, respectivamente; y posee fibras especiales (*Dispersion Compensating Fiber, DCF*) para la compensación de la dispersión para cada canal según se requiera.
- Amplificador de Línea Terminal (*Terminal Line Amplifier, TLA*) utilizado tanto en la parte de transmisión como de recepción para el ajuste y compensación de los niveles de la señal debido a factores como la multiplexación, demultiplexación y pérdidas en la fibra.

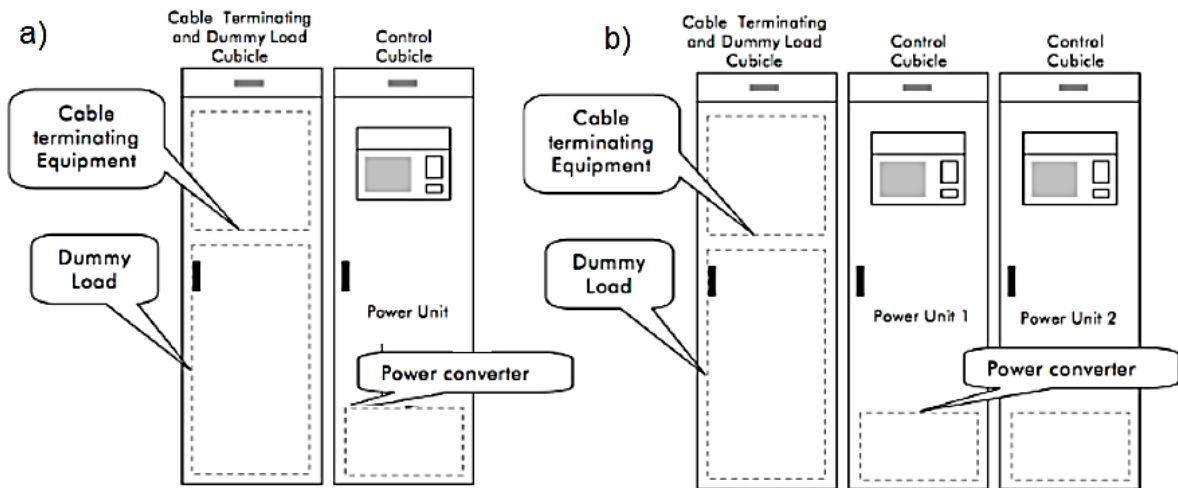
#### **2.3.4.2. Equipo de Alimentación de Energía (Power Feed Equipment, PFE)**

Este equipo como su nombre lo indica es el encargado de proveer la energía eléctrica a los componentes que se encuentran en la planta húmeda, para el caso particular de este diseño a los repetidores. Entre las cualidades más destacadas de este equipo se encuentran: convertir de manera segura un bajo voltaje a una corriente constante de línea con un alto grado de control, optimizar el espacio en la estación terrena, ofertar fiabilidad y facilidad de mantenimiento, suministrar información dinámica del sistema de vigilancia, proveer un sistema con alarmas, monitoreo de circuitos y dispositivos de seguridad, y finalmente tener un alto nivel de facilidad de uso [55].

Comercialmente existen varios tipos de PFE, no obstante, todos tiene una estructura básica como se representa en la Figura 2.12, cuyos elementos se describen a continuación:

- Unidades simples o duplicadas para la conversión del bajo voltaje a una alta tensión requerida en la alimentación del cable submarino,

- Equipo de terminación de cable (CTE) para la interconexión de las unidades de potencia, el cable submarino y la estación terrena.
- Carga artificial (dummy load), útil para simular una carga eléctrica con fines de prueba.



**Figura 2.12.** Estructura básica de un PFE a) Unidad simple, b) Unidad duplicada [55]

#### 2.3.4.3. Sistema de Administración de la Red (*Network Management System, NMS*) y Equipo de Monitoreo de Línea (*Line Monitoring Equipment, LME*)

El NMS es un sistema de gestión de red con todas las funciones para controlar los equipos de la planta seca y húmeda, provee un sistema de monitorización de altas prestaciones, básicamente consiste en una arquitectura cliente – servidor. El administrador de red es una aplicación para la supervisión continua y solución de problemas, entre las funciones más destacadas se tienen: monitoreo de fallos, gestión de la configuración (ventanas para instalación de equipos), administración, supervisión del rendimiento del sistema (trazado en forma gráfica) y seguridad (a nivel de elemento de red, perfiles de usuario y control de acceso basado en el nivel de seguridad del usuario).

El LME es el encargado del monitoreo y control de la planta húmeda por medio de señalización, por ejemplo, en un repetidor se puede verificar parámetros tales como: potencias ópticas de entrada y salida, corrientes de bombeo óptico, temperatura, entre otros; todos los parámetros sujetos a monitoreo pueden ser alarmados dentro del NMS para no exceder los valores límites y así evitar daños en los mismos. El LME puede ser parte del SLTE.

#### 2.3.4.4. Repetidores

Un repetidor en el contexto de este trabajo es el equipo encargado de permitir la amplificación de potencia óptica de las señales que viajan por la fibra, la cual se debilita con la distancia; por lo cual en un enlace de este tipo se deben ubicar cada cierta distancia para compensar la atenuación. Los repetidores son ubicados en serie a lo largo del enlace y alimentados por una corriente constante suministrada por los PFE de las estaciones terrenas a través de un cable conductor que forma parte del cable submarino. Hay varios tipos de repetidores, sin embargo, existen ciertos parámetros que se deben cumplir, entre los más destacados se tiene: soporte de aplicaciones DWDM, ganancia del amplificador plana y amplia, baja figura de ruido (Noise Figure, NF<sup>21</sup>), resistente a ambientes hostiles y de alta profundidad, tamaño compacto para facilitar el despliegue hacia el mar y la puesta a bordo en el barco, número de amplificadores adecuado para el número de fibras que están en el cable submarino. En la Figura 2.13 se puede apreciar cómo es la estructura interna de un repetidor, se debe prestar especial atención a la entrada y salida, donde se llega por medio de un empalme entre un extremo del cable submarino y un pigtail<sup>22</sup> que sale del repetidor; en la sección de pérdidas se debe tomar en consideración que por cada repetidor va a haber dos empalmes y dos conectores (entrada y salida del repetidor). Se debe tomar en cuenta que los equipos dentro del repetidor son separados para cada hilo de fibra [56], típicamente pueden acomodar de uno a ocho pares de amplificadores en una sola infraestructura.

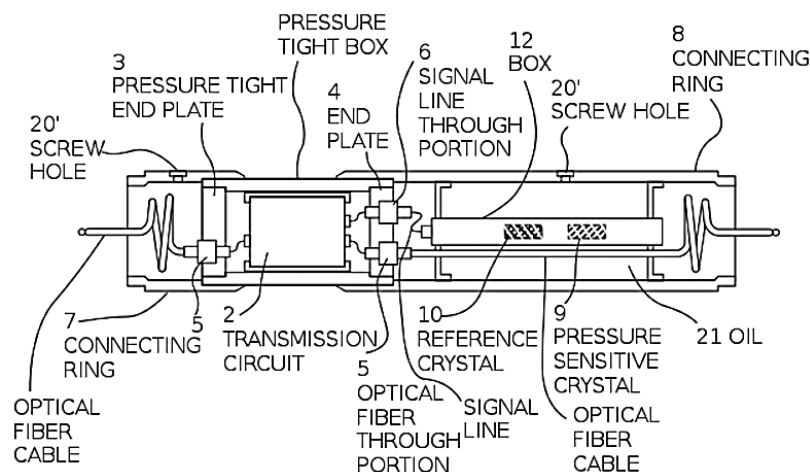


Figura 2.13. Diagrama del repetidor de cable submarino [56]

<sup>21</sup> Noise Figure: Parámetro que determina la degradación de la relación señal a ruido (SNR), permite conocer el rendimiento de un amplificador o de un receptor, entre más bajo sea el valor significa que posee un mejor rendimiento.

<sup>22</sup> Pigtail: Hilo de fibra óptica compuesto en un extremo por un conector, y en el otro extremo por fibra desnuda para empalar por medio de un empalme con el cable principal.

#### 2.3.4.5. Pozo o cisterna de amarre (*Beach ManHole, BMH*)

Es un componente de la planta seca situado entre la estación terrena y la planta húmeda, es la zona donde llega el cable submarino y se realiza la transición del cable, se le retira el blindaje con el que llega a ese punto, se empalma por fusión los hilos de fibra, se los protege con una caja de empalme y sale con el nuevo tipo del cable (cable terrestre) hasta donde se encuentra la estación terrena.

#### 2.3.5. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS

En la selección de equipos se consideran fundamentalmente tres proveedores: Huawei Marine, Xtera y Patec. Sin embargo, para la sección de cálculos del presupuesto de potencias, la única marca que presenta especificaciones explícitas en cuanto a potencias de entrada, potencias de salida, saturación, ganancia, entre otros es Padtec, a pesar de ello no presenta una solución completa frente a sus competidores.

##### 2.3.5.1. Huawei Marine

Huawei Marine ofrece una solución completa para la implementación de un sistema de cable submarino, como se muestra a continuación [57].

El SLTE de Huawei Marine (Figura 2.14) posee las siguientes características clave:



**Figura 2.14.** SLTE de Huawei Marine [57]

- Capacidad de conexión de hasta 25.6 Tbps.
- Velocidades de línea coherentes de 100 G, 200 G, 400 G y 1 T.

- Admite longitudes de segmentos de línea digital de hasta 14000 km en sistemas con repetidores y hasta 648 km en sistemas sin repetición.
- Proporciona diferentes esquemas de protección a nivel de red y gestión inteligente de la red para garantizar la confiabilidad.
- Plataforma universal para redes submarinas y redes terrestres.
- Soporta *flexgrid* WSS<sup>23</sup> (37.5 GHz, 43.75 GHz, 50 GHz, 62.5 GHz Y 75 GHz).
- Tiene formatos de modulación que mejoran la mitigación no lineal, tales como PMD-BPSK, PMD-QPSK, 8QAM y 16QAM.
- Etapas para la compensación de la dispersión.
- Amplificadores ROPA, HBA, Raman y Raman mejorado.
- ROADM de múltiples grados basados en WSS.

El equipo de alimentación PFE (Figura 2.15) es el encargado de administrar una corriente constante para la alimentación de energía al sistema de cable submarino. Convierte de manera segura -48 V a la corriente constante requerida para los dispositivos intermedios. Posee dos tipos de PFE como se describen en la Tabla 2.9.



**Figura 2.15.** Equipo de alimentación de Huawei Marine [57]

<sup>23</sup> WSS: *Wavelength Selective Switch*

**Tabla 2.9.** Especificaciones de los PFE de alta y baja tensión

| Parámetro           | Equipo de alimentación de baja tensión | Equipo de alimentación de alta tensión |
|---------------------|--|--|
| Voltaje de entrada  | -40.5 VDC a -60 VDC                    | -40.5 VDC a -60 VDC                    |
| Corriente de salida | 1 A                                    | 1.5 A                                  |
| Tensión de salida   | 6 kV                                   | 9 kV, 12 kV, 15kV, máximo 18kV         |
| Potencia de salida  | 5 kW                                   | 225.5 kW                               |

El sistema de gestión de red iManager U2000 presenta las siguientes características:

- Alta fiabilidad y seguridad basada en la red y arquitectura del sistema.
- Navegación de alarmas rápida e intuitiva, basada en la topología de la red.
- Ajuste automático y manual de potencia óptica.
- Análisis de tendencias de rendimiento del espectro y alarmas umbral de calidad para el mantenimiento preventivo.
- Admite operaciones que incluyen creación y eliminación de conexiones de fibra, la configuración de tableros y fibras, y verificación de información de alarmas y longitudes de onda.
- Permite notificaciones externas para alarmas clave (alarmado de fallas en tiempo real).
- Localización de fallas *step by step*, para la solución rápida de las mismas.

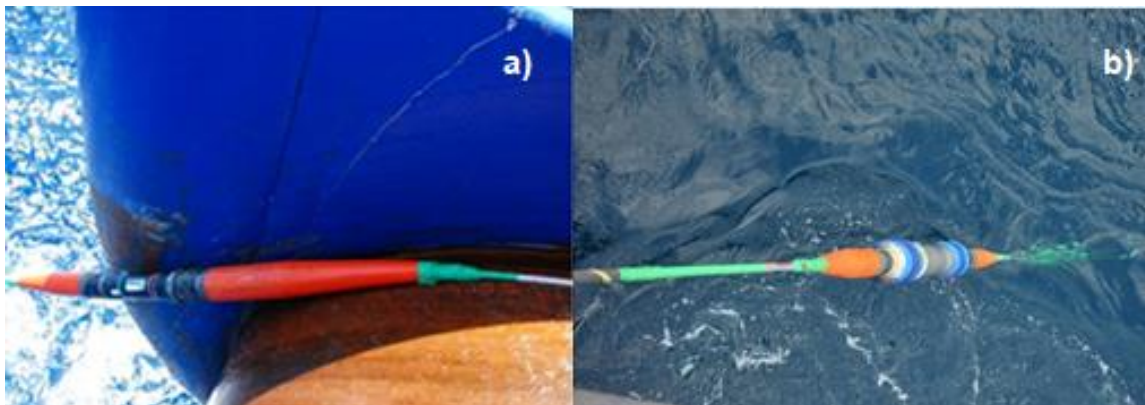
En cuanto al repetidor, es de la serie de productos RPT 1660, con tecnología EDFA a medida. Huawei Marine tiene dos tipos de repetidores, el 2FP RPT adecuado para sistemas de cable regional de bajo costo (hasta 2 pares de fibra) y el repetidor 8FP RPT para sistemas transoceánicos o sistemas de cable regionales (hasta 8 pares de fibra). Ambos modelos permiten distancias entre tramos de hasta 150 km, tienen un diseño que facilita la manipulación y proveen una excepcional resistencia a la corrosión, y son sumergibles hasta profundidades de 8000 m.

**Tabla 2.10.** Especificaciones para los repetidores comerciales de Huawei Marine [57]

| Especificaciones                   | 2FP RPT | 8FP RPT |
|------------------------------------|---------|---------|
| Especificaciones ópticas           |         |         |
| Pares de fibra                     | 2       | 8       |
| Ancho de banda de operación (nm)   | 33      | 39      |
| Potencia de salida nominal         | 16      | 22.5    |
| Figura de ruido nominal (dB)       | 4.5     |         |
| Especificaciones eléctricas        |         |         |
| Corriente de operación nominal (A) | 0.65    |         |



| Especificaciones                     | 2FP RPT | 8FP RPT |
|--------------------------------------|---------|---------|
| Caída de voltaje                     | 17V/2FP | 31V/2FP |
| Polaridad de alimentación de energía | Bipolar |         |
| Especificaciones mecánicas           |         |         |
| Peso en el aire (kg)                 | 88      | 245     |
| Diámetro de la carcasa (mm)          | 140     | 220     |
| Longitud total (mm)                  | 2800    | 4400    |
| Especificaciones ambientales         |         |         |
| Profundidad máxima (m)               | 8000    |         |
| Tiempo de vida útil (años)           | 25      |         |

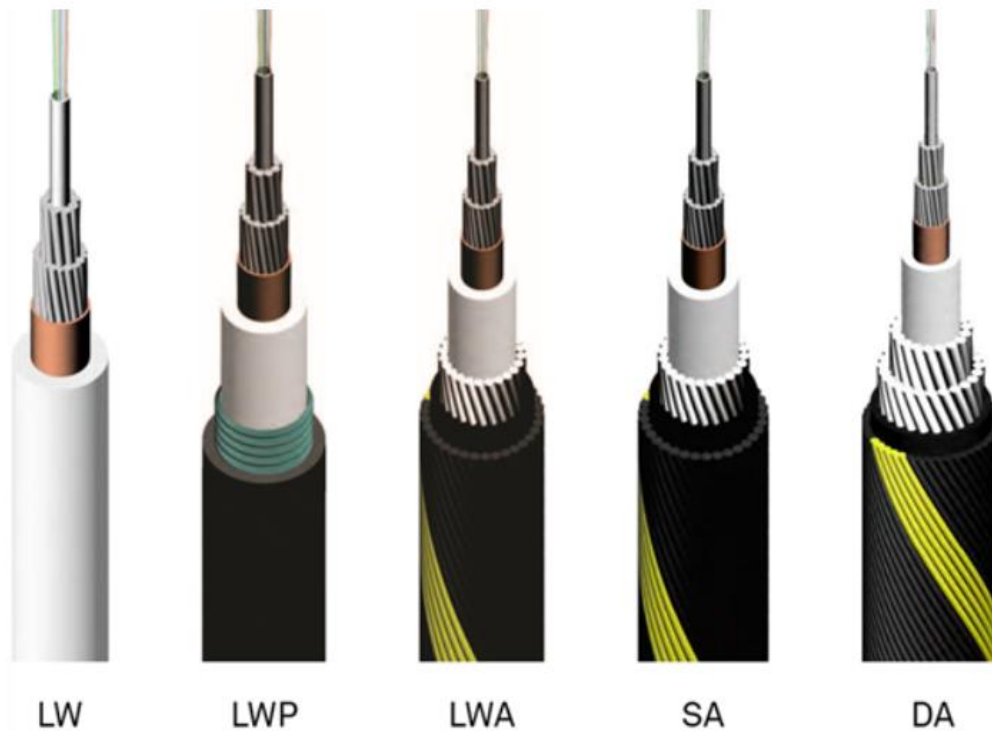


**Figura 2.16.** Repetidores de Huawei Marine, a) modelo 2FP RPT, b) modelo 8 FP RPT [57]

Además, Huawei Marine ofrece cables submarinos con diferentes tipos de protección como se puede ver en la Figura 2.17, y se describen a continuación:

- *Light Weight (LW)*: Puede ser instalado en profundidades de 1000 m a 8000 m en fondos marinos estables, cable tipo *loose tube*, envuelto con un alambre de acero reforzado con metal y capa exterior de polietileno denso.
- *Light Weight Protection (LWP)*: Soporta profundidades de 1000 m a 8000 m, en fondos marinos de superficie rugosa, tolerante a daños/desgaste por el ambiente al que está expuesto, banda metal más reforzada que la del cable LW, posee una segunda capa de polietileno para mejorar la protección frente al desgaste y la corrosión.
- *Light Weight Armour (LWA)*: Adecuado para profundidades entre 20 m y 1500 m, soporta ambientes hostiles con peligro de daño moderado, más reforzado que el cable LW, puede utilizarse en profundidades de 2000 m sin necesidad de soterramiento.

- *Single Armour (SA)*: Soporta profundidades entre 20 m y 1500 m, apropiado para terrenos rocosos y zonas de alto riesgo de daño y proporciona una capa de alambre blindado sobre el cable LWA.
- *Double Armour (DA)*: Puede ser instalado en profundidades menores a 500 m en zonas rocosas, y de alto riesgo de jalones y alto desgaste, tiene dos capas más de alambre blindado pesado que el cable LW.



**Figura 2.17.** Cables de fibra óptica de Huawei Marine [57]

### 2.3.5.2. Xtera

Xtera presenta la siguiente solución para los equipos que conforman el sistema de cable submarino [58].

En primer lugar, se tiene el SLTE Un-Wave Optima™ Platform que presenta las siguientes características y beneficios. En el ANEXO G se puede encontrar el *datasheet* más detallado.

- Adecuada para sistemas *long haul* y *ultra long haul*.
- Última tecnología de transmisión coherente y SD-FEC<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> SD- FEC: Soft-Decision Forward Error Correction el cual permite un mejor rendimiento en corrección de errores, valores más altos de BER.

- Tecnología de amplificadores ópticos EDFA, híbrida EDFA/Raman y sólo Raman.
- Sistemas de red de 100 G con y sin repetidores.
- Hasta 6 Tbps por *rack*.
- Kit de herramientas Amplificador/ROADM para abordar los requisitos de capacidad, conectividad y disponibilidad durante la vida útil de la red.
- Disponibilidad de repuestos y capacitación para redes submarinas.



**Figura 2.18.** SLTE Un-Wave Optima™ Platform [58]

El Nu-Wave Line Monitoring Equipment (LME) permite la implementación de monitoreo activo (LME-A) o pasivo (LME-P). El LME-A permite la monitorización y el control de la planta sumergida en base a la señalización óptica de baja frecuencia en la planta sumergida, a través de un protocolo comando respuesta. En un repetidor los parámetros susceptibles de monitoreo son potencias de entrada y salida, potencias de bombeo, temperaturas internas, entre otros; las respuestas de éstos se devuelven al SLTE en cada extremo del sistema, se recibe y se demodulan en el LME-A. Los parámetros

pueden ser alarmados en el NMS para controlar que no se sobrepasen los valores umbrales. Para mayor detalle de especificaciones revisar el ANEXO G. Por otra parte se encuentra el LME-P, que permite el monitoreo sin el uso de medios activos de interrogación o control, solamente se base en un *loopback* óptico de las señales transmitidas; en base a los datos que se obtienen se puede realizar una gráfica para el monitoreo a corto o largo plazo de la planta húmeda, para mayor detalle sobre las especificaciones ver el ANEXO G.

El Nu-Wave Network Management System (NMS) es el sistema encargado de la gestión de la red, para el control eficiente de todos los productos Xtera tanto en rutas terrestres como submarinas, posee una arquitectura cliente/servidor con redundancia completa para garantizar un sistema de monitoreo de alta disponibilidad. El NMS se divide en dos clientes y un servidor. La parte del cliente (primero) es dedicada a las tareas como: monitoreo de fallos, gestión de la configuración, administración, supervisión del rendimiento y la seguridad. El cliente de administración del NMS (segundo) que gestiona los perfiles de usuario, control de la actividad y el estado del servidor para que el cliente (primero) pueda controlar el acceso a estos parámetros. Y, el servidor NMS que se puede implementar con *Oracle Solaris* o plataformas de *Red Hat Linux*, cuyos parámetros se pueden apreciar con mayor detenimiento en el ANEXO G.

Xtera ofrece repetidores con las características generales:

- Repetidores con carcasa de titanio (altamente resistente a la corrosión) para contener amplificadores híbridos Raman-EDFA.
- Trabaja en banda C+L (70nm) o solo C (40 nm).
- Figura de ruido menor a 3 dB
- Alta fiabilidad en sus componentes.
- Circuitos especializados para mantener la energía necesaria para las bombas Raman.
- Estricto control integral para prevenir entrada de agua o hidrogeno (H).
- En caso de desconexión del repetidor, presenta una característica de cerrado automático para la protección de la persona que realizó esta operación, una vez que se reestablece la conexión las bombas automáticamente se abren (no se requiere reinicio manual).
- Soporta profundidades de hasta 8000 m.

### 2.3.5.3. Padtec

En esta marca, se tiene a disponibilidad el SLTE modelo MultiPad MPD-1200 (*Compact Optical Transport Solution*), como se mencionó este es el único de los equipos que presenta características técnicas completas, por lo cual este equipo es el seleccionado, y se consideran sus parámetros para realizar el presupuesto de potencias y además porque se ajusta a los requerimientos del sistema. Las características generales de este equipo se describen a continuación, para información más detallada sobre las especificaciones ópticas revisar el ANEXO H [59]:

- Soporta DWDM, conversión de longitud de onda a la grilla de la ITU-T según la recomendación G.694.1.
- Adecuado en la transmisión de datos de redes *long haul* o *ultra long haul*.
- Soporta protocolos como Gigabit Ethernet, ATM, ESCON, SDH, *Fibre Channel*, entre otros.
- Compatible con cable tipo OPGW, cables terrestres y cables submarinos.
- Solución económica y eficiente.
- Tecnología verde, amigable con el medio ambiente (optimización del consumo de energía).
- Trabaja en banda C y banda L.

Los equipos presentados en esta sección son los equipos que más se ajustan a las necesidades del presente trabajo. Sin embargo, se pudiese interpretar que están sobredimensionados por las capacidades que ofertan, lo cual para proyectos de cable submarino es adecuado y demandado, pero cabe mencionar que este es un trabajo más enfocado a lo social, a la falta de recursos que presenta la provincia en cuanto al servicio de Internet.

En la Tabla 2.11, Tabla 2.12 y Tabla 2.13, se puede apreciar los parámetros más importantes del MultiPad MPD-1200 [59].

**Tabla 2.11.** Parámetros para la Interfaz DWDM [59]

| Parámetro             | STM-1                        | STM-4   | GbE/FC  | 2G FC   | STM-16  |
|-----------------------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Sensibilidad          | -41 dBm                      | -33 dBm | -31 dBm | -28 dBm | -27 dBm |
| Saturación            | -8 dBm                       |         |         |         |         |
| Potencia de salida    | Min: -1 dBm                  |         |         |         |         |
| Relación de extinción | ≥5 dB                        |         |         |         |         |
| Dispersión máxima     | 10000 (Modulación integrada) |         |         |         |         |

**Tabla 2.12.** Parámetros para los Amplificadores [59]

| <b>Parámetro</b>    | <b>Mínimo</b>                 | <b>Típico</b> | <b>Máximo</b> |
|---------------------|-------------------------------|---------------|---------------|
| Potencia de salida  | 20/23 dBm                     | -33 dBm       | -31 dBm       |
| Potencia de entrada | -20 a 10 dBm                  |               |               |
| Ganancia máxima     | 30 dB                         |               |               |
| Figura de ruido     | 5.5 dB (para -5 dBm de señal) |               |               |

**Tabla 2.13.** Parámetros para los Pre-amplificadores [59]

| <b>Parámetro</b>    | <b>Mínimo</b>                | <b>Típico</b> | <b>Máximo</b> |
|---------------------|------------------------------|---------------|---------------|
| Potencia de salida  | 12 dBm                       | 14 dBm        | 15.5 dBm      |
| Potencia de entrada | -35 a 5 dBm                  |               |               |
| Ganancia máxima     | 30 dB                        |               |               |
| Figura de ruido     | 4 dB (para -35 dBm de señal) |               |               |

#### **2.3.5.4. Alcatel**

Para la selección del tipo de cable submarino se ha considera la empresa Alcatel debido a su gran experiencia en el tendido de cable submarinos alrededor del mundo (sistemas de cable submarino como: SEA-ME-WE 3, SAC, Northstar, MAC-1, Japan-US, entre otros). Entre las características más destacadas se tienen:

- Puede contener hasta 16 fibras y soporta hasta 8000 m de profundidad.
- Posee doble barrera contra el hidrógeno (H) y polietileno de alta densidad.
- 25 años de tiempo de vida útil.
- Muy resistente a rupturas del cable, ofrece una gama completa de tipos de protección.

Las especificaciones técnicas de la gama de cables que ofrece esta marca se puede apreciar en el ANEXO I.

### 3. RESULTADOS

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el diagrama del sistema de cable submarino consta en la planta seca (estación terrena) de: un equipo terminal, un equipo de alimentación del cable (incluye el CTE), y una unidad de mantenimiento y control; por otra parte, está el BHM (donde llega el cable submarino) y finalmente la plata húmeda que consta únicamente de repetidores. En la Figura 3.1 se puede apreciar es esquema general del sistema propuesto, conforme a los cálculos de las siguientes secciones, se determinará el número de repetidores que se requiere en el diseño.

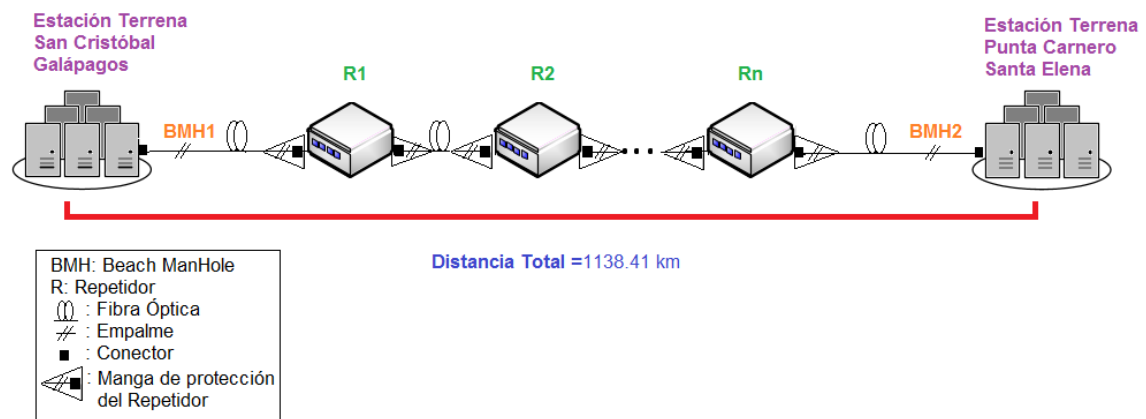


Figura 3.1. Esquema del sistema de cable submarino previo a los cálculos

### 3.1. CÁLCULO DE PÉRDIDAS

El cálculo de las pérdidas permite conocer un buen referente en valor, para el cálculo del presupuesto de potencias, en base a esto se puede tomar decisiones sobre distancias entre repetidores, potencias de transmisión, verificación de los niveles de potencia en recepción (si el nivel que llega está dentro de los límites de sensibilidad y de saturación de los equipos, tanto de los repetidores como de los equipos finales), etc. Para lo cual se debe considerar los siguientes puntos.

#### 3.1.1. ATENUACIÓN POR DISTANCIA EN LA FIBRA ÓPTICA

Con el uso de la fibra G.656 en banda C se tiene que el coeficiente de atenuación es 0.35 dB/km, por lo que se tiene:

$$L_{FO} = coef. atenuación \cdot distancia$$

$$L_{FO} = 0.35 \frac{dB}{km} \cdot 1138.41 km$$

$$L_{FO} = 398.44 dB$$

### 3.1.2. PÉRDIDAS POR EMPALMES

Según la recomendación de la UIT-T G. Suplemento 41, la longitud del cable tiene que ser tan larga como sea posible, la única sugerencia con respecto al largo del cable es que sea mayor a 25 km [60], debido a esto la distancia entre los empalmes va a estar determinada por las siguientes tres circunstancias. La primera, cuando se realiza el cambio de protección en el cable, seguida de los puntos donde se encuentran las BMH, y finalmente, dónde se ubican los repetidores (dos empalmes por cada repetidor como se pudo ver en la sección 2.3.4.4, I/O del repetidor).

Para tener idea de cuántos repetidores se requiere en el enlace, se debe trabajar con los valores mínimos, típicos y máximos que manejan los amplificadores, en cuanto a potencia de transmisión y recepción, para de esta manera despejar la distancia y tener un aproximado de la longitud de los tramos entre repetidores, por lo cual se tienen los siguientes valores, tomando como referencia los datos de la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Datos del amplificador [59]

| Parámetro           | Mínimo                                       | Típico    | Máximo        |
|---------------------|--|-----------|---------------|
| Potencia de salida  | 20/23 dBm                                    | 21/24 dBm | 22.5/25.5 dBm |
| Potencia de entrada | -20 dBm (sensibilidad) a 10 dBm (saturación) |           |               |

Haciendo uso de la Ecuación 1.23 se puede despejar la distancia entre repetidores, obteniéndose como resultado la Ecuación 3.1, necesaria para los siguientes cálculos, se debe tomar en cuenta que para este cálculo el único tipo de pérdida que se considera es la atenuación en la fibra. La unidad resultante de la diferencia de las potencias de transmisión y recepción es el dB.

$$P_{TX} - L_{FO} = P_{RX}$$

$$L_{FO} = P_{TX} - P_{RX}$$

$$L_{FO} = \text{coef. atenuación} \cdot \text{distancia}$$

$$\text{coef. atenuación} \cdot \text{distancia} = P_{TX} - P_{RX}$$

$$\text{distancia} = \frac{P_{TX} - P_{RX}}{\text{coef. atenuación}} \quad (3.1)$$

Para distancia máxima, se considera el valor mínimo en la potencia de salida y la sensibilidad del equipo.

$$\text{distancia} = \frac{20 \text{ dBm} - (-20 \text{ dBm})}{0.35 \text{ dB/km}}$$

$$\text{distancia} = 114.28 \text{ km}$$



Para la distancia mínima, los valores a considerar son la potencia máxima de salida y la potencia de saturación del equipo.

$$distancia = \frac{25.5 \text{ dBm} - (10 \text{ dBm})}{0.35 \text{ dB/km}}$$

$$distancia = 44.28 \text{ km}$$

Es decir que los límites en los que puede variar la distancia entre repetidores son de 44.28 km a 114.28 km, por lo cual se debe utilizar valores intermedios para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Pues entre menor sea la separación entre repetidores, mayor será la potencia que ingresa al amplificador y la respuesta de este será más plana obviando el uso de ecualizadores (ANEXO E), por otro lado entre mayor sea la separación entre repetidores, menor será la potencia de entrada al amplificador y su respuesta pierde planeidad requiriendo posteriormente ecualizarla. Por tanto, se establece un compromiso entre estos parámetros y no se consideran potencias de entrada ni muy bajas ni muy altas para el diseño, de tal forma que, la distancia calculada sea la ideal para que los amplificadores tengan un buen nivel de señal de entrada que asegure igual ganancia para todos los canales ópticos y que no tengan problemas o riesgo de sufrir algún daño por saturación del equipo. De esta manera se asume una potencia de entrada a los amplificadores de  $-5 \text{ dBm}$  y una potencia de salida de  $21 \text{ dBm}$ , con lo que la distancia adecuada entre repetidores sería:

$$distancia = \frac{21 \text{ dBm} - (-5 \text{ dBm})}{0.35 \text{ dB/km}}$$

$$distancia = 74.28 \text{ km}$$

Por consiguiente, el número de repetidores en el sistema se obtiene haciendo uso de la Ecuación 3.2, de la siguiente forma:

$$\# \text{ repetidores} = \frac{\text{Distancia total del enlace}}{\text{Distancia entre repetidores}} - 1 \quad (3.2)$$

$$\# \text{ repetidores} = \frac{1138.406 \text{ km}}{74.28 \text{ km}}$$

$$\# \text{ repetidores} = 14.3 \cong 14$$

Como el número de repetidores es un decimal se tiene que aproximar a un entero, en este caso a catorce; si se considera que esto puede afectar el desempeño, basta con hacer una prueba de cálculo utilizando la Ecuación 3.2 para verificar, como se muestra a continuación.

$$\text{Distancia total del enlace} = (\# \text{ repetidores} + 1) \cdot \text{Distancia entre repetidores}$$

$$\text{Distancia total del enlace} = 15 \cdot 74.28 \text{ km}$$

$$\text{Distancia total del enlace} = 1114.2 \text{ km}$$

La distancia calculada es 1114.2 km y la distancia del enlace es 1138.406 km, lo que significa que alguno de los tramos tiene que compensar la diferencia de estos valores que es 24.206 km. Se tienen varias opciones, una de ellas es aumentar equitativamente la distancia entre repetidores, por lo cual la nueva distancia entre repetidores sería 75.89 km (la más viable), o hacer un solo tramo más grande; si se toma la segunda opción, la distancia del último tramo sería 98.486 km, el cual se encuentra en los límites calculados por lo que no se tendría ningún problema en la señal recibida. Finalmente, para el cálculo de las pérdidas por empalmes, se debe recalcar que por repetidor se tienen dos empalmes (I/O), por lo que se tienen veinte y ocho empalmes asociados a los repetidores del sistema.

Como se había mencionado, los empalmes serán por la técnica de fusión, el rango de pérdidas está entre 0.01 a 0.2 dB, típicamente un empalme de este tipo, inserta una pérdida promedio de 0.1 dB [3]. En la Tabla 3.2 se puede apreciar el número total de empalmes del sistema de cable submarino.

**Tabla 3.2.** Empalmes del sistema

| Descripción                    | Número de empalmes |
|--------------------------------|--------------------|
| Cambio de protección del cable | 5                  |
| BMH                            | 2                  |
| Repetidores                    | 28                 |
| Total                          | 35                 |

$$L_{empalmes} = 0.1 \frac{dB}{empalme} \cdot \# empalmes$$

$$L_{empalmes} = 0.1 \frac{dB}{empalme} \cdot 35 empalmes$$

$$L_{empalmes} = 3.5 \text{ dB}$$

### 3.1.3. PÉRDIDAS POR CONECTORES

En el caso de los conectores, como se vio en la sección 2.3.4.4, de forma similar al caso de los empalmes se tienen dos conectores por repetidor; si se tienen catorce repetidores entonces se van a tener veinte y ocho conectores, sumado dos conectores de parte de los SLTE de las estaciones en tierra, se tiene un total de treinta conectores. El tipo de conector utilizado es de tipo LC – APC en los SLTE [59], en este caso se va a considerar que insertan pérdidas de 0.3 dB por cada uno [3].

$$L_{conectores} = 0.3 \frac{dB}{conectores} \cdot \# conectores$$

$$L_{conectores} = 0.3 \frac{dB}{conectores} \cdot 30 conectores$$

$$L_{conectores} = 9 dB$$

### 3.1.4. PÉRDIDAS POR ENVEJECIMIENTO

Con el paso del tiempo los componentes del sistema tienden a degradarse, lo que conlleva un deterioro en sus atributos de funcionalidad, esto se ve reflejado en las pérdidas que añaden al sistema, un valor típico a considerar es 2.5 dB [61]. Sin embargo, como el sistema es nuevo, no se considera este valor, después de un tiempo se tendría que replantear el presupuesto de potencias y añadir este tipo de pérdida.

### 3.1.5. PÉRDIDAS TOTALES

$$L_{TOTAL} = L_{FO} + L_{empalmes} + L_{conectores} + L_{envejecimiento} \quad (3.3)$$

$$L_{TOTAL} = 398.44 dB + 3.5 dB + 9 dB + 2.5 dB$$

$$L_{TOTAL} = 413.44 dB$$

El total de pérdidas se calcula en base a la Ecuación 3.3, por lo que, el total de pérdidas asciende a 413.44 dB.

## 3.2. PRESUPUESTO DE POTENCIAS

En el presupuesto de potencias se debe considerar: la potencia en transmisión, las pérdidas totales, la ganancia de los amplificadores, la sensibilidad del receptor; y el margen de seguridad que, para las condiciones del sistema se requiere el valor máximo que es 10 dB [3].

$$Potencia_{TX} - Pérdidas_{TOTALES} + G = Sensibilidad_{RX} + Margen de Seguridad$$

Generalmente en los equipos la potencia de transmisión viene dada por un valor mínimo y un máximo expresado en dBm, este valor es configurable en función de los requerimientos del sistema mediante el software que está en el equipo, la potencia de salida del SLTE (MultiPad MPD-1200) ya involucra una etapa de amplificación (dependiendo el tipo de amplificador que se utilice), el valor que se va a considerar para el diseño es 14 dBm [59].

En el lado del receptor se debe considerar dos valores, el valor máximo admitido (saturación) y la sensibilidad, ambos en dBm, la potencia que llegue en recepción debe estar entre estos dos valores para garantizar la correcta operación del sistema de comunicaciones, estos valores al igual que en el transmisor van a variar según el

fabricante y según la velocidad a la que esté operando el sistema, pero típicamente la saturación está en -8 dBm y la sensibilidad para las velocidades que maneja el proyecto se encuentra en -27 dBm (utilizando el equipo MPD-1200, flujos STM-16, debido que es la máxima velocidad de transmisión que ofrece el equipo). Cabe mencionar que el valor de sensibilidad va variando de acuerdo a la velocidad a la que se está operando, entre más alta sea la velocidad el equipo es menos sensible.

Si únicamente se considerarían estos dos valores, potencia de transmisión y sensibilidad, el presupuesto de potencias quedaría de la siguiente manera:

$$Pérdidas_{TOTALS} = Potencia_{TX} - Sensibilidad_{RX}$$

$$Pérdidas_{TOTALS} = 14 \text{ dBm} - (-27 \text{ dBm})$$

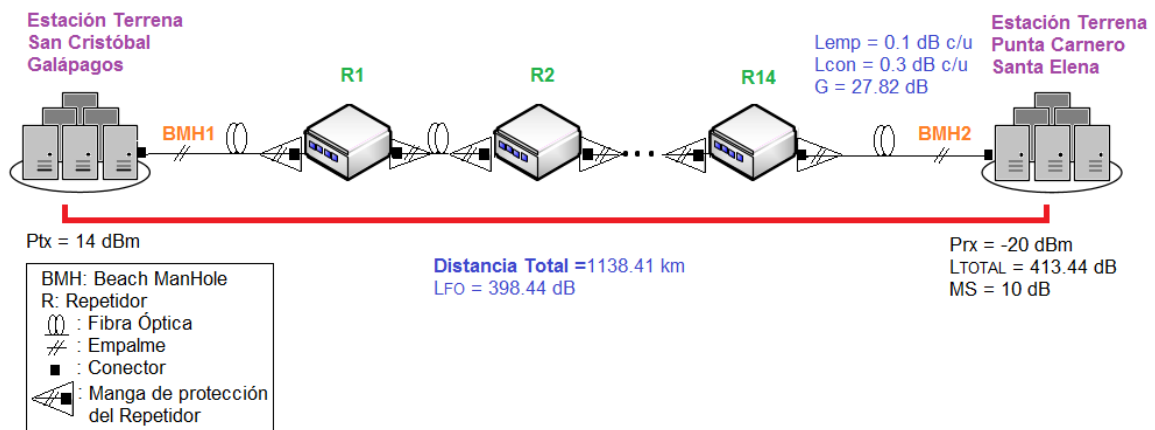
$$Pérdidas_{TOTALS} = 41 \text{ dB}$$

Donde las pérdidas máximas admisibles pueden alcanzar los 41 dB, sin considerar el margen de seguridad, y el valor de pérdidas calculado en la sección previa es 413.44 dB, entonces es necesario el uso de repetidores que contengan etapas de amplificación incorporadas; además, el valor que se espera en recepción debe estar entre los límites de saturación y sensibilidad, para garantizar un buen nivel de señal, por lo que se considera para el diseño una potencia en recepción de -20 dBm. Considerando lo dicho, se tiene lo siguiente:

$$Potencia_{TX} - Pérdidas_{TOTALS} + G = Potencia_{RX} + Margen \text{ de Seguridad} \quad (3.4)$$

$$14 \text{ dBm} - 413.44 \text{ dB} + G = -20 \text{ dBm} + 10 \text{ dB}$$

$$G = 389.44 \text{ dB}$$



**Figura 3.2.** Esquema final del sistema de cable submarino

Las etapas de amplificación de los repetidores deben sumar 389.44 dB, si los repetidores considerados en el diseño son 14, eso significa que cada uno de ellos tendría que brindar una ganancia de 27.82 dB, la cual está en el rango de ganancias de los amplificadores, ya que estos permiten una ganancia máxima de 30 dB.

Para finalizar, en la Figura 3.2 se puede observar el bosquejo final del sistema de cable submarino entre los dos puntos considerados en el diseño, con sus respectivos valores de potencias y pérdidas.

### 3.3. PRESUPUESTO REFERENCIAL DEL PROYECTO

Los costos de un sistema de cable submarino deben incluir los equipos tanto de la planta húmeda como de la planta seca, a esto se le debe añadir el costo de instalación del mismo (buque especializado en tendido de cable submarino o *vessel*, y la mano de obra de los técnicos encargados de tender el cable en el lecho marino) [54]. En caso de implementación, los costos presentados no incluyen los costos de los estudios técnicos previos (estudio de ingeniería), ni los permisos necesarios en las entidades correspondientes (marco legal).

Típicamente una estación terrena pequeña con los equipos que la componen, como es el caso de este trabajo está alrededor de cinco millones de dólares, las estaciones terrenas más complejas (para sistemas *ultra long haul*, distancias intercontinentales) alcanzan valores entre diez y quince millones de dólares [54]. Para el proyecto se necesita dos estaciones terrenas (continental e insular del Ecuador). No se considera el costo de cada equipo por separado debido a que las grandes empresas de telecomunicaciones manejan alta confidencialidad con este tipo de información.

Hoy en día los costos en el mercado para el cable submarino ofrecen precios alrededor de veinte mil dólares por kilómetro, esto puede variar de acuerdo al tipo de protección del mismo (entre más acorazado más costoso), se escoge un valor promedio [54]. En función de la Ecuación 3.5 se puede calcular el precio del cable.

$$\begin{aligned}
 \text{precio}_{\text{cable}} &= \text{precio}_{\text{km}} \cdot \text{distancia} & (3.5) \\
 \text{precio}_{\text{cable}} &= \frac{20000 \text{ dólares}}{\text{km}} \cdot 1138.406 \text{ km} \\
 \text{precio}_{\text{cable}} &= 2'2768120 \text{ dólares}
 \end{aligned}$$

El costo de un repetidor depende de su tamaño, comercialmente hay dos tamaños para estos, el primero que acomoda en su interior de uno a cuatro pares de fibra (aplicable a este diseño) y otro que soporta de cinco a ocho pares de fibra. Nótese que los circuitos

dentro del repetidor son asociados a una fibra. El precio promedio para los repetidores bordea los doscientos cincuenta mil dólares [62].

Para el alquiler del buque, si se considera que por día se puede instalar un promedio de doscientos kilómetros en el fondo marino [63], se necesitaría seis días aproximadamente para completar el tendido del cable, el valor estimado de alquiler del *vessel* es cien mil dólares por día [62].

**Tabla 3.3.** Resumen de costos

| <b>Elemento</b>                              | <b>Cantidad</b> | <b>Costo individual</b> | <b>Costo total</b> |
|--|-----------------|-------------------------|--------------------|
| Estación terrena                             | 2               | 5'000000                | 10'000000          |
| Cable  | 1138.406        | 20000                   | 22'768120          |
| Repetidor                                    | 14              | 250000                  | 3'500000           |
| Alquiler del vessel                          | 6               | 100000                  | 600000             |
| Mano de obra                                 |                 |                         | 90000              |
| <b>Total</b>                                 |                 |                         | <b>36'958120</b>   |
| Presupuesto extra                            |                 | 5% del total de costo   | 1'847906           |
| <b>Total (incluido el presupuesto extra)</b> |                 |                         | <b>38'806026</b>   |

En la Tabla 3.3 se puede apreciar el costo referencial del proyecto, los valores presentados son un estimado en base a otros proyectos de diseño y costos de cables implementados, no se presentan cotizaciones adjuntas puesto que, se realizó las gestiones necesarias para obtener esta información, sin embargo, los fabricantes tienen alta restricción en cuanto a la transferencia de la misma. El 5% del costo adicional es en caso de algún imprevisto en la implementación del proyecto, por si se requiere un día más del alquiler del barco (debido a las inclemencias del tiempo), por si se requiere más obreros en la instalación del cable, entre otros factores; este valor se asume debido a la falta de información en los proyectos implementados, se deja como un mínimo de reserva, además frente al valor real del cable sin considerar imprevistos es un valor casi despreciable.

Es importante destacar que en este presupuesto de costos no están incluidos los costos que llevan los estudios previos del suelo (estudio de batimetría), ni los permisos que se requieren para la implementación una vez aprobado el proyecto. Únicamente se está tomando en cuenta el costo de la instalación del cable submarino y de sus respectivos equipos para su operación.

Finalmente, el costo total del proyecto requiere una inversión considerable de dinero, la cual debería ser compartida entre el Gobierno Nacional (puesto que es un fin social para la provincia) y accionistas de los gigantes de las telecomunicaciones en el país para su posible implementación.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- La justificación de la propuesta planteada para la mejora del servicio de Internet de este proyecto corresponde a un fin social, debido a que la calidad de servicio de Internet en la provincia de Galápagos no es satisfactoria y además los costos para acceder al servicio son muy altos. Es importante destacar que, para la eventual implementación, varios socios corporativos deberán llegar a un acuerdo con el objetivo de encontrar la viabilidad de la puesta en funcionamiento del cable submarino, principalmente el apoyo por parte del Estado.
- El presente proyecto propone una alternativa con la finalidad de cumplir con la demanda de población del Archipiélago de Galápagos, pues se conoce que en estos días una de las formas más rápidas y efectivas de tener acceso a todo tipo de información es el internet, servicios como: consultas en línea, telemedicina, teleeducación, cursos virtuales, pagos de facturas, transferencias bancarias, plataformas de video, video llamadas, redes sociales, negocios vía Internet, aplicaciones multimedia, en fin, un sinnúmero de aplicaciones que usan el Internet como medio.
- Dado que la provincia de Galápagos es una zona de vulnerabilidad ecológica, se han impuesto estrictos controles y normas para la protección y conservación de la flora y fauna nativa, bajo esta consideración su población no puede crecer de manera desmedida, dicho esto, para el cálculo de la demanda de servicios se estimó el valor de la tasa de crecimiento anual muy por debajo de los datos de la misma en los últimos periodos. La tendencia de la población en general es creciente, no obstante, en las Islas Galápagos está llegando a su límite.
- En caso de algún daño en el cable submarino, el sistema resultaría inoperativo durante el lapso de tiempo que se realice las acciones necesarias para recuperar la conexión; de requerirse un circuito alternativo o de redundancia, se manejan dos opciones: la primera, la instalación de un nuevo tramo de cable submarino, siendo necesario el estudio de otra ruta diferente a la determinada en este trabajo, o por otro lado, la posibilidad de conectarse mediante uno de los cables submarinos que pasan por las costas de Ecuador; la segunda opción, más factible en términos de costos, es re-enrutar el tráfico generado a través de enlaces satelitales, que pueden ser provistos por las mismas empresas establecidas en el archipiélago.

- Debido a derechos de confidencialidad que las grandes empresas manejan generalmente, en especial aquellas que se encuentran en vanguardia con respecto a temas de I+D, como es el caso de los fabricantes de equipos de tecnología de transporte de datos a través de cable submarino, se han tenido ciertas limitaciones en cuanto al acceso a información de costos y características específicas de funcionamiento de ciertos equipos. Una de las consecuencias de ello fue que, al realizar el cálculo del presupuesto de potencia del enlace, se estimaron valores de potencia de salida, saturación y sensibilidad en los repetidores considerando los valores conocidos por parte de los amplificadores del equipo terminal (*booster amplifier*).
- El cálculo de la demanda de Internet se realizó considerando las horas pico para cada tipo de cuenta (fija, corporativa y móvil), no se puede tomar en cuenta una hora pico para todos simultáneamente, debido a que los mismos usuarios pueden conectarse a diferentes horas a través de cada una de estas cuentas, por lo que se tomó al tipo de cuenta residencial como la que más consumiría recursos para la estimación de la demanda.
- Los valores de potencia considerados para el cálculo del presupuesto óptico se basan en los niveles de sensibilidad y saturación de los equipos. Potencias intermedias han sido seleccionadas para garantizar en el receptor, la presencia de una señal con buen nivel de potencia para ser correctamente detectada. Por otro lado, el fabricante sugiere dichos valores como típicos con el fin de garantizar el correcto rendimiento del sistema.
- Como consecuencia de un bajo nivel de potencia en la entrada de un equipo (amplificador), tiene lugar la aparición de efectos no lineales, debido a la necesidad de un valor de ganancia elevado capaz de compensar las pérdidas, esto conlleva a que la respuesta del amplificador pierda planeidad y se requiera el uso de ecualizadores para amplificar de manera uniforme cada canal óptico. En el caso del presente trabajo con el afán de contrarrestar este problema se ha considerado las siguientes acciones: la primera, hacer uso de potencias medias; y la segunda, localizar las longitudes de onda pertenecientes a la región del espectro con mejores respuestas en frecuencia, debido a que el espectro ha sido calculado en el marco del peor de los casos (12 nm), que es aproximadamente un tercio del espectro disponible en banda C (35 nm).
- El trabajo presentado es un buen referente en estimaciones para poder implementar como proyecto en un futuro con estudios más precisos, equipos que



permitan realizar pruebas tanto en superficies terrestres como en marinas, de la mano con un conjunto de profesionales para culminar su realización y dotar de un servicio de calidad al Archipiélago de Galápagos.

## **4.2. RECOMENDACIONES**

- Para un cálculo más exacto del trazo del cable submarino se requiere un estudio de batimetría, una vez finalizado dicho estudio y con los resultados obtenidos, se podría realizar una mejor aproximación del paso el cable en lecho marino, debido a que se especificaría: el tipo de suelo (arena, piedra o grava), ubicación exacta de las montañas submarinas, planicies y de los abismos o cambios de profundidad bruscos. Para el mencionado estudio se requiere la colaboración de un especialista en esta área (geólogo marino), así como la utilización de equipo e instrumentos especialmente diseñados, incurriendo en un incremento sustancial en el costo final del proyecto.
- Para suplir el tema de la falta de información, debería existir convenios o una relación más estrecha Universidad-Industria, de esta manera se acortaría la distancia existente, fomentando la inclusión de nuevos talentos para beneficios de las empresas.
- El cálculo de la población para la estimación de la capacidad que se realizó en el presente proyecto podría mejorar si los datos que tiene INEC fueran más actualizados. Por otra parte, debería esta entidad trabajar en conjunto con ARCOTEL para tener unas estadísticas más reales en cuanto al sector de las telecomunicaciones para los futuros proyectos en la industria.
- Con el objetivo de lograr una mejor aproximación con respecto al cálculo de demanda, se propondría una serie de encuestas en las Islas, incluyendo el uso de servicios masivos tales como: internet y telefonía de tipo fijo, corporativo y móvil. Adicionalmente un estudio detallado del tráfico, de esta manera un resultado más acertado podría ser obtenido.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Rubio, *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, Buenos Aires: RA-MA, 1994.
- [2] O. Jaya, *Diseño, simulación y análisis socioeconómico y técnico para la implementación de un enlace óptico submarino entre el Ecuador continental y el Archipiélago de Galápagos*, Quito, Pichincha, Ecuador, 2017.
- [3] M. S. Jiménez, "*Comunicaciones Ópticas*", diapositivas de IEE7D4, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, semestre 2017-A.
- [4] A. Carballar, "*Comunicaciones Ópticas*", diapositivas de la asignatura de Fundamentos de Comunicaciones Ópticas, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla, 2002.
- [5] H. Young y R. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna Volumen 2*, Décimo segunda Edición. México: Pearson Educación, 2009.
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «"Serie G"». Suplemento 39, Febrero 2006.
- [7] J. Martínez, «Prored,» 29 noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.prored.es/blog/fibra-optica/ventanas-de-transmision/>. [Último acceso: 2 febrero 2019].
- [8] J. Crisp, *Introduction to Fiber Optics*, Segunda Edición. Oxford-England: Newnes, 2001.
- [9] J. M. Senior, "*Optical Fiber Communications*", NDorling Kindersley (India): Prentice-Hall , 2013.
- [10] El cajón del electrónico, «Fibra óptica,» enero 2016. [En línea]. Available: <https://elcajondelectronico.com/fibra-optica/>. [Último acceso: 30 octubre 2019].
- [11] C. Vázquez, *Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos*, Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad CARLOS III, Madrid, 2011.

- [12] B. Guillén, «EL PAÍS - El primer cable submarino de la historia duró solo tres semanas,» 27 mayo 2016. [En línea]. Available: [https://elpais.com/tecnologia/2016/05/27/actualidad/1464352294\\_380991.html](https://elpais.com/tecnologia/2016/05/27/actualidad/1464352294_380991.html). [Último acceso: 2 abril 2019].
- [13] «Submarine Cable Map,» 6 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.submarinecablemap.com/#/>. [Último acceso: 8 marzo 2019].
- [14] «cable-submarino - Periódico elDinero,» 2 diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.eldinero.com.do/18413/cables-submarinos-competencia-ahogada-bajo-el-mar/cable-submarino/>. [Último acceso: 12 abril 2019].
- [15] J. A. Martín, *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, Primera Edición. Madrid-España: Prentice Hall, 2004.
- [16] P. G. E. M. Elvis Gaona, «Dispositivos de conmutación óptica en redes de nueva generación,» enero 2013. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/309117105\\_Dispositivos\\_de\\_conmutacion\\_optica\\_en\\_redes\\_de\\_nueva\\_generacion/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/309117105_Dispositivos_de_conmutacion_optica_en_redes_de_nueva_generacion/figures?lo=1). [Último acceso: 31 octubre 2019].
- [17] A. Rodriguez, «Tipos de conectores de fibra óptica,» 14 mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.fibraopticahoy.com/tipos-conectores-fibra-optica/>. [Último acceso: 31 octubre 2019].
- [18] Grupo cofitel, «Conectorización de cables de Fibra Óptica,» 11 marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.c3comunicaciones.es/conectorizacion-de-cables-de-fibra-optica/>. [Último acceso: 30 octubre 2019].
- [19] Silex Fiber, «Tipos de conectores Fibra Óptica,» 29 abril 2017. [En línea]. Available: <https://silexfiber.com/tipos-conectores-fibra-optica/>. [Último acceso: 30 octubre 2019].
- [20] SUBCOM, «Delivering, maintaining, and operating the best value undersea networks on the planet» [En línea]. Available: <https://www.subcom.com/>. [Último acceso: 17 mayo 2019].
- [21] L. Blasco, «Cómo trabajan las personas y los robots que reparan los cables de internet ocultos bajo el mar,» BBC Mundo, 15 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40029920>. [Último acceso: 13 mayo 2019].

- [22] A. Gutiérrez, «¿Cómo se repara un cable submarino de telecomunicaciones?,» Blogthinkbig.com - Telefonica, 3 diciembre 2012. [En línea]. Available: <https://blogthinkbig.com/reparacion-cable-submarino>. [Último acceso: 19 mayo 2019].
- [23] «Rami Arieli: "The Laser Adventure",» 2015. [En línea]. Available: <https://www.um.es/LEQ/laser/Ch-6/F6s3p13.htm>. [Último acceso: 18 mayo 2019].
- [24] Conectronica , «Amplificadores Ópticos Raman,» 1 julio 2009. [En línea]. Available: <https://www.conectronica.com/redes-industriales/amplificadores-opticos-raman>. [Último acceso: 30 octubre 2019].
- [25] Huawei, "*Technical White Paper on Transmission*", Shenzhen, China, 2018.
- [26] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «INEC,» 10 noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/galapagos-tiene-25-244-habitantes-segun-censo-2015/>. [Último acceso: 22 junio 2019].
- [27] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, *Análisis de resultados definitivos Censo de Población y Vivienda Galápagos 2015*, Quito, 2015.
- [28] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, «Reserva de la Biosfera Archipiélago de Colón - Galápagos (Ecuador),» [En línea]. Available: <https://es.unesco.org/biosphere/lac/galapagos>. [Último acceso: 15 junio 2019].
- [29] El telégrafo, «Islas Galápagos salen de la lista de patrimonio en peligro,» 8 septiembre 2016.
- [30] El Comercio, «Galápagos es único, no necesita otro título,» 23 junio 2009.
- [31] Asamblea Nacional de la República del Ecuador, *Segun Registro Oficial Suplemento No. 520*, Quito, 11 de junio del 2015.
- [32] Presidencia de la República del Ecuador , *Reglamento Ley de Régimen Especial de la provincia de Galápagos*, Quito, 21 de abril de 2017.
- [33] B. X. Delgado, «Gente en Galápagos - Aspectos sobre la población humana en las Islas Galápagos,» Geoportal Fundación Charles Darwin, 2018. [En línea]. Available:

<https://fcdgps.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=1a84781794794a4f857470558ec1e11f>. [Último acceso: 14 mayo 2019].

- [34] Dirección del Parque Nacional Galápagos, «Informe Primer Semestre 2019 - Visitantes a las áreas protegidas de Galápagos,» primer semestre 2019. [En línea]. Available: [http://www.galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/08/informe\\_visitantes\\_semestral\\_2019.pdf](http://www.galapagos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/08/informe_visitantes_semestral_2019.pdf). [Último acceso: 27 junio 2019].
- [35] C. Klassen, «METRO JOURNEYS,» enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.metrojourneys.com/es/cuanto-tiempo-deberia-durar-mi-paquete-a-las-islas-galapagos/>. [Último acceso: 23 junio 2019].
- [36] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, *Memoria Estadística Galápagos 2017*, Quito, 2017.
- [37] Redacción Expreso, «El turismo también pende del servicio de Internet,» *Expreso*, 7 diciembre 2016.
- [38] INEC, «Tecnologías de la Información y Comunicación-TIC,» [En línea]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/tecnologias-de-la-informacion-y-comunicacion-tic/>. [Último acceso: 2018].
- [39] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Datos de Cuentas y de Usuarios estimados de Internet por Provincia,» Quito, 2018.
- [40] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «Boletín Estadístico Cierre 2018,» Quito, 2018.
- [41] Corporación Nacional de Telecomunicaciones, 2019. [En línea]. Available: <https://www.cnt.gob.ec/>. [Último acceso: 29 julio 2019].
- [42] C. Tipantuña, "*Televisión Digital*", diapositivas de IEE7S3, Departamento de Electrónica. Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, semestre 2016-B.
- [43] M. Vinuesa, *Telemática I*, diapositivas de IEE6T4, Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional, semestre 2017-A.

- [44] Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, *Carta Náutica I.O.A. 4*, Guayaquil: Instituto Geográfico Militar, 2014.
- [45] ITU-T, «Characteristics of optically amplified optical fibre submarine cable systems». Suiza Patente G.977, enero 2015.
- [46] ITU-T, «Definition of terms relevant to optical fibre submarine cable systems». Suiza Patente G.972, noviembre 2016.
- [47] ITU-T, «Characteristics of a single-mode optical fibre and cable». Suiza Patente G.652, noviembre 2016.
- [48] ITU-T, «Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable». Suiza Patente G.653, julio 2010.
- [49] ITU-T, «Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable». Suiza Patente G.654, noviembre 2016.
- [50] ITU-T, «Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable». Suiza Patente G.655, noviembre 2009.
- [51] ITU-T, «Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport». Suiza Patente G.656, julio 2010.
- [52] ITU-T, «Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable». Suiza Patente G.657, noviembre 2016.
- [53] ITU-T, «Characteristics of optical fibre submarine cables». Suiza Patente G.978, julio 2010.
- [54] A. Markow, *Summary of Undersea Fiber Optic Network Technology and Systems*, Terremark, 2016.
- [55] R. Álvarez, *Cable submarino; Conexión DWDM entre continentes*, Madrid, España, 2017.
- [56] Submarine communications cable - Howling Pixel, «Howlingpixel.com,» 2019. [En línea]. Available: [https://howlingpixel.com/i-en/Submarine\\_communications\\_cable](https://howlingpixel.com/i-en/Submarine_communications_cable). [Último acceso: 18 octubre 2019].

- [57] Huawei Marine, «Dry Plant and Wet Plant Products,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.huaweimarine.com/en/Products>. [Último acceso: 15 septiembre 2019].
- [58] Xtera, «Products & Services,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.xtera.com/products-services/>. [Último acceso: 16 septiembre 2019].
- [59] Padtec, "*MultiPad MPD-1200 Compact Optical Transport Solution*", Sao Paulo, Brasil, 2019.
- [60] ITU-T, «Design guidelines for optical fibre submarine cable systems». Suiza Patente G. Supplement 41, febrero 2018.
- [61] N. M. S. H. Luis Arredondo, "*Diseño y optimización del enlace de comunicaciones entre Los Cabos y Puerto Vallarta por medio de fibra óptica submarina*", México, 2008.
- [62] M. Y. Daniel Campoverde, "*Análisis de alternativas de conectividad y diseño de la ruta final de fibra óptica para enlazar las Islas Galápagos al continente*", Guayaquil: ESPOL, 2017.
- [63] ABC CIENCIA, «Cómo se instalan los cables submarinos,» 29 abril 2013. [En línea]. Available: [Cómo se instalan los cables submarinos](#). [Último acceso: 5 noviembre 2019].
- [64] "ARISTOS diccionario ilustrado de la lengua española", Barcelona: Editorial Ramon Sopena, S.A., 1982.
- [65] Ramsar, «LOS SITIOS RAMSAR,» [En línea]. Available: <https://www.ramsar.org/es/sitios-paises/los-sitios-ramsar>. [Último acceso: 20 junio 2019].

# ANEXOS

ANEXO A Proceso de Instalación del Cable Submarino - animación Subcom

ANEXO B Proceso de Reparación del Cable Submarino – animación Subcom

ANEXO C Ejemplo de Presupuesto de Potencias

ANEXO D Carta Náutica I.O.A. 4

ANEXO E Curvas de Longitud de onda vs. Ganancia para diferentes potencias de entrada en amplificadores ópticos

ANEXO F Atributos de la fibra y el cable para la norma ITU-T G.656

ANEXO G *Datasheets* de la marca Xtera

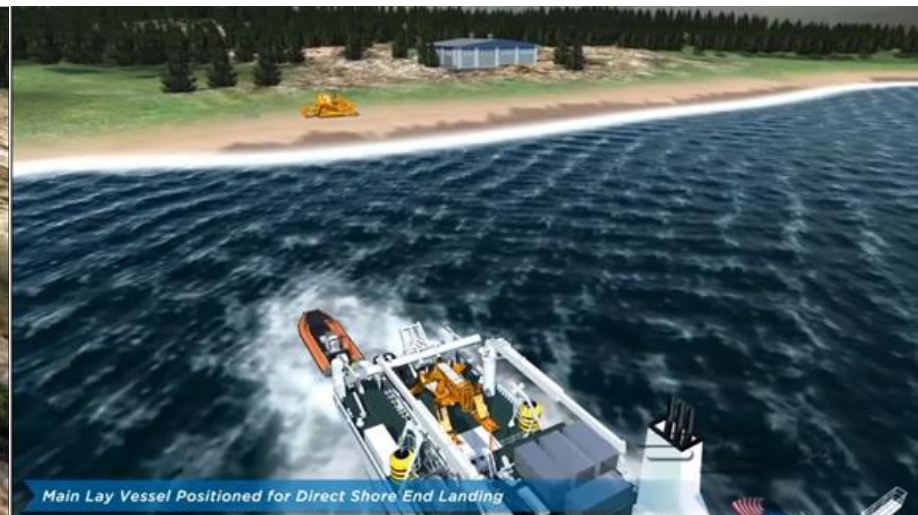
ANEXO H Especificaciones técnicas de MultiPad MPD-1200

ANEXO I Especificaciones técnicas del cable OACL4 de Alcatel



# ANEXO A

## Proceso de Instalación del Cable Submarino - animación Subcom





Commence Shore End Pull from Cable Ship



Commence Main Cable Lay

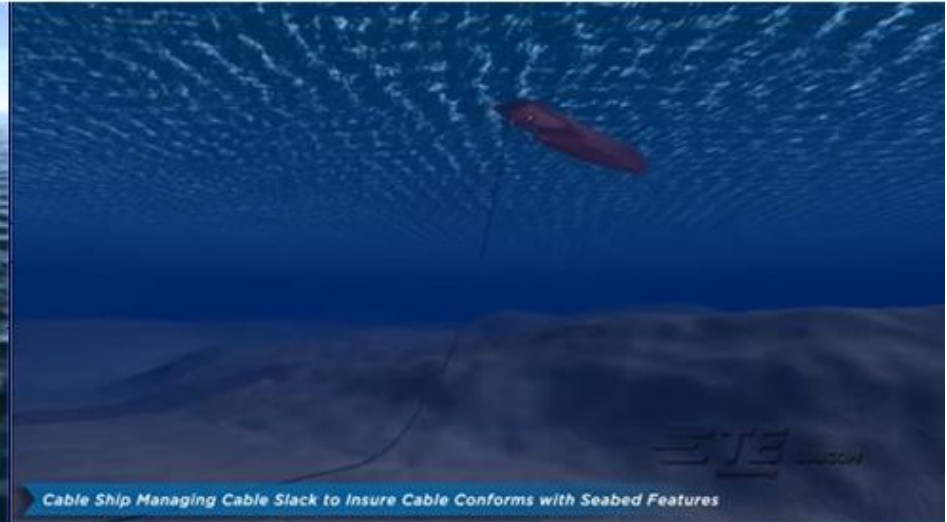


Commence Sea Plow Burial and Plow Grading into Seabed

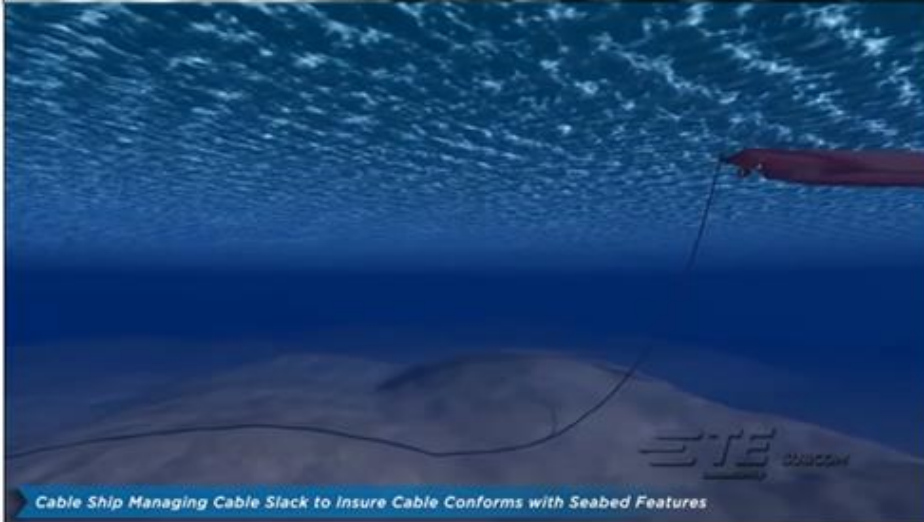


Repeater Deployment

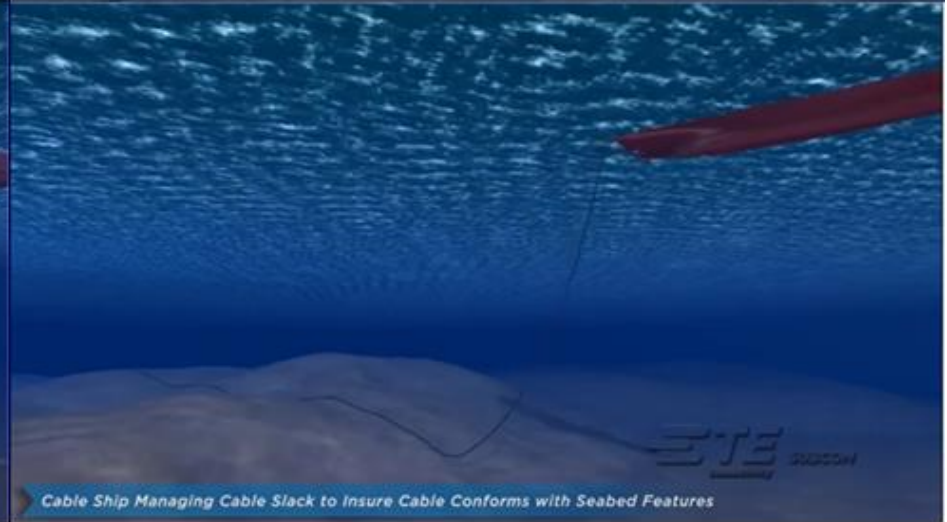




Cable Ship Managing Cable Slack to Insure Cable Conforms with Seabed Features



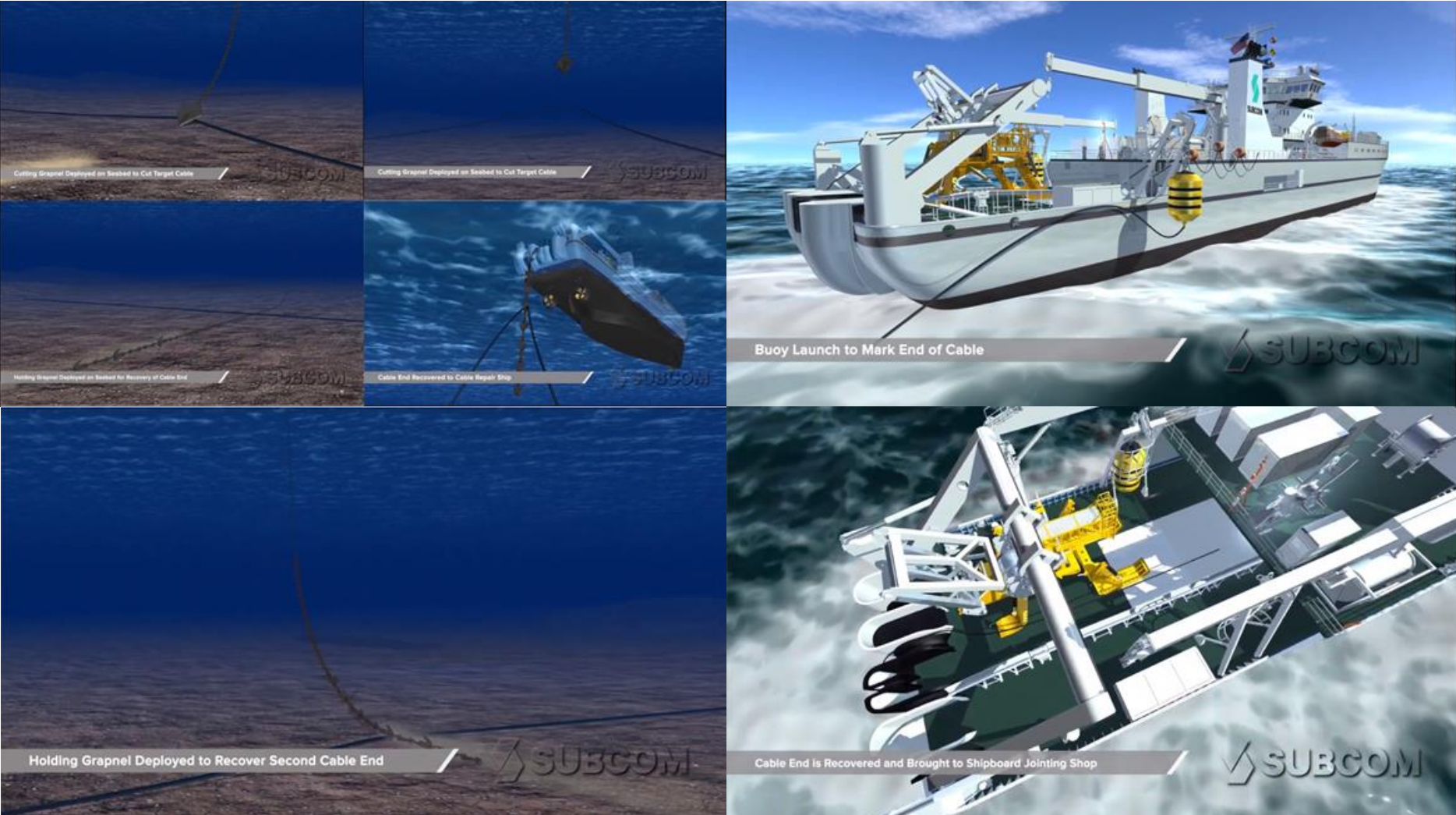
Cable Ship Managing Cable Slack to Insure Cable Conforms with Seabed Features



Cable Ship Managing Cable Slack to Insure Cable Conforms with Seabed Features

# ANEXO B

## Proceso de Reparación del Cable Submarino – animación Subcom





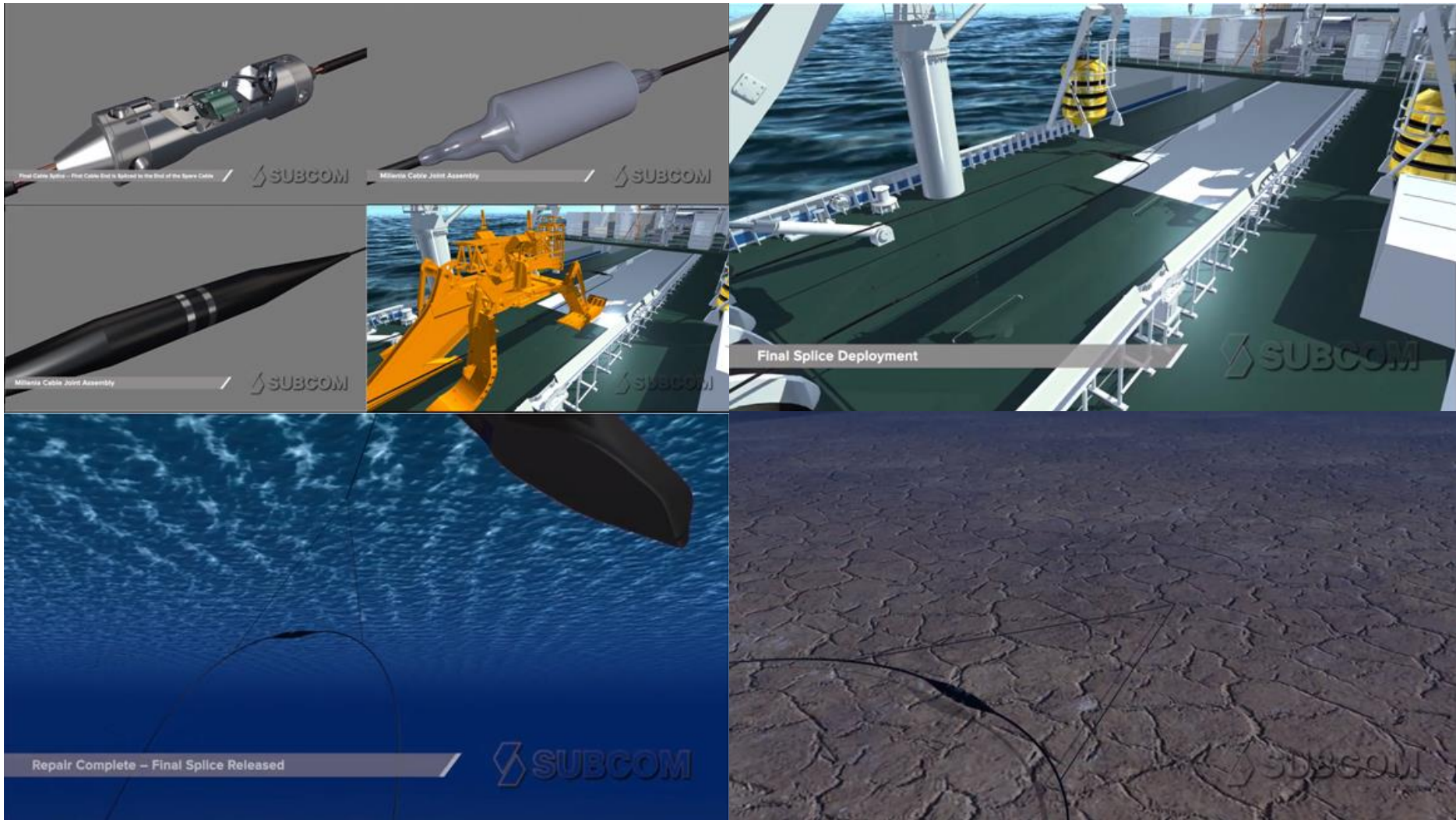


Cable Repair Ship is Positioned to Recover Buoy and First Cable End



Cable Ship Using Dynamic Positioning to Maneuver







## ANEXO C

### Ejemplo de Presupuesto de Potencias

Calcular la mínima potencia de transmisión necesaria en el sistema de la Figura 1, donde se tienen los siguientes datos:

Atenuación en la fibra  $L_{FO}$ : 3.5 dB/km

Pérdidas por pareja de conectores  $L_C$ : 1 dB/conector

Pérdidas por empalmes  $L_{EMP}$ : 0.2 dB/empalme

Sensibilidad del receptor: -25 dBm

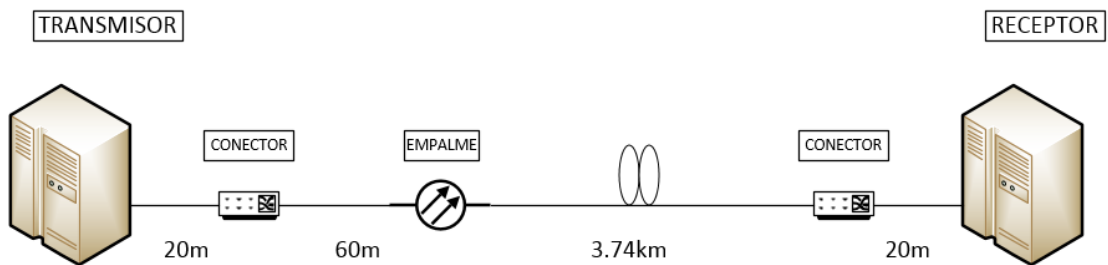


Figura 1. Esquema del ejemplo, adaptado de [8]

Como primer paso se debe obtener el total de la distancia, para conocer la atenuación total en el cable de fibra, sumando las distancias de cada tramo.

$$D_{total} = 20 \text{ m} + 60 \text{ m} + 3740 \text{ m} + 20 \text{ m}$$

$$D_{total} = 3840 \text{ m} \text{ ó } 3.84 \text{ km}$$

Para la atenuación total se tiene:

$$L_{FO} = \text{coeficiente de atenuación} \cdot D_{total}$$

$$L_{FO} = 3.5 \frac{\text{dB}}{\text{km}} \cdot 3.84 \text{ km}$$

$$L_{FO} = 13.44 \text{ dB}$$

Para los conectores, se tiene uno después del transmisor y otro antes del receptor:

$$L_{conectores} = 1 \frac{\text{dB}}{\text{conector}} \cdot 2 \text{ conectores}$$

$$L_{conectores} = 2 \text{ dB}$$

Se tiene un solo empalme en el sistema, por lo que:

$$L_{empalme} = 0.2 \text{ dB}$$

Para obtener el valor de las pérdidas totales se suman todas las pérdidas presentes en el sistema, de esta manera:

$$L_{total} = L_{FO} + L_{conectores} + L_{empalmes}$$

$$L_{total} = 13.44 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 0.2 \text{ dB}$$

$$L_{total} = 15.64 \text{ dB}$$

Debido a las características del enlace, el valor del margen de seguridad para el ejercicio se tomará como 4.5 dB y no se hará uso de amplificadores por la corta distancia. Una vez obtenidos todos los datos necesarios, se puede calcular el valor requerido de potencia de transmisión, haciendo uso de la Ecuación 1.23, como se muestra a continuación:

$$Potencia_{TX} - 15.64 \text{ dB} + 0 \text{ dB} = -25 \text{ dBm} + 4.5 \text{ dB}$$

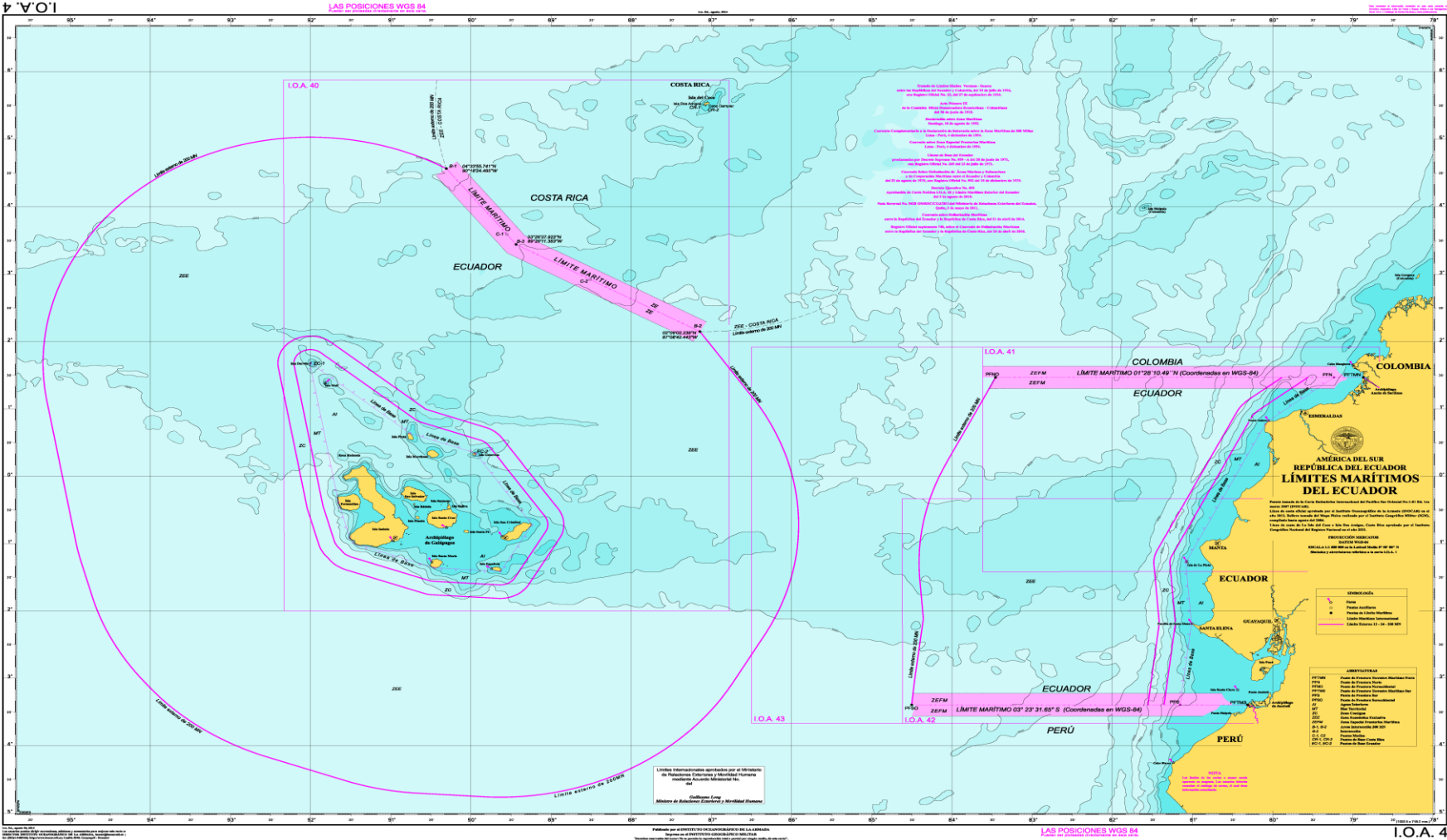
$$Potencia_{TX} = -4.86 \text{ dBm} \quad \text{ó} \quad 326.6 \text{ uW}$$

De esta manera, se puede observar que la potencia requerida en transmisión para asegurar la llegada de la señal sin problemas al receptor tiene que ser mayor a 326.6 uW, ya que si se toma dicho valor corre el riesgo de no llegar al umbral de recepción.

**NOTA:** El rango dinámico del detector y la potencia óptica de salida de la fuente son valores indispensables para este tipo de cálculos, debido a que con estos se pueden conocer las potencias adecuadas- para tener un buen nivel de señal. En base a esto se puede tomar la decisión de colocar amplificadores o atenuadores, según sea el caso y siempre comprobando con la Ecuación 1.23.

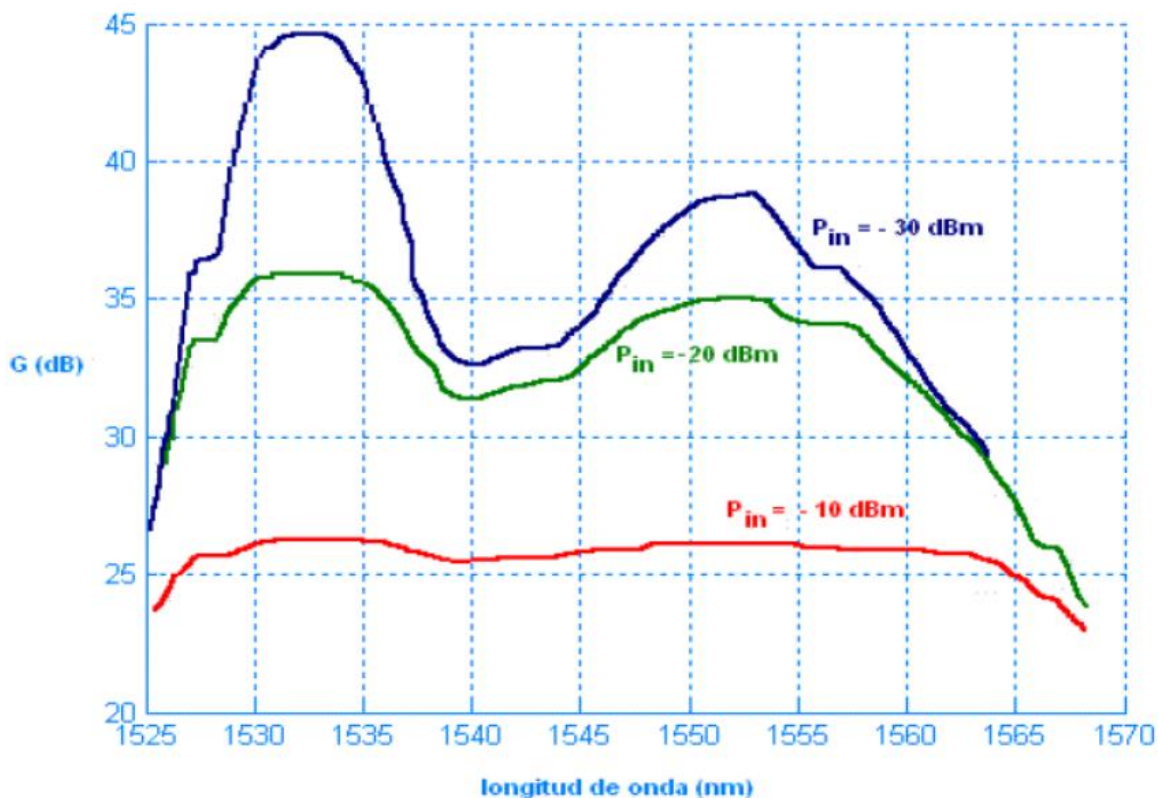
# ANEXO D

## Carta Náutica I.O.A. 4



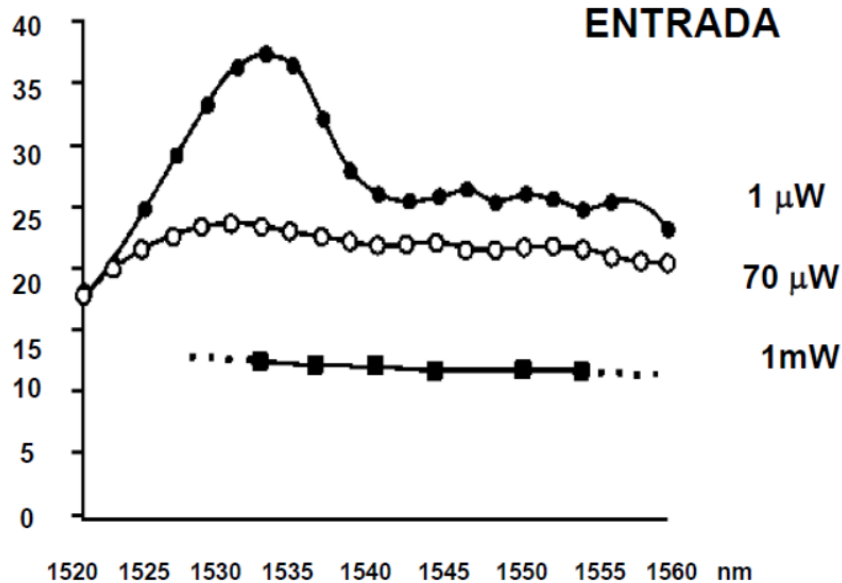
## ANEXO E

Curvas de Longitud de onda vs. Ganancia para diferentes potencias de entrada en amplificadores ópticos [3]



Ganancia (dB)

POTENCIA DE ENTRADA



Equivalencias: 1  $\mu\text{W}$  = -30 dBm, 70  $\mu\text{W}$  = -21.55 dBm y 1 mW = 0 dBm

## ANEXO F

### Atributos de la fibra y el cable para la norma ITU-T G.656

Table 1 – ITU-T G.656 attributes

| Fibre attributes   |                                    |  |
|--|------------------------------------|--|
| Attribute  | Detail                             | Value                                    |
| Mode field diameter  | Wavelength                         | 1550 nm                                  |
|  | Range of nominal values            | 7.0-11.0 $\mu\text{m}$                   |
|  | Tolerance                          | $\pm 0.7 \mu\text{m}$                    |
| Cladding diameter  | Nominal                            | 125.0 $\mu\text{m}$                      |
|  | Tolerance                          | $\pm 1 \mu\text{m}$                      |
| Core concentricity error   | Maximum                            | 0.8 $\mu\text{m}$                        |
| Cladding non-circularity   | Maximum                            | 2.0%                                     |
| Cable cut-off wavelength   | Maximum                            | 1450 nm                                  |
| Macrobend loss   | Radius                             | 30 mm                                    |
|  | Number of turns                    | 100                                      |
|  | Maximum at 1625 nm                 | 0.50 dB                                  |
| Proof stress   | Minimum                            | 0.69 GPa                                 |
| Chromatic dispersion coefficient<br>(ps/nm · km)<br>(Note 1)   | $D_{\min}(\lambda)$ : 1460-1550 nm | $\frac{2.60}{90}(\lambda - 1460) + 1.00$ |
|  | $D_{\min}(\lambda)$ : 1550-1625 nm | $\frac{0.98}{75}(\lambda - 1550) + 3.60$ |
|  | $D_{\max}(\lambda)$ : 1460-1550 nm | $\frac{4.68}{90}(\lambda - 1460) + 4.60$ |
|  | $D_{\max}(\lambda)$ : 1550-1625 nm | $\frac{4.72}{75}(\lambda - 1550) + 9.28$ |
| Uncabled fibre PMD coefficient   | Maximum                            | (Note 2)                                 |
| Cable attributes   |                                    |  |
| Attribute  | Detail                             | Value                                    |
| Attenuation coefficient<br>(Note 3)  | Maximum at 1460 nm                 | 0.4 dB/km                                |
|  | Maximum at 1550 nm                 | 0.35 dB/km                               |
|  | Maximum at 1625 nm                 | 0.4 dB/km                                |
| PMD coefficient  | M                                  | 20 cables                                |
|  | Q                                  | 0.01%                                    |
|  | Maximum PMD <sub>Q</sub>           | 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$              |
| NOTE 1 – If a Raman pump is used outside this wavelength region, fibre properties must be suitable for accommodating this pump.  |                                    |  |
| NOTE 2 – According to clause 6.2, a maximum PMD <sub>Q</sub> value on uncabled fibre is specified in order to support the primary requirement on cabled PMD <sub>Q</sub> .   |                                    |  |
| NOTE 3 – The attenuation coefficient values listed in this table should not be applied to short cables such as jumper cables. For example, [b-IEC 60794-2-11] specifies the attenuation coefficient of indoor cable as 1.0 dB/km or less at both 1310 and 1550 nm. |                                    |  |

## ANEXO G

### Datasheets de la marca Xtera

#### Especificaciones de Nu-Wave Optima™ Platform

|   |  |
|---|--|
| <b>Terminal:</b>                          |  |
| <b>Client Interfaces Available</b>        | GbE, OC-48/STM-16<br>10 GbE LAN & WAN PHY<br>STM-64/OTU2/2e<br>100GbE/OTU4   |
| <b>Line Interfaces Available</b>          | 200Gbit/s, 150Gbit/s, 100 Gbit/s per wave.<br>Software-defined Polarisation-Multiplexed QPSK, 8QAM and 16QAM modulation formats        |
| <b>Wavelength Range</b>                   | C-Band and L-Band<br>Flexible Line Unit, grid tuneable across the entire bandwidth<br>37.5GHz, 40GHz and 50 GHz wavelength grids       |
| <b>Other Network Elements:</b>            |  |
| <b>ROADM / Multi-degree node</b>          | <10 FIT per amplifier pair<br>2 to 8 degrees,<br>Colorless, directionless  |
| <b>Intermediate Line Amplifiers (ILA)</b> | EDFA, hybrid EDFA/Raman, and all-Raman amplifiers  |
| <b>Performance:</b>                       |  |
| <b>FEC</b>                                | High gain Soft-Decision FEC 25% Overhead, 5.4 dB Q at BER ≤ 1E-15  |
| <b>Protection</b>                         | EDFA based Amplifier with redundant controllers and pumps for increased reliability.<br>1+1 and N+1 optical channel protection options |
| <b>Management:</b>                        |  |
| <b>NMS</b>                                | Fully featured Management System, supporting all Optima NEs, Repeater, BU and PFE management from a single application.                |
| <b>Northbound Interface</b>               | Netcool<br>SNMP<br>SOAP/XML  |
| <b>Craft Interfaces</b>                   | Java-based GUI with both local and remote access   |
| <b>Physical:</b>                          |  |
| <b>Rack dimensions</b>                    | 600mm (W) x 300mm (D) x 2200mm (H) ETSI rack   |
| <b>Footprint</b>                          | Up to 6Tb/s of capacity in one rack, power consumption < 6000W, weight < 300kg   |
| <b>Compliance:</b>                        |  |
|   | GR-63-CORE (NEBS), Zone 4 seismic, ETS 3 0-019-1, RoHS   |
| <b>EMI/EMC</b>                            | FCC Part 15, Class A,<br>EN50082-1, EN61000-4  |
| <b>Optical safety</b>                     | 21CFR1040.10, 21CFR1040.11,<br>IEC60825-1, IEC60825-2  |

### Especificaciones de Line Monitoring Equipment – Active (LME-A)

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Transmit:</b>            |   |
| <b>Wavelength</b>           | <i>C-band (1530 – 1568nm)<br/>[Modulated by 1457-nm Raman pump]</i> |
| <b>Optical Hazard Level</b> | <i>1M</i>   |
| <b>Modulation Depth</b>     | <i>1 - 30 %</i>   |
| <b>Carrier Frequency</b>    | <i>48 – 500kHz</i>  |
| <b>Data rate</b>            | <i>1000 – 3900 bps</i>  |
| <b>Receive :</b>            |   |
| <b>Wavelength</b>           | <i>C-band (1530 – 1568nm)</i>                                       |
| <b>Optical Level</b>        | <i>-36 to -16dBm</i>  |
| <b>Modulation Depth</b>     | <i>1 - 30 %</i>   |
| <b>Carrier Frequency</b>    | <i>12.5 – 62.5kHz</i>   |
| <b>Data rate</b>            | <i>16 – 1100 bps</i>  |

### Especificaciones de Line Monitoring Equipment – Active (LME-P)

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Transmit / Receive:</b>  |   |
| <b>Wavelength</b>           | <i>C-band (1530 – 1568nm)</i>                       |
| <b>Optical Hazard Level</b> | <i>1M</i>   |
| <b>Optical Power Level</b>  | <i>-4 - +4dBm (at output of LME-P circuit pack)</i> |
| <b>Modulation Depth</b>     | <i>100 %</i>  |
| <b>Carrier Frequency</b>    | <i>2.0MHz</i>                                       |
| <b>Scanning Period</b>      | <i>5 – 1200s</i>                                    |

## Especificaciones de Nu-Wave Network Management System (NMS)

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Server:</b>                |   |
| <b>Software</b>               | All Java based application<br>Oracle Database<br>Tomcat Webserver   |
| <b>Northbound Interfaces</b>  | XML/SOAP, SNMP, TL1   |
| <b>Southbound Interfaces</b>  | TL1, SNMP, XML  |
| <b>Minimum Hardware Specs</b> | 3.0 GHz processors<br>16GB Memory<br>300GB Hard Drive Space   |
| <b>Supported OS Platforms</b> | Oracle Solaris 10g<br>RedHat Linux 6.5 or later   |
| <b>Client:</b>                |   |
| <b>Network Manager</b>        | Java based application supporting all Optima NEs, Repeater, BU and PFE management from a single application. Installer can be downloaded from the NMS web page. |
| <b>Administration Client</b>  | Java based application for Windows XP/7/10<br>Installer can be downloaded from NMS Web page.  |
| <b>Craft Interfaces</b>       | Java-based application supporting local and remote access over TCP/IP.<br>Installer can be downloaded from the NE web page.                                     |



## Especificaciones de NMS Server de Nu-Wave Network Management System (NMS)

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Server:</b>                |   |
| <b>Software</b>               | All Java based application<br>Oracle Database<br>Tomcat Webserver   |
| <b>Northbound Interfaces</b>  | XML/SOAP, SNMP, TL1   |
| <b>Southbound Interfaces</b>  | TL1, SNMP, XML  |
| <b>Minimum Hardware Specs</b> | 3.0 GHz processors<br>16GB Memory<br>300GB Hard Drive Space   |
| <b>Supported OS Platforms</b> | Oracle Solaris 10g<br>RedHat Linux 6.5 or later   |
| <b>Client:</b>                |   |
| <b>Network Manager</b>        | Java based application supporting all Optima NEs, Repeater, BU and PFE management from a single application. Installer can be downloaded from the NMS web page. |
| <b>Administration Client</b>  | Java based application for Windows XP/7/10<br>Installer can be downloaded from NMS Web page.  |
| <b>Craft Interfaces</b>       | Java-based application supporting local and remote access over TCP/IP.<br>Installer can be downloaded from the NE web page.                                     |

## Especificaciones Repetidor Xtera

| Parameter                                       | Value, Range or Comment   |
|---|---|
| Design Lifetime                                 | 25 years  |
| Reliability                                     | <10 FIT per amplifier pair  |
| Number of fibre pairs                           | 1-8 pairs   |
| C+L Maximum wavelength range*                   | 70 nm   |
| C+L Maximum output power*                       | +17 dBm   |
| C+L Effective Noise Figure (NF)                 | ≤4 dB   |
| C Maximum wavelength range*                     | 40 nm   |
| C Maximum output power *                        | +16 dBm   |
| C Effective Noise Figure (NF)                   | ≤3 dB   |
| Maximum Voltage                                 | 7.5 kV  |
| Insulation resistance                           | >10,000 M ohm at 500V   |
| Operating current                               | 0.7-1.1 A, either polarity  |
| Operating voltage (approx.)                     | 3 V + 20 V per amplifier-pair   |
| Electroding pass-band                           | 4 to 50Hz, attenuation ≤ 0.18 dB  |
| Current   | Up to 200 mA  |
| Maximum water depth                             | 8,000 metres  |
| Tensile strength                                | 600 kN coupling to coupling<br>Terminations exceed cable breaking load  |
| Weight in air                                   | <100 kg, for the housing & transport packing<br>~170 kg, with un-armoured terminations<br>~230 kg, with armoured terminations |
| Diameter of Housing (maximum)                   | 170 mm at widest point  |
| Length of housing                               | 980 mm  |
| Length including terminations and bend-limiters | 4560 mm, with un-armoured terminations<br>4070 mm, with armoured terminations<br>for 4 pairs; add ~230 mm for 6 pairs         |
| Temperature                                     | On the outside of the sea-case  |
| Operating                                       | -05° to +35° C in water   |
| Storage and/or Transportation                   | -40° to +70° C in air   |
| Supervisory Type                                | Command / Response  |
| - Received light level                          | - monitor   |
| - Transmit light level                          | - monitor   |
| - Short-term power drop                         | - flag occurrence   |
| - Pump current                                  | - monitor   |
| - Pump failure                                  | - flag occurrence   |
| - Power setting                                 | - adjust  |
| - Acceleration                                  | - flag occurrence   |
| - Amplifier temperature                         | - measure   |

# ANEXO H

## Especificaciones técnicas de MultiPad MPD-1200

### MultiPad MPD-1200 Compact Optical Transport Solution

#### MultiPad MPD-1200 Application

- Wavelength conversion to ITU-T DWDM grid
- Increasing transmission distance of several protocol, as Gigabit Ethernet, ATM, ESCON, SDH, Fibre Channel and others
- Optical link extension, including access (example: PON), Long-Haul and Ultra Long-Haul networks
- Eliminates the need for intermediary repetition
- Compatibility with OPGW, land and submarine cables
- DWDM application or single wavelength transport
- Complete management and system operation through an integrated WEB application
- Modular expansion and interoperability with LightPad® Platform
- Interoperability with multi-vendor system, allowing DWDM expansion independently of supplier

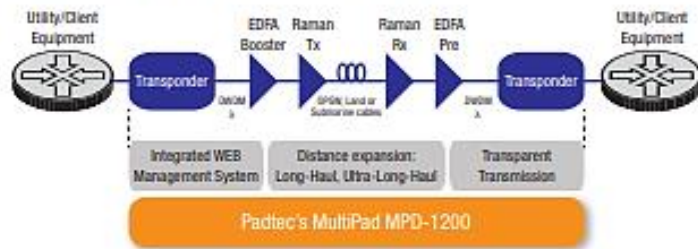
2

Padtec's MultiPad MPD-1200 is an integrated optical transport system comprised by one chassis joining Transponders, Amplifiers and Supervision. This integration allows operation flexibility and system's modular expansion, besides performing high performance to optical networks.

Developed on a high density and compact unit, MultiPad MPD-1200 offers an economic and efficient solution in wavelength conversion and optical signal amplification, allowing longer fiber spans in optical communications systems. The solution is transparent to transmission protocols and rates, assuring flexible applications in optical networks.

Besides being fully compatible with OPGW and Submarine cables, MultiPad MPD-1200 supports several network architectures and configurations using interchangeable modules, reducing the number of spare parts and increasing business competitiveness.

Padtec's MultiPad Platform is the best option to the telecommunications and utilities companies seeking robustness and performance in service providing, optimizing CAPEX and reducing OPEX.



#### Green Technology

Besides offering a compact solution, MultiPad MPD-1200 is totally in line with the latest environmental trends. All solutions provided by Padtec optimizes power consumption offering an excellent cost-benefit to optical transport merging high capacity and energy efficiency.



## MPD-1200 Technical Specifications



### Wavelength Conversion Characteristics (Transponder)

- Conversion to 1550 nm grid, according to ITU-T G.694.1
- Available Models:
  - 2R Terminal (100 Mbps up to 2.7 Gbps)
  - 3R Terminal (12 Mbps up to 2.7 Gbps)
  - 2x1 Combiner G.709: Aggregates 2 SFP client interfaces into one OTU1 (2.7 Gbps) DWDM interface
  - 8x1 Combiner G.709: Aggregates 8 SFP client interfaces into one OTU2 (10.7 Gbps) DWDM interface
  - Multirate 10 Gbps Terminal
  - Multirate 10 Gbps Terminal G.709
- Channel at C or L Band
- Lasers with integrated modulation
- Long-Haul APD reception

### Amplification Characteristics

- Booster, Pre-Amplifier, Raman and ROPA (Remote Pump)
- Amplifies entire Band C or L
- Allows in-service optical monitoring
- Automatic Gain Control feature: Constant gain to channels, independently of channels addition/removal
- Gain Flattening Filter feature: Flatness to amplifier's gain profile

### General Features

- Supports management through Dry Contact alarms
- WEB GUI management allowing status reporting, telecommands, measurement and settings

### Physical Dimensions and Conditions

- Optical Connectors: LC-APC
- Height: 44 mm (1U)
- Width: 442 mm
- Depth: 236 mm
- Power Supply: -48 VDC (with Source redundancy)
- Operating Temperature: -5°C to +45°C
- Maximum humidity: 90%

### 850 nm Client Interface

|              | GbE or 1G FC   | 2G FC |
|--------------|----------------|-------|
| Sensitivity  | -17 dBm        |       |
| Saturation   | 0 dBm          |       |
| Output Power | -9.5 to -4 dBm |       |

### 1310 nm Client Interface

|              | STM-1         | STM-4 | GbE     | STM-16  |
|--------------|---------------|-------|---------|---------|
| Sensitivity  | -23 dBm       |       | -19 dBm | -18 dBm |
| Saturation   | -8 dBm        |       | -3 dBm  |         |
| Output Power | -10 to -3 dBm |       |         |         |

### DWDM Interface

|                    | STM-1                          | STM-4   | GbE/FC  | 2G FC   | STM-16  |
|--------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Sensitivity        | -41 dBm                        | -33 dBm | -31 dBm | -28 dBm | -27 dBm |
| Saturation         | -8 dBm                         |         |         |         |         |
| Output Power       | Min: -1 dBm                    |         |         |         |         |
| Extinction Ratio   | ≥ 5 dB                         |         |         |         |         |
| Maximum dispersion | 10,000 (Integrated Modulation) |         |         |         |         |

### Booster Amplifier (21 or 24 dBm)

|              | Min.                         | Typ.      | Max.          |
|--------------|------------------------------|-----------|---------------|
| Output Power | 20/23 dBm                    | 21/24 dBm | 22.5/25.5 dBm |
| Input Power  | -20 to 10 dBm                |           |               |
| Maximum Gain | 30 dB                        |           |               |
| Noise Figure | 5.5 dB (for a -5 dBm signal) |           |               |

### Pre-Amplifier

|              | Min.                        | Typ.   | Max.     |
|--------------|-----------------------------|--------|----------|
| Output Power | 12 dBm                      | 14 dBm | 15.5 dBm |
| Input Power  | -35 to 5 dBm                |        |          |
| Maximum Gain | 30 dB                       |        |          |
| Noise Figure | 4 dB (for a -35 dBm signal) |        |          |

### MultiPad MPD-1200 Overview

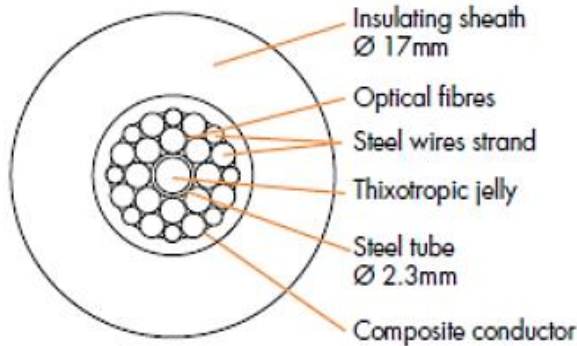
- Flexibility at product application
- High reliability
- Common chassis (sub-rack) supports several configurations, joining Transponders, Amplifiers and Supervision solutions

- Compact chassis (1U)
- Integrated power supply and ventilation (FAN)
- Completely transparent to protocol and transmission rate, performing optical transport from 12 Mbps up to 10 Gbps
- WEB Management System
- Low power consumption and power dissipation

# ANEXO I

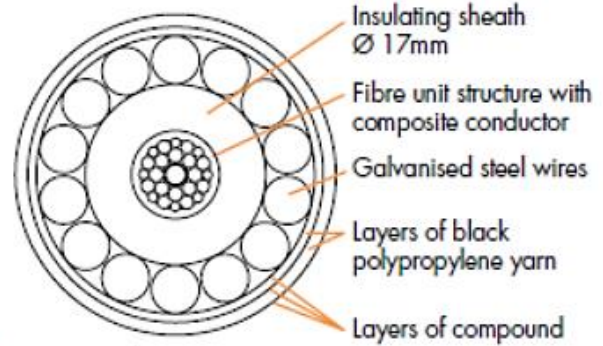
## Especificaciones técnicas del cable OACL4 de Alcatel

### Cable performance



Outer diameter: 17mm

*OALC4 Lightweight Cable (LW)*



Outer diameter: 31mm

*OALC4 Single Armoured Cable (SA)*

|             |      | LW     | LWP    | SAL    | SA     | DA     | RA     |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Performance | Unit | Values | Values | Values | Values | Values | Values |
| NTTS*       | kN   | 50     | 50     | 200    | 250    | 400    | 250    |
| NOTS*       | kN   | 30     | 30     | 150    | 200    | 300    | 200    |
| NPTS*       | kN   | 20     | 20     | 100    | 150    | 200    | 150    |
| UTS*        | kN   | 70     | 70     | 280    | 370    | 560    | 370    |

### Characteristics

|                 |      |      |      |     |     |     |     |
|-----------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Outer diameter  | mm   | 17   | 23   | 28  | 31  | 46  | 46  |
| Weight in air   | kg/m | 0.5  | 0.75 | 2.0 | 2.6 | 7.5 | 7.4 |
| Weight in water | kg/m | 0.27 | 0.33 | 1.4 | 1.8 | 5.7 | 5.6 |

\*NTTS: nominal transient tensile strength

\*NOTS: nominal operating tensile strength

\*NPTS: nominal permanent tensile strength

\*UTS: ultimate tensile strength

# ORDEN DE EMPASTADO