



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

Diseño de un enlace óptico entre la provincia de Santa Elena y las islas Galápagos para proveer servicio de internet con tecnología gepon.

AUTORA:

Bravo Ronquillo, Nelly Azucena

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

5 de Marzo del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la Srta.
Bravo Ronquillo, Nelly Azucena como requerimiento para la obtención del
título de **INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 5 días del mes de marzo del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Bravo Ronquillo, Nelly Azucena**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Diseño de un enlace óptico entre la provincia de Santa Elena y las Islas Galápagos para proveer servicio de internet con tecnología gepon**” previo a la obtención del Título de **Ingeniera en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 5 del mes de marzo del año 2018

LA AUTORA

BRAVO RONQUILLO, NELLY AZUCENA



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Bravo Ronquillo, Nelly Bravo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “**Diseño de un enlace óptico entre la provincia de Santa Elena y las Islas Galápagos para proveer servicio de internet con tecnología gepon**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 5 del mes de marzo del año 2018

EL AUTOR

BRAVO RONQUILLO, NELLY AZUCENA

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento [TESIS_NB.docx](#) (D35973540)
Presentado 2018-02-27 13:12 (-05:00)
Presentado por nelly_20_b@hotmail.com
Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje Tesis Nelly Bravo [Mostrar el mensaje completo](#)
2% de estas 34 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	-
+		Tesis_Diciembre_PBB.Final.docx	<input type="checkbox"/>
+		TT Final HENRY PAUCAR.docx	<input type="checkbox"/>
+	>	https://elpais.com/tecnologia/2016/0...	<input type="checkbox"/>
+		SIMULACION DE UN SISTEMA DWDM E...	<input type="checkbox"/>
+		TEMA DE TESIS FINAL.docx	<input checked="" type="checkbox"/>

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Diseño de un enlace óptico entre la provincia de
Santa Elena y las Islas Galápagos para proveer servicio
de internet con tecnología gepon.

AUTOR: Bravo Ronquillo, Nelly Azucena

Trabajo de titulación previo a

la obtención del grado de INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES

TUTOR: Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador 23 de febrero del 2018

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios por darme tantas oportunidades, y por guiar mi vida por el buen camino, a mis padres por sacrificarse tanto por sus hijos, y ser un ejemplo a seguir, dignos de admiración, por ser los pilares de mi familia, por darnos las herramientas para ser personas de éxito y ser felices en la vida. Gracias padres míos por ser únicos y ser los mejores, los amo tanto, mis hermanos y yo orgullosos de ustedes.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DECANO

f. _____

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NÉSTOR ARMANDO
COORDINADOR DE ÁREA

f. _____

M. Sc. ALVARADO BUSTAMENTE, JIMMY SALVADOR
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Resumen	XIV
CAPÍTULO 1: Generalidades del trabajo de Titulación	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Definición del problema.....	3
1.4 Justificación del problema	3
1.5 Objetivos del Problema de Investigación.....	4
1.5.1 Objetivo General	4
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Hipótesis	4
1.7 Metodología de Investigación.....	4
CAPITULO 2: Fundamentación Teórica.....	5
2.1 Origen del cable submarino.....	5
2.1.1 Antecedentes históricos	5
2.1.2 Cronología.....	8
2.2 Características y componentes de un sistema de fibra óptica	9
2.2.1 Características del cable	10
2.2.2 Características de la fibra.....	14
2.3 El transmisor óptico y los formatos de modulación	15
2.4 Atenuación	18
2.5 Dispersión	19
2.5.1 Dispersión Cromática	21
2.5.2 Dispersión del Material.....	22
2.5.3 Dispersión de guía de Onda.....	22

2.5.4	Dispersión por modo de polarización (PMD)	23
2.5.5	Efectos No lineales.....	24
2.5.6	Dispersión estimulada de Brillouin.....	24
2.5.7	Dispersión estimulada de Raman.....	25
2.6	Propagación de Solitón	26
2.7	Fuentes Ópticas	26
2.7.1	Laser	27
2.7.2	Diodo emisor de luz, LED.....	30
2.8	Detectores Ópticos.....	33
2.9	Amplificadores Ópticos.....	34
2.9.1	Amplificadores de fibra y guía de onda.....	36
2.9.2	Amplificadores de fibra dopados con Erbio	37
2.9.3	Amplificadores de fibra Raman y Brillouin	39
2.9.4	Amplificadores de fibra de banda ancha.....	41
2.10	WDM / DWDM.....	43
CAPITULO 3: Diseño y simulación del Sistema Óptico.....		50
3.1	Descripción y simulación del proyecto.....	50
3.2	Locación geográfica.	50
3.3	Recorrido óptimo de la fibra.	51
3.3.1	Aspectos Naturales.	52
3.3.2	Profundidad del suelo Marino	53
3.4	Componentes del sistema óptico submarino	54
3.4.1	Tramo Terrestre	54
3.4.2	Tramo Marino	55
3.5	Simulación en base a la elección de la fibra	56
3.5.1	Atenuación de la fibra.....	58
3.5.2	Atenuación por empalmes.....	60

3.5.3	Atenuación por inserción de conectores.....	60
3.5.4	Atenuación por inserción.....	60
3.5.5	Atenuación por filtros.....	60
3.5.6	Atenuación de penalización por dispersión	60
3.5.7	Atenuación por envejecimiento.....	60
3.5.8	Margen de pérdidas	61
3.5.9	Atenuación total del enlace óptico	61
3.6	Potencia del Sistema.....	61
3.6.1	Amplificadores.....	61
3.6.2	Potencia de Recepción	62
3.7	Simulación en base a distancia y potencia de Amplificadores	62
CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones		67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	68
Referencia bibliográfica		69

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Mapa fibra óptica submarina.	8
Figura 2. 2: Sistema óptico	9
Figura 2. 3: Aplicación específica.	10
Figura 2. 4: Cable de estructura holgado	12
Figura 2. 5: Cable de estructura densa.	12
Figura 2. 6: Tipos de fibra.	15
Figura 2. 7: Transmisor de formato de señal de retorno a cero (RZ)	16
Figura 2. 8: Formatos de modulación sin retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ).	17
Figura 2. 9: Ampliación de pulsos de luz a medida que se transmiten en la fibra	20
Figura 2. 10: Dispersión del material en función de la longitud de onda	22
Figura 2. 11: Esquema de propagación en una fibra no birrefringente	23
Figura 2. 12: Intensidad de pulso en un período de solitón.	26
Figura 2. 13: Oscilaciones de relajación y el retardo de encendido.	27
Figura 2. 14: Ruido de fase del láser de inyección.	29
Figura 2. 15: Técnicas de acoplamiento.	30
Figura 2. 16: Emisor de superficie LED.	32
Figura 2. 17: Ganancia del ancho de banda de amplificadores ópticos.	35
Figura 2. 18: Esquema de un amplificador de fibra.	36
Figura 2. 19: Aplicaciones del sistema para el amplificador de fibra.	37
Figura 2. 20: Diagramas nivel de energía para láser de fibra sílice dopado con erbio.	38
Figura 2. 21: Rango de longitud de onda para diferentes amplificadores de fibra.	39
Figura 2. 22: Capacidad de bombeo asociada con el amplificador Raman de fibra.	40
Figura 2. 23: Configuraciones de amplificador para proporcionar amplificación AB.	42
Figura 2. 24: Modos de funcionamiento del sistema de fibra óptica (WDM)	44
Figura 2. 25: Asignación de canal de longitud de onda óptica.	46
Figura 2. 26 Esquema de bloque de un sistema DWDM.	46
Figura 2. 27: División espectral de salidas LED para formar canales WDM.	48
Figura 2. 28: Esquema de bloque de una técnica de corte de espectro	49

Capítulo 3

Figura 3. 1: Distancia 1050 km entre el Continente y el Archipiélago.	51
Figura 3. 2: Cordillera submarina de Carnegie y plataforma volcánica de Galápagos	52

Figura 3. 3 50 km, características de la fibra óptica.	57
Figura 3. 4 150 km, Ga y distancia de amplificadores.	63
Figura 3. 5 Enlace de fibra interoceánico entre el continente y Galápagos. .	64
Figura 3. 6 Canal 12	66
Figura 3. 7 Canal 14	66

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Cronología de comunicaciones submarinas8

Tabla 2.2: Características de las estructuras de cable. 13

Tabla 2. 3: Profundidad de aplicación típica, cables submarinos. 14

Capítulo 3

Tabla 3. 1 Tipos de fibras, marca Corning, valores comparativos.57

Tabla 3. 2 Resultados obtenidos Ber – Factor Q.58

Tabla 3. 3 Resultado de BER y factor Q del enlace óptico submarino.65

Resumen

El siguiente trabajo de titulación desarrollado señala un modelo óptimo de enlace submarino para conectar Ecuador continental con el Archipiélago de Galápagos a través del medio de transmisión que es la fibra óptica, para proveer servicios de internet con tecnología gepon, garantizar conectividad de sus habitantes y turistas con el resto del mundo mediante un sistema de calidad, a altas velocidad y con gran capacidad de ancho de banda. Los capítulos referidos en este trabajo de titulación, como en el primero, en sus objetivos plantea mejorar la calidad de conexión a internet del Archipiélago de Galápagos, en el capítulo dos se realizó una amplia investigación de todos sus componentes, activos y pasivos, de un sistema submarino, y en el tercer capítulo en base a la información obtenida, se efectuó una simulación bajo ciertos parámetros dando como resultado que elementos serían los idóneos para garantizar la efectividad y viabilidad del enlace.

Palabras Claves:

WDM, FIBRA OPTICA, SLTE, BER, FACTOR Q, AMPLIFICADOR

CAPÍTULO 1: Generalidades del trabajo de Titulación

1.1 Introducción

La importancia de la tecnología en la humanidad ha brindado grandes avances a lo largo de los años, tanto a nivel de desarrollo socioeconómico como de comunicaciones, nos ha permitido sobrepasar fronteras, globalizarnos.

A medida que la población se incrementa existe una mayor demanda del servicio de telecomunicaciones, se requiere mayor capacidad de ancho de banda, en donde otros enlaces no cumplen con las exigencias de velocidad, transmisión y efectividad del servicio, por lo que el medio de comunicación ha evolucionado para poder satisfacer al usuario, esto hace que se haya desarrollado como medio de transmisión físico la fibra óptica y fibra óptica interoceánica que permite conectar desde regiones hasta continentes.

En nuestro país, en el 2007, se instaló 797 km de fibra desde la provincia de Santa Elena hasta SAm-1, el cual rodea a Sudamérica, llega a Estados Unidos y proporciona enlaces de conectividad, es la única conexión a través del cable panamericano y posee conexiones indirectas por medio de Perú y Colombia.

El desarrollo del tema de titulación señala como será el diseño del enlace óptico a través de fibra interoceánica, los parámetros que se deben considerar tanto físicos como técnicos para su correcto funcionamiento, optimización de los recursos y el servicio, para tener como resultado transmisión eficaz de datos.

La conectividad en las islas es a partir de señal satelital, la cual no abarca la demanda del servicio ya que es un atractivo turístico, una de las 7 maravillas del mundo, y debe tener alta conectividad por lo que el diseño enlazará al continente, en la provincia de Santa Elena, con las islas Galápagos, Santa Cruz, ya que son zonas con gran cantidad de turistas por sus encantadoras

playas y grandes empresarios invierten en zonas hoteleras por lo que se requiere tecnología de punta.

1.2 Antecedentes

El Ecuador ingreso al mundo del internet a través de la fibra óptica en el año de 1999, la conexión con el cable Panamericano en Punta carnero. Luego en el 2007 se culminó los trabajos de un cable de fibra óptica de 4 hilos, a 767 km, a 1200m de profundidad, para poder conectarnos al SAM-1 sistema submarino que conecta a Sudamérica, pasa por EEUU y el Caribe, en la estación de punta carnero, lo que permitió reducir los costos de acceso a internet y mejorar la transmisión de datos, ya que hubo un incremento del ancho de banda.

1.3 Definición del problema

La falta de un enlace óptico entre las islas galápagos con el continente, afecta a la población en la integración con la era tecnológica debido a la ausencia de servicios de internet con alta calidad y velocidad.

1.4 Justificación del problema

En la actualidad se ha migrado gran parte los tipos de enlace a fibra óptica debido a que es más eficiente y permite transmitir con alta calidad y a altas velocidades.

En las Islas Galápagos el único medio de comunicación y vía de transmisión es a través de enlace satelital que genera complicaciones, es frecuente los retardos, perdidas y dependen muchos de las condiciones climáticas, por lo que se implementaría un enlace de fibra óptica interoceánica desde la isla hacia el continente para abastecer a la población con servicio óptimo, de calidad mediante tecnología Gepon.

Implementar un enlace troncal, permitirá realizar diseños Gepon en las diversas islas que beneficiarán a cada uno de los habitantes y a su vez a los miles de turistas que las visitan a diario, mejorara la comunicación, acceso a

internet, se generaran muchas oportunidades de negocios, marketing, turismo, hotelería, se promocionara las islas aún más a nivel internacional.

1.5 Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1 Objetivo General

Realizar el diseño de un enlace óptico a través de una fibra interoceánica entre la provincia de Santa Elena, Punta Carnero, y las Islas Galápagos, San Cristóbal, mediante un simulador, con el fin de proveer servicios de internet con tecnología Gepon.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Señalar los fundamentos técnicos, importancia y tecnología en una red óptica submarina.
- Diseñar la infraestructura de red, y definir las funciones de cada uno de sus componentes al emplear una red óptica.
- Establecer los parámetros y cálculos, mediante un simulador, para mostrar la eficacia del enlace.

1.6 Hipótesis

Al realizar un estudio técnico y diseño de un enlace óptico submarino que conecte las Islas Galápagos con el continente, se ampliará la brecha de comunicación y tecnología implementados en la isla, el acceso a internet, envío de voz, datos, será óptimo, de calidad y a altas velocidades.

1.7 Metodología de Investigación

El método de investigación utilizado en el trabajo de titulación es de tipo deductivo con un enfoque cuantitativo, ya que a través del planteamiento de la hipótesis se puede conectar a las Islas con el resto del mundo, el enlace favorecerá en todo nivel el crecimiento de las mismas y beneficiará a sus habitantes con acceso a internet de alta tecnología, tecnología GEPON.

CAPITULO 2: Fundamentación Teórica

2.1 Origen del cable submarino

2.1.1 Antecedentes históricos

Instalar y mantener cables submarinos de gran alcance y distancia ha sido una operación de rutina durante casi 170 años, cientos de cables de comunicaciones submarinos han sido colocados desde los primeros intentos en la década de 1840 y el primer cable de éxito comercial, el enlace de Inglaterra a Francia en 1851, el cual, el tendido fue de 20 millas(Burns, 2012).

El empresario Cyrus Field de Nueva York propuso un cable Atlantic en 1854, con la ayuda del físico William Thomson decidieron lanzar al océano 3.000 kilómetros de cable submarino desde Foilhommerum Bay, en el oeste de Irlanda, hasta Heart's Content, en el este de la isla de Terranova (Canadá) (Guillén, 2016).

Dos barcos se encontraron en medio de la ruta oceánica, se empalmo uno de sus extremos, y el otro fue dirigido a sus costas respectivamente, se precisó de tres intentos para que se lograra el objetivo con éxito, "Habían elegido esas zonas para desembarcar porque tenían el fondo marino muy llano, no había grandes fosas que pudieran hacer perder mucha cantidad de cable", explica José de la Peña (Peña, 2003).

A cada orilla del Atlántico había unas baterías para asegurar el funcionamiento del cable. Pero, a pesar de los esfuerzos de Field y Thomson, la comunicación era lenta y baja señal, ya que la calidad de los materiales utilizados para fabricar los primeros cables era inconsistente, su teoría de funcionamiento no estaba escrita y los instrumentos transmisores y receptores eran primitivos (Carter, 2012).

A pesar de los grandes pronósticos, el 3 de septiembre de 1858 la gran hazaña tocó su fin. En contra del consejo de Thomson, que abogaba por mejorar la sensibilidad de la conexión en lugar de incrementar la potencia, Field, que era el jefe del proyecto decidió aumentar los voltios de 600 a 2.000.

El sistema, rudimentario todavía, no pudo asumirlo y el cable se rompió(Guillén, 2016).

Luego de 6 años Field, intento instalar el cable en el océano atlántico, con mejor revestimiento, blindaje más robusto y mayor resistencia a la torsión, tomando como referencia de línea del cable anterior, el cual sufrió una ruptura de dos tercios y en 1866, un año después, la compañía Anglo-American Telegraph concluyó con los respectivos trabajos.(Carter, 2012)

Estos primeros cables se generaron más rápidamente. En 1873 llegaron a Singapur, Hong Kong y Sydney. Las islas del Caribe estaban unidas y conectadas al continente; como lo fueron las islas del Mediterráneo oriental y las de las Indias Orientales. El Océano Pacífico fue cruzado en 1901 (por los británicos) y una segunda vez en 1903 (por los estadounidenses). En contraste, el Atlántico abarcó una docena de cables activos en el cambio de siglo y veintiuno a fines de los años veinte (Dibner, 2012).

Las telecomunicaciones fueron avanzando de manera constante, hasta la evolución de la fibra óptica, en la década de 1960, se hizo evidente que la fibra óptica sería barata y flexible. Lo relevante es que los rayos de luz de radiación electromagnética superan a las microondas al tener una frecuencia mucho mayor (pulsos por segundo) y, por lo tanto, una capacidad de información considerablemente mayor. El trabajo crítico se realizó en Corning Glass Works, donde se formó un equipo en 1967 con el fin de crear un tipo de vidrio que retuviera al menos un uno por ciento de luz a través de un kilómetro de fibra, esto se logró en 1970.

Sin embargo, las fibras no transmitían todas las longitudes de onda con la misma transparencia; cualquier composición química dada tiene rangos de frecuencia óptimos particulares; y los láser, que se usaron como fuentes de luz, tienen sus propios rangos especiales. Fortuitamente, a mediados de la década de 1970, J. Jim Hsieh en el MIT Lincoln Laboratory desarrolló un láser y Masaru Horiguchi en NTT produjo una fibra que tenía ese tipo de compatibilidad (Dibner, 2012)

El primer cable de fibra submarino (cinco millas sin repetidores) se colocó en el Canal de la Mancha entre Portsmouth y la Isla de Wight en 1984. Dos años después, un cable cruzó el canal hacia Bélgica (más de 70 millas con tres repetidores). que podría llevar 11,500 circuitos telefónicos en los pares de fibras. TAT-8 entró en servicio en 1988, un cable de tres fibras (dos operativos, uno de respaldo) desde los Estados Unidos hasta Gran Bretaña y Francia a través de un punto de ramificación en el Atlántico, llevó exitosamente el equivalente a 40,000 conversaciones telefónicas.

Sin embargo, no había forma de amplificar la luz directamente, ya que la señal de luz se convertía en señal eléctrica, que se amplificó y volvió a ser luz. Esta compleja disposición se alivió con la invención de un amplificador de luz, un láser que usaba vidrio dopado con erbio, por David Payne en la Universidad de Southampton en 1987 y desarrollado por separado por Emmanuel Desurvire en los Laboratorios Bell, tras varios estudios se implementaron amplificadores ópticos prácticos que podían manejar varias frecuencias al mismo tiempo.

Se aplicaron a TAT-12 en 1996 (que era una empresa estadounidense, británica y francesa), lo que le dio la capacidad de transmitir cinco gigabites por segundo de información sobre cada una de las dos fibras. Cuando se combina con TAT-13, forma una estructura de bucle, con tráfico que se mueve en direcciones opuestas sobre los dos cables, lo que hace posible redirigir el tráfico y minimizar la interrupción en caso de daño a una de las fibras (Dibner, 2012).

En el nuevo milenio, las redes de fibras de comunicaciones han abarcado todo el mundo como se puede visualizar en la figura 2.1, y las compañías siguen colocando cables relativamente baratos en respuesta a un mercado visionario, tanto es el éxito que en pocos años la oferta excedió la demanda y el costo para los consumidores disminuyó abruptamente, haciendo posible la enorme expansión de los servicios que ha hecho que Internet tenga una importancia tan abrumadora.



Figura 2. 1: Mapa fibra óptica submarina.
Fuente: (Dibner, 2012)

2.1.2 Cronología.

En la tabla 2.1 se observa la cronología de los sucesos en la evolución de las comunicaciones submarinas.

Tabla 2. 1: Cronología de comunicaciones submarinas

1847	John y Jacob Brett sugieren el cable transatlántico
1850	Primer cable en el Canal de la Mancha, trabajado brevemente
1858	Primer cable a través del Atlántico falla dentro de un mes
1861	informe de la Comisión Parlamentaria Británica sobre cables de telégrafo submarino
1864	exitoso cable del Golfo Pérsico a Karachi, siguiendo las recomendaciones de la Comisión
1866	Primer cable atlántico exitoso, trazado por Great Eastern
1867	grabador de sifón introducido
1873	Duplex introducido en cables atlánticos
1901	cable del Pacífico de Canadá a Australia y Nueva Zelanda
1924	primer cable atlántico con carga magnética
1956	primer cable telefónico transatlántico, coaxial con repetidores
1965	primer cable de teléfono atlántico transistorizado
1970	fibra óptica de grado de comunicaciones desarrollada en Corning

1980	Compromiso con la transmisión de fibra monomodo para TAT-8
1984	cable de fibra óptica a la Isla de Wight, primero en llevar tráfico regular
1987	Informe del amplificador de fibra dopada con erbio
1988	Primer cable de fibra óptica transatlántico
1996	amplificador óptico introducido en el cable Atlantic (TAT-12)
1998	Primeros cables de larga distancia con multiplexación por división de longitud de onda”

Elaborado por: Autor

2.2 Características y componentes de un sistema de fibra óptica

El sistema de un enlace óptico de acuerdo con la figura 2.2 comprende:

1. Equipo alimentador/ Equipo Óptico y de transmisión
2. El medio transmisor: Fibra óptica
3. Con o sin repetidores, de acuerdo con la aplicación específica como se aprecia en la figura 2.3.



Figura 2. 2: Sistema óptico

Fuente:(Rubio, 1994)

Para diseñar un sistema de enlace submarino de fibra óptica se debe prever ciertos parámetros para que el enlace sea óptimo y garantizar la calidad de la señal, como es la presión a cierta profundidad, la propagación longitudinal, los equipos de transmisión y recepción de gran alcance, y los daños colaterales por contaminación o efectos naturales durante la vigencia del cable (León & Hernán, 2011).

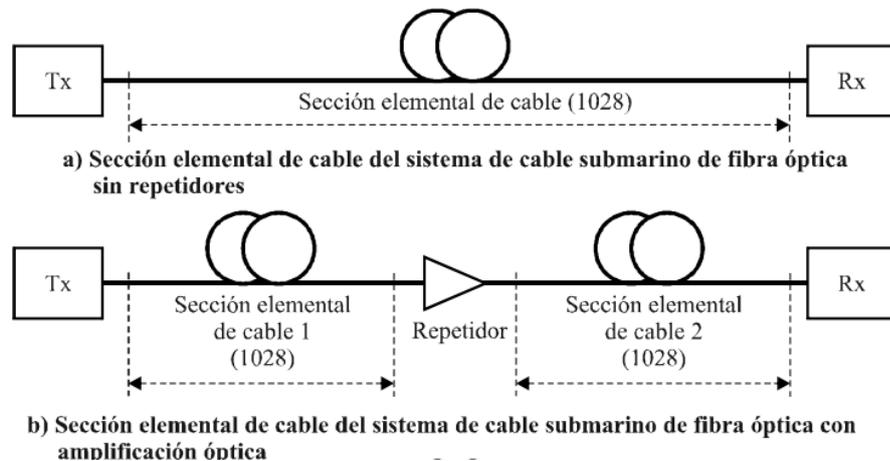


Figura 2. 3: Aplicación específica.

Fuente: (UIT-T, 2007)

2.2.1 Características del cable

Los cables de fibra varían en las especificaciones, principalmente en función de las aplicaciones para las que están diseñados. Las variaciones pueden afectar el diámetro del núcleo, los materiales utilizados y el cable del entorno en el que se podría utilizar (Angeles, Arredondo, & Martiez, 2009).

Componentes del cable:

1. Fibra óptica
2. Protección secundaria (holgada o densa)
3. Elemento de tracción
4. Cubierta interna
5. Protección contra daño físico, coraza
6. Chaqueta externa

Y a su vez, la fibra óptica tiene componentes en su interior:

- Núcleo
- Revestimiento
- Recubrimiento

Núcleo: El núcleo y el revestimiento generalmente están hechos de vidrio o plástico, el tamaño del núcleo varía entre 8 y 63 micrones. La especificación más relevante del núcleo es el índice de refracción, que es el valor de la flexión ligera que pasa a través del material y de la velocidad con la que la luz podría viajar a través del mismo. (Capmany, Fraile, & Martiez, 2001)

Revestimiento: El revestimiento tiene un índice de refracción más bajo que el núcleo, pues permite que la luz permanezca dentro de la fibra y no escape al recubrimiento, ya que se reflejará. (Capmany et al., 2001)

Recubrimiento: El recubrimiento se limita a ser una capa protectora que protege el núcleo y el revestimiento de cualquier daño, fractura. (Capmany et al., 2001)

2.2.1.1 Protección de la fibra por la estructura del cable

El tiempo de vigencia de la fibra se determina por imperfecciones en la estructura del cristal, depende del estado inicial de la fibra, tipo de revestimiento, tensión interna, de la condición medioambiental en el periodo de fabricación y del nivel de verificación de prueba aplicado a la fibra tras su estiramiento. (Brito & Carlos, 2004)

La resistencia de la estructura del cable junto con la de la fibra determina el comportamiento global, teniendo en cuenta el efecto acumulativo de la carga aplicada durante su tendido, recuperación y reparación así como toda carga permanente o elongación residual aplicada al cable instalado, por lo que se debe garantizar la vida nominal del sistema.(UIT-T, 2007)

Para proteger las fibras se utilizan por lo general dos tipos de estructura de cable (Agrawal, 2002):

- Cable de estructura denso: la fibra se mantiene firmemente unida al cable de tal modo que su elongación es prácticamente igual a la del cable como se muestra en la figura 2.5
- Cable de estructura holgado: tal y como se aprecia en la figura 2.4 la fibra no permanece firme en el interior del cable por lo que su elongación es inferior a la del cable, siendo nula hasta que la elongación del cable alcanza un valor determinado.

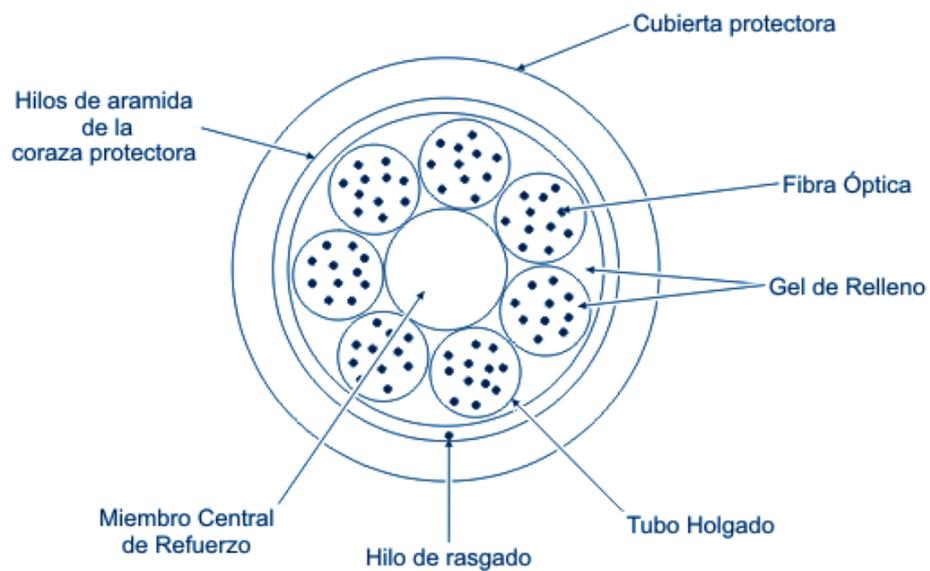


Figura 2. 4: Cable de estructura holgado
Fuente: (Rubio, 1994)

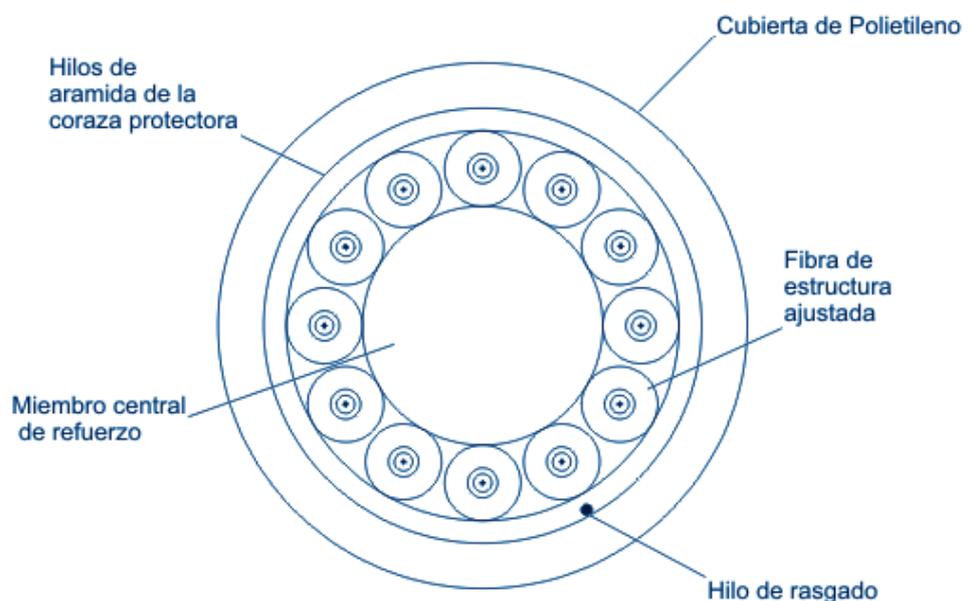


Figura 2. 5: Cable de estructura densa.
Fuente:(Rubio, 1994)

El cable debe preservar a la fibra contra agentes externos como el agua, la humedad y la presión externa, a su vez debe limitar la penetración longitudinal del agua tras la ruptura del cable a cierta profundidad. En la tabla 2.1 se muestra las características de las estructuras del cable (Mahlke & Gössing, 2010)

Tabla 2.2: Características de las estructuras de cable.

Características	Estructura holgada	Estructura densa
<i>Número de fibras en la protección secundaria</i>	Varias	Una
<i>Protección contra humedad</i>	Protección con gel	Sin protección
<i>Flexibilidad</i>	No flexibles	Flexibles
<i>Conexión de las fibras ópticas</i>	Laborioso	Fácil
<i>Radio curvatura</i>	Grande	Pequeño
<i>Conexión de las fibras ópticas</i>	Laborioso	Fácil
<i>Diámetro del cable</i>	Grande	Pequeño
<i>Resistencia a golpes y presiones</i>	Menor	Mayor
<i>Comportamiento con la temperatura</i>	Peor	Mejor
<i>Densidad de fibras</i>	Alta	Baja

Fuente: (Rubio, 2014)

2.2.1.2 Protección del cable

El cable submarino debe asegurar protección óptima contra las agresiones en su profundidad, como el entorno marino y actividades de barcos, debe proporcionar blindaje (Mahlke & Gössing, 2010).

De acuerdo con la protección del cable:

- Ligerito (cable LW): Conveniente para tenderlo, recuperarlo y manipularlo, no se requiere protección especial
- Ligerito protegido (cable LWP): apropiado para tenderlo, recuperarlo y manipularlo, en condiciones donde se requiere protección especial.
- Armadura simple (cable SA): adecuado para tenderlo, enterrarlo, recuperarlo y manipularlo, y está debidamente protegido para zonas específicas en aguas poco profundas.

- Armadura doble (cable DA): útil para tenderlo, enterrarlo, recuperarlo y manipularlo, y está adecuadamente protegido para zonas específicas en aguas poco profundas
- Armadura para roca (cable RA): sirve para tenderlo, recuperarlo y manipularlo, y está protegido para zonas específicas en aguas poco profundas (UIT-T, 2007).

Tabla 2. 3: Profundidad de aplicación típica, cables submarinos.

	Cable LW/LWP	Cable SA	Cable DA	Cable RA
Profundidad (m)	> 1000	> 20 – 1500	0 – 20	0 – 20

Fuente: (UIT-T, 2007)

Dependiendo de la aplicación, el diseño podría requerir dos o más fibras, que podrían empaquetarse convenientemente en un solo paquete. En la tabla 2.2 se refiere a la aplicación del cable de acuerdo con la profundidad. Las variaciones en las cantidades de cables son:

- Cable simple: tiene un solo filamento de fibra óptica dentro.
- Cables dúplex: contiene dos fibras ópticas con amortiguador cerrado en una sola chaqueta. Este cable se usa comúnmente para la red troncal LAN, ya que requiere dos fibras: transmisión y recepción.
- Multifibra - contiene más de dos fibras dentro de una sola chaqueta. La cantidad podría ser de hasta varios cientos de fibras, sin embargo, generalmente es un número par, ya que muchas aplicaciones requieren una fibra para transmitir la señal y otra para recibir (Mahlke & Gössing, 2010).

2.2.2 Características de la fibra

La fibra monomodo tiene algunas limitaciones debido a la naturaleza del cable, se requiere el láser concentrado, que puede enviar señales con precisión a través de medios tan delgados, se utilizan principalmente para la red troncal y otras partes de la aplicación a larga distancia.

Por otro lado, la fibra multimodo tiene un núcleo de mayor diámetro, lo que permite utilizar láseres y LED más baratos como fuente. Sin embargo, los

componentes más baratos tienen un efecto negativo tanto en la distancia de transmisión como en el ancho de banda, eso hace que las soluciones multimodo sean más adecuadas para las conexiones cortas en la red. (Mahlke & Gössing, 2000)

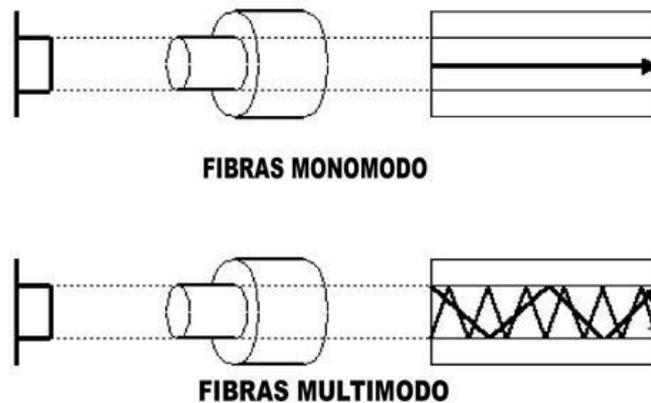


Figura 2. 6: Tipos de fibra.
Fuente: (Rubio, 1994)

Además del modo de fibra, el tipo de tubería y las aplicaciones interiores / exteriores, se deben tener en cuenta algunas otras especificaciones: tamaño del núcleo / revestimiento, número de fibras ópticas, aplicaciones LAN / WAN. Relación de tamaño del núcleo / tamaño del revestimiento. Las proporciones más comunes, como se muestra en la figura 2.6:

- “8.3 / 125 - el tamaño de la fibra monomodo. El núcleo es 10 veces más grande que la longitud de onda de la luz que transporta. Esto permite que la luz viaje en línea recta con poco o nada de rebote.
- 62.5 / 125 - se introdujo el tamaño de fibra más común para cable multimodo antes de 50/125.
- 50/125 - versión actualizada de t fibra multimodo. Tiene una mejor distancia de transmisión y ancho de banda que 62.5 / 125. Sin embargo, el precio de los conectores y el equipo está en el mismo nivel que 62.5 / 125.”(León & Hernán, 2011)

2.3 El transmisor óptico y los formatos de modulación

La potencia óptica promedio lanzada a la fibra desde el transmisor depende del tipo de fuente utilizada y la tasa de bits requerida del sistema.

Normalmente, el láser se inicia alrededor de 1 mW, mientras que, por lo general, el LED está limitado a aproximadamente 100 μ W. También se puede observar que ambos tipos de dispositivos emiten menos potencia óptica en mayores tasas de bits.

Sin embargo, el LED proporciona una salida reducida a anchos de banda de modulación superiores a 50 MHz, mientras que la salida del láser no se ve afectada por debajo de 40 GHz. Además, el hecho de que en general, la potencia óptica que se puede lanzar a una fibra desde un LED, incluso a bajas velocidades binarias, es de 10 a 15 dB por debajo de la disponible para un láser, es una consideración importante, especialmente cuando el ruido del receptor es un factor limitante dentro del sistema. (Huidobro, 2014)

La señal generada por una fuente óptica debe modularse en el transmisor antes de la transmisión a través del enlace de fibra óptica. Hay dos formatos de modulación principales que se pueden usar en sistemas de comunicación óptica digital, no retorna a cero (NRZ) y retorna a cero (RZ). Los pulsos de RZ se pueden producir usando dos moduladores de intensidad o una cascada de modulador de intensidad y fase (Senior & Jamro, 2009).

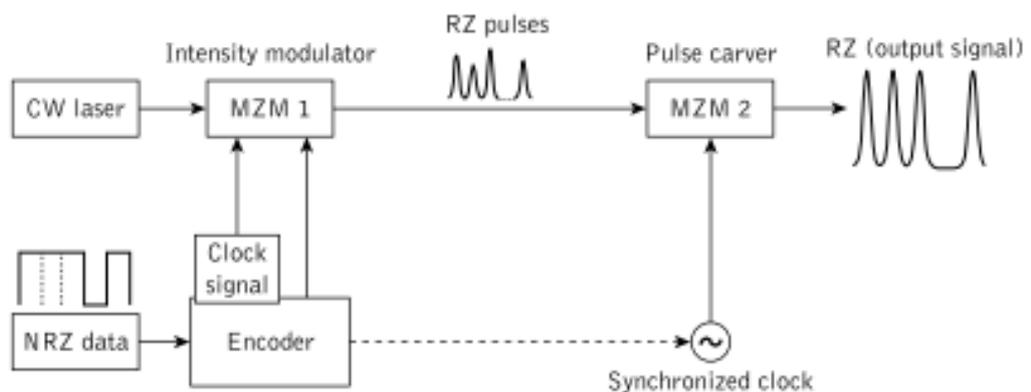


Figura 2. 7: Transmisor de formato de señal de retorno a cero (RZ)

Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

En la figura 2.7 se muestra un transmisor de formato de señal RZ convencional que comprende una fuente de láser CW, dos moduladores Mach-Zehnder (es decir, MZM 1 y MZM 2 utilizados como modulador de

intensidad y carver de impulsos, respectivamente) junto con un codificador de datos. Inicialmente, los impulsos RZ se construyen en el modulador de intensidad que utiliza un MZM con reloj para modular la señal de entrada óptica NRZ.

Para generar los impulsos RZ apropiados con amplitud constante, la señal de accionamiento para el carver de impulsos se debe sincronizar con la señal de reloj MZM. A continuación, MZM 2 produce un tren de impulsos RZ óptico de amplitud constante en la salida. Usando esta técnica, transmisores RZ que operan a una tasa de bits de 40 Gbit han sido demostrados exitosamente.(Huidobro, 2014)

El formato de señal RZ muestra considerables ventajas de rendimiento sobre el de NRZ. Por ejemplo, exhibe mayor potencia de pico junto con una mayor inmunidad al ruido y, por lo tanto, tiene un mejor rendimiento de BER. Además, está menos sujeto a efectos no lineales relacionados con la fibra. (Senior & Jamro, 2009)

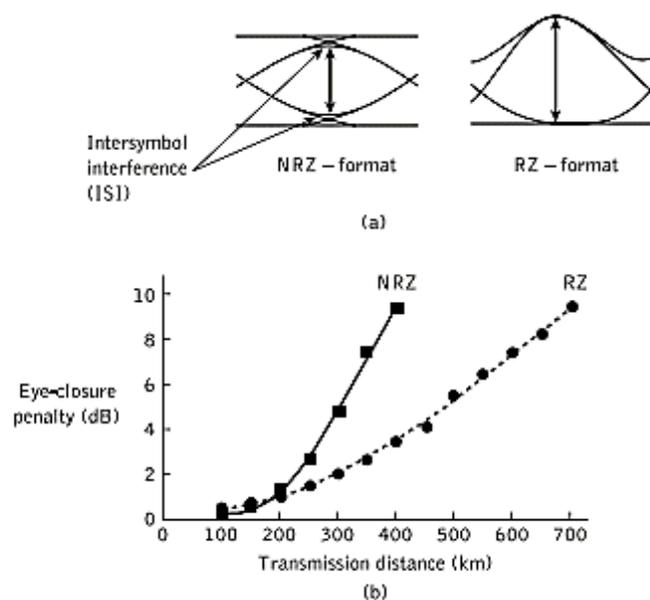


Figura 2. 8: Formatos de modulación sin retorno a cero (NRZ) y retorno a cero (RZ). Fuente: (UIT-T, 2007)

Los diagramas de ojo para la transmisión óptica RZ y NRZ se muestran en la figura 2.8 (a). Se puede observar que el diagrama de ojo para el formato RZ muestra una apertura de ojo vertical más grande en comparación con el

de NRZ. Además, se debe tener en cuenta que la estrecha abertura ocular vertical determina la presencia de interferencia entre símbolos que surge como consecuencia de los efectos no lineales de la fibra mientras que la apertura horizontal del ojo está relacionada con el jitter determinístico, incluida la distorsión del ancho de pulso.

La abertura de ojo vertical más ancha para el formato de señal RZ es indicativa de una SNR más alta en el receptor (es decir, típicamente de 1 a 3 dB) y por lo tanto el formato RZ también muestra mayor tolerancia a ISI para señales multiplexadas por división de longitud de onda.

La figura 2.8 (b) proporciona una comparación de la penalización del cierre ocular para los formatos ópticos de NRZ y RZ cuando se utiliza en un sistema WDM de 16 canales que funciona a una velocidad de transmisión de 40 Gbits⁻¹. Cabe señalar que se obtuvo una penalización máxima de oclusión de 9,6 dB para un enlace de fibra monomodo de 700 km cuando se utilizaba el formato de señal RZ, mientras que el mismo valor de penalización del cierre ocular se produjo con una distancia mucho más corta de solo 400 km utilizando un formato NRZ (Senior & Jamro, 2009)

Para la transmisión multiplexada de fibra óptica, específicamente cuando se utiliza un sistema WDM, el formato de modulación de la señal adquiere una importancia creciente a medida que se requiere una mayor eficiencia espectral al reducir el espaciado de los canales, por ejemplo, para producir DWDM. La eficiencia espectral que puede definirse como la relación entre la capacidad promedio del canal y el espaciado promedio del canal determina la densidad total de un sistema WDM (Huidobro, 2014)

2.4 Atenuación

La pérdida de atenuación o transmisión de fibras ópticas ha demostrado ser uno de los factores importantes para lograr su amplia aceptación en las telecomunicaciones. Como la atenuación del canal determinó en gran medida la distancia máxima de transmisión antes de la señal restauración, las

comunicaciones de fibra óptica se hicieron especialmente atractivas cuando las pérdidas en la transmisión de las fibras se redujeron por debajo de las de los conductores metálicos (menos que 5 dB km^{-1}) (Martín, 2010)

La atenuación de la señal dentro de las fibras ópticas, como con los conductores metálicos, es usualmente expresado en la unidad logarítmica del decibelio. El decibel, que se usa para comparar dos niveles de potencia, se puede definir para una longitud de onda óptica particular como la relación de la potencia óptica de entrada (transmitida) P_i , a la potencia óptica de salida (recibida) P_o de la fibra como (Senior & Jamro, 2009):

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o}$$

En las comunicaciones de fibra óptica, la atenuación generalmente se expresa en decibelios por unidad longitud (dB km^{-1}):

$$\alpha_{dB} L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o}$$

Donde α_{dB} es la atenuación de la señal por unidad de longitud en decibels que también se conoce como el parámetro de pérdida de fibra y L es la longitud de la fibra.

Varios mecanismos son responsables de la atenuación de la señal dentro de la fibra, los cuales están influenciados por la composición del material, la preparación y técnica de purificación y la estructura de la guía de onda. Se pueden categorizar dentro de varias áreas principales que incluyen absorción de material, dispersión de material (lineal y no lineal dispersión), pérdidas de curvatura y microalimentación, modo de acoplamiento de las pérdidas de radiación y pérdidas debido a modos con fugas, también hay pérdidas en los conectores y empalmes. (Senior & Jamro, 2009).

2.5 Dispersión

La dispersión de la señal óptica transmitida provoca distorsiones tanto digitales como analógicas. Al considerar la implementación principal de transmisión que implica alguna forma de modulación digital, luego mecanismo

de dispersión dentro de la fibra causa la ampliación de los pulsos de luz transmitida a medida que viajan a lo largo el canal. El fenómeno se ilustra en la figura 2.9, donde se puede observar cada pulso se amplía y se superpone, llegando a ser indistinguible en la entrada del receptor.

El efecto se conoce como interferencia entre símbolos (ISI). Así se puede encontrar un número cada vez mayor de errores en el canal óptico digital como ISI se vuelve más pronunciado. La tasa de error también es una función de la atenuación de la señal en el enlace y la subsiguiente relación señal / ruido (SNR) en el receptor.(Martín, 2010)

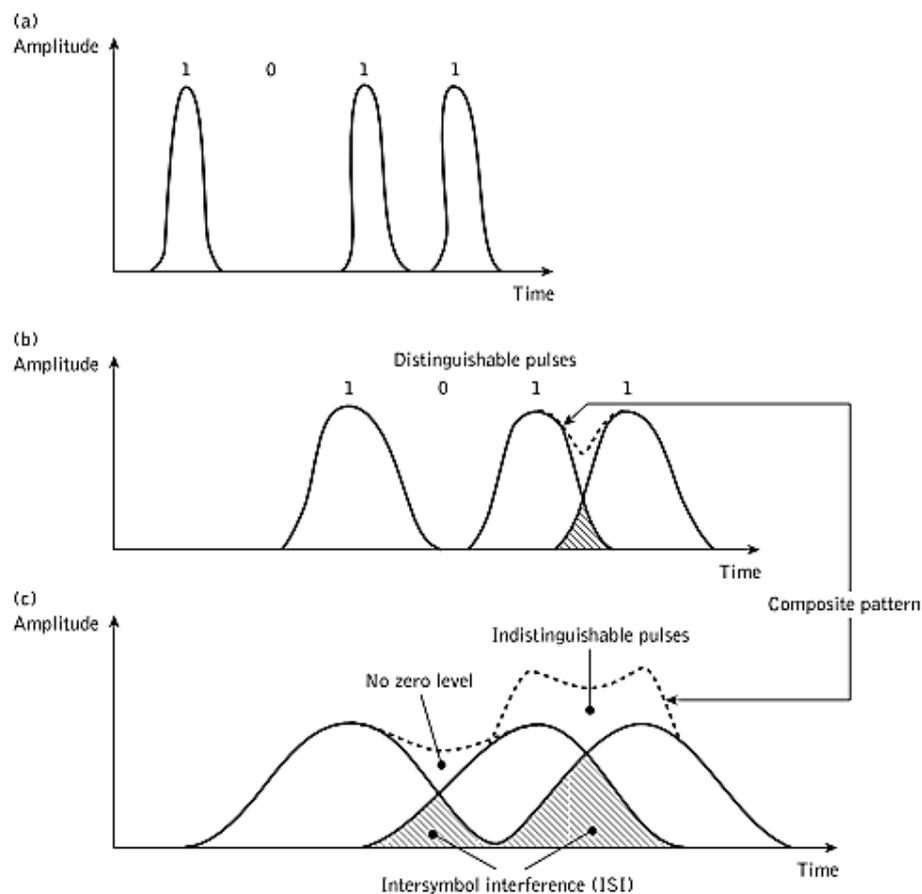


Figura 2. 9: Ampliación de pulsos de luz a medida que se transmiten en la fibra
Fuente: (Martín, 2010)

Sin embargo, la dispersión de la señal solo limita el ancho de banda máximo posible hasta el punto donde los símbolos individuales ya no se pueden distinguir. Para que no se superpongan los pulsos de luz hacia abajo en un enlace de fibra óptica, la tasa de bits digital B debe ser menor que el

recíproco de la duración del pulso ampliado (a través de la dispersión) (2τ) (Senior & Jamro, 2009).

Por lo tanto:

$$B_T \leq \frac{1}{2\tau}$$

Esto supone que el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión en el canal es τ que dicta la duración del impulso de entrada que también es τ . Por lo tanto, en la ecuación señalada da una estimación de la tasa de bits máxima que se puede obtener en un enlace de fibra óptica como $1 / 2\tau$.

Otra estimación más precisa de la tasa de bits máxima para un canal óptico con la dispersión se puede obtener considerando los pulsos de luz en la salida para tener una Forma gaussiana con un ancho eficaz de σ . A diferencia de la relación dada en dicha ecuación, este análisis permite la existencia de una cierta cantidad de superposición de señal en el canal, mientras se evita cualquier penalización SNR que ocurre cuando ISI se pronuncia. El máximo de tasa de bits se da aproximadamente por (Senior & Jamro, 2009):

$$B_T(max) = \frac{0.2}{\sigma} \text{ bit } s^{-1}$$

2.5.1 Dispersión Cromática

La dispersión cromática puede ocurrir en todos los tipos de fibras ópticas y resultados del ancho de línea espectral finito de la fuente óptica. Dado que las fuentes ópticas no emiten solo una frecuencia única, pero una banda de frecuencias si, entonces puede haber diferencias de retraso de propagación entre diferentes componentes espectrales de la señal transmitida.

Esto causa la ampliación de cada modo transmitido y, por lo tanto, dispersión intermodal. Las diferencias de demora pueden ser causadas por las propiedades dispersivas del material de la guía de ondas (dispersión del material) y también la orientación dentro de la estructura de fibra (dispersión de guía de onda) (Senior & Jamro, 2009).

2.5.2 Dispersión del Material

La distorsión del pulso que ocurre por la dispersión del material como se ilustra en la figura 2.10 resulta de la gama de velocidades de los componentes espectrales proyectados a la fibra desde la fuente óptica. Ocurre cuando la velocidad de fase de una onda plana que se propaga en el medio dieléctrico varía de forma no lineal con la longitud de onda, y se dice que un material exhibe dispersión material cuando el diferencial del índice de refracción con respecto a la longitud de onda no es cero. (Agrawal, 2002)

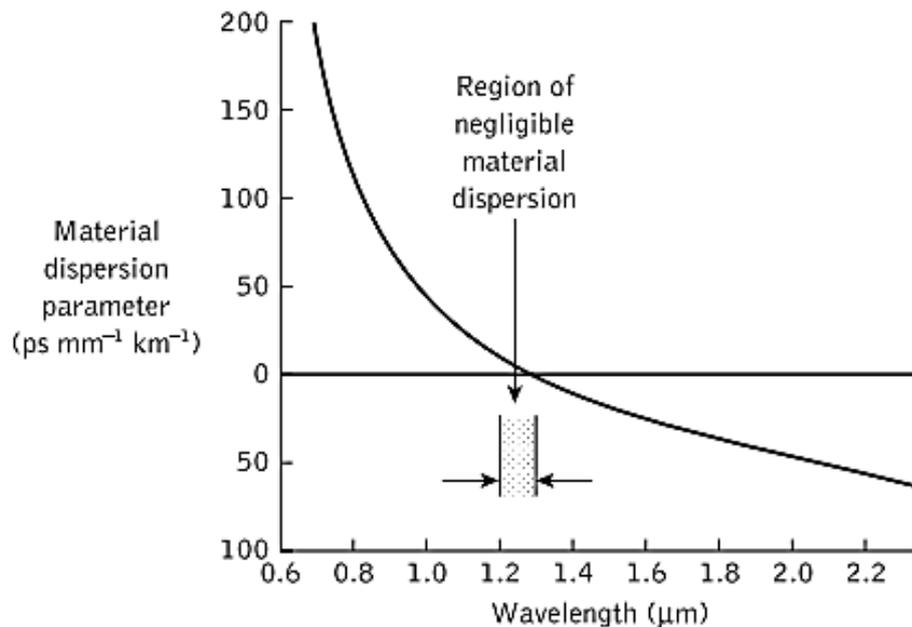


Figura 2. 10: Dispersión del material en función de la longitud de onda
Fuente:(Agrawal, 2002)

2.5.3 Dispersión de guía de Onda

Es resultado de la variación en la velocidad del grupo con la longitud de onda para un modo particular. Considerando el rayo de luz desde el enfoque teórico, es equivalente al ángulo entre el rayo y el eje de la fibra que cambia con la longitud de onda que como consecuencia conduce a una variación en los tiempos de transmisión para el haz de luz, y por lo tanto produce dispersión.

Si se compara entre los tipos de fibras multimodo y monomodo, en las fibras multimodo, donde la mayoría de los modos se propagan lejos del punto de corte, están casi libres de dispersión de guía de onda y generalmente

insignificante en comparación con la dispersión del material. En cambio, en las fibras monomodo donde los efectos de los diferentes mecanismos de dispersión no son fáciles de separar, la dispersión de la guía de onda puede ser significativa. (Martínez, 2005)

2.5.4 Dispersión por modo de polarización (PMD)

Los leves desvíos de la simetría cilíndrica en el núcleo de la fibra óptica conducen a la doble refracción debido al índice de modo diferente asociado con los componentes horizontal y vertical polarizados ortogonalmente del modo fundamental. La PMD propicia la diferencia de los pulsos y por ende debe limitarse a un valor máximo. La dispersión por modo de polarización de un enlace óptico se expresa en ps/km. (UIT-T, 2007)

La manera de describir los modos de polarización es mediante los vectores de Jones, por lo que el vector de campo eléctrico E en un punto de la fibra es:

$$E = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix}$$

Donde E_x , E_y se refieren a vectores de campo eléctrico/modos de polarización en la dirección X y Y . Estos campos se propagan a lo largo de la fibra a una velocidad señalada por el índice de refracción como se muestra en la figura 2.11 (Leiva, Olivares, & Tarifeno, 2007)

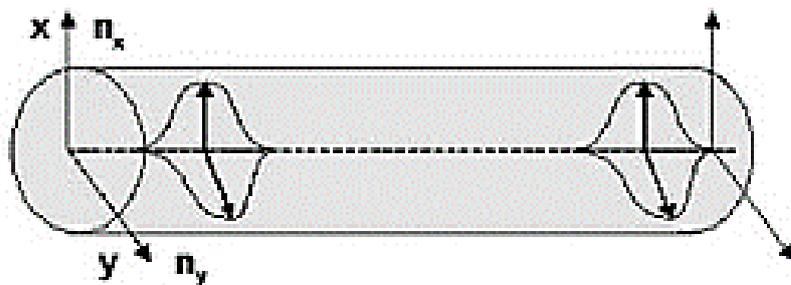


Figura 2. 11: Esquema de propagación en una fibra no birrefringente
Fuente: (Leiva et al., 2007)

2.5.5 Efectos No lineales

Por lo general, las ondas de luz o los fotones transmitidos a través de una fibra tienen poca interacción con cada uno, y no cambian por su paso a través de la fibra (a excepción de la absorción y dispersión). Sin embargo, hay excepciones que surgen de las interacciones entre las ondas de luz y el material que los transmite, que puede afectar las señales ópticas. Estos procesos normalmente se conocen como efectos no lineales porque su fuerza típicamente depende del cuadrado de la intensidad óptica. Por lo tanto, los efectos no lineales son débiles a bajas potencias, pero pueden ser mucho más fuertes a altas intensidades ópticas. (Martínez, 2005)

Esta situación puede resultar ya sea cuando se aumenta la potencia, o cuando es concentrado en un área pequeña, como el núcleo de una fibra óptica monomodo. Aunque los efectos no lineales en las fibras ópticas son pequeños, se acumulan como luz pasa a través de muchos kilómetros de fibra monomodo. Los pequeños diámetros del núcleo, juntos con las largas distancias de transmisión que se pueden obtener con estas fibras, han habilitado la aparición de fenómenos no lineales a niveles de potencia de unos pocos milivatios dentro de la capacidad de los láseres de semiconductores.

Además, los niveles de potencia óptica se vuelven mucho más grandes cuando los paquetes de multiplexación por división de longitud de onda en muchos canales de señal en una fibra monomodo, de manera que el nivel de potencia general es la suma de las potencias ópticas del canal individual. (Martínez, 2005)

2.5.6 Dispersión estimulada de Brillouin

La dispersión estimulada de Brillouin (SBS) puede considerarse como la modulación de la luz a través de vibraciones moleculares térmicas dentro de la fibra. La luz dispersa aparece como bandas laterales superior e inferior que están separadas de la luz incidente por la frecuencia de modulación. El fotón incidente en este proceso de dispersión produce un fonón de frecuencia acústica y un fotón disperso.

Esto produce un desplazamiento de frecuencia óptica que varía con el ángulo de dispersión porque la frecuencia de la onda de sonido varía con la longitud de onda acústica. El desplazamiento de frecuencia es un máximo en la dirección hacia atrás, reduciéndose a cero en la dirección hacia adelante, lo que hace que el SBS sea principalmente un proceso hacia atrás (Huidobro, 2001).

Como se indicó anteriormente, la dispersión de Brillouin es solo significativa por encima de una densidad de potencia umbral. Suponiendo que el estado de polarización de la luz transmitida no se mantiene, se puede mostrar que la potencia umbral P_B está dada por:

$$P_B = 4.4 \times 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} V \text{ watts}$$

Donde d y λ son el diámetro del núcleo de la fibra y la longitud de onda de funcionamiento, respectivamente, ambos medido en micrómetros, α_{dB} es la atenuación de la fibra en decibelios por kilómetro y v es el ancho de banda fuente (es decir, inyección láser) en gigahercios. La expresión dada en la ecuación permite la determinación de la potencia óptica umbral que debe iniciarse en una fibra óptica monomodo antes de que ocurra SBS. (Huidobro, 2001)

2.5.7 Dispersión estimulada de Raman

La dispersión estimulada de Raman (SRS) es similar a SBS, excepto que se genera un fonón óptico de alta frecuencia en lugar de un fonón acústico en el proceso de dispersión. Además, el SRS puede ocurrir tanto hacia adelante como hacia atrás en una fibra óptica, y puede tener un umbral de potencia óptica de hasta tres órdenes de magnitud mayor que el umbral de Brillouin en una fibra particular.

Utilizando los mismos criterios que los especificados para el umbral de dispersión Brillouin dado en la ecuación anterior, se puede mostrar que la potencia óptica umbral para SRS P_R está dada por (Senior & Jamro, 2009):

$$P_R = 5.9 \times 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB} \text{ watts}$$

2.6 Propagación de Solitón

La propagación de Solitón resulta de un caso especial de compensación de dispersión no lineal en que el chirrido no lineal causado por SPM equilibra, y por lo tanto pospone, el temporal ensanchamiento inducido por retraso de velocidad de grupo. Aunque ambos fenómenos limiten la distancia de propagación que se puede lograr cuando se actúa de forma independiente, si está equilibrado a la intensidad de pulso crítica necesaria, permiten que el pulso se propague sin distorsión alguna (es decir, su forma es autosuficiente) como un solitón como se muestra en la figura 2.12.

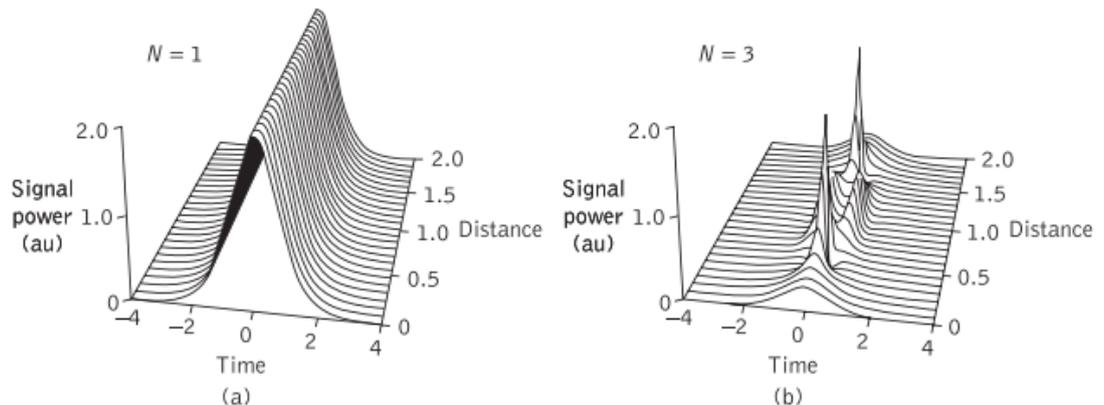


Figura 2. 12: Intensidad de pulso en un período de solitón.

Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

En esencia, un solitón tiene dos distintivas características que son potencialmente importantes para la provisión de fibra óptica de alta velocidad: se propaga sin cambiar de forma; y la forma no se ve afectada, eso de un solitón, después de una colisión con otro solitón. Por lo tanto, la antigua propiedad solitón vence la limitación de dispersión y evita la interferencia entre símbolos mientras la invariancia de colisión potencialmente proporciona una multiplexación de división de longitud de onda eficiente. (Senior & Jamro, 2009).

2.7 Fuentes Ópticas

La fuente óptica a menudo se considera el componente activo en un sistema de comunicación de fibra óptica. Su función fundamental es convertir la energía eléctrica en energía óptica (luz) de una manera eficiente que

permite la salida de luz efectivamente lanzado o acoplado a la fibra óptica. Se mencionará dos tipos principales de fuentes ópticas (Senior & Jamro, 2009):

- Fuentes monocromáticas incoherentes (diodos emisores de luz, LED)
- Fuentes coherentes monocromáticas (laser)

2.7.1 Laser

Al considerar el uso del láser de inyección para comunicaciones de fibra óptica, es necesario conocer algunas de sus características operativas del dispositivo.(Safford, 2012)

2.7.1.1 Respuesta Dinámica.

El comportamiento dinámico del láser de inyección es crítico, especialmente cuando se usa en Sistemas de comunicación de fibra óptica de alta velocidad de bits (banda ancha). La aplicación de un paso de corriente al dispositivo da como resultado un retraso de encendido, a menudo seguido de alta frecuencia (de una a decenas de gigahertz) oscilaciones amortiguadas conocidas como oscilaciones de relajación (RO). Estos fenómenos transitorios ocurren mientras que los electrones y fotones dentro de la estructura vienen en equilibrio y se ilustran en la figura 2.13

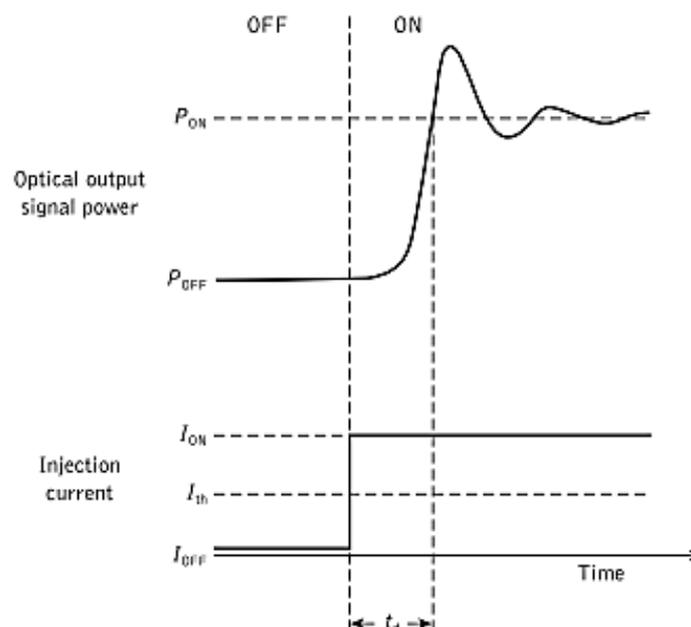


Figura 2. 13: Oscilaciones de relajación y el retardo de encendido.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Además, cuando un pulso alcanza un láser que tiene una capacidad significativa después del tiempo de retardo inicial, el pulso se ampliará porque la capacitancia proporciona una fuente de corriente sobre el período cuando la densidad de fotones es alta. En consecuencia, la salida del láser de inyección puede comprender varios pulsos a medida que la densidad de electrones se acumula repetidamente y se reduce rápidamente, así causando Ros (Safford, 2012)

2.7.1.2 Ruido

Otra característica importante es el comportamiento del ruido del dispositivo. Es especialmente el caso cuando se considera la transmisión analógica. Las fuentes de ruido son:

- ruido de fase o frecuencia
- auto-pulsación
- reflexión de la luz en el dispositivo
- ruido de partición de modo

Es posible reducir, sino eliminar, los ruidos producidos por la auto-pulsación, reflexión de la luz y ruido de partición de modo, mediante el uso de dispositivos de modo estabilizado y aisladores ópticos. Sin embargo, el ruido de fase es una propiedad intrínseca de todos los tipos de láser. Es el resultado de las discretas y aleatorias transiciones espontáneas o simuladas que causan fluctuaciones de intensidad en la emisión óptica y son un aspecto inevitable del funcionamiento del láser (Angeles et al., 2009).

Cada evento causa un salto repentino (de magnitud y signo aleatorio) en la fase del campo electromagnético generado por el dispositivo. Se ha observado que la densidad espectral de esta fase o ruido de frecuencia tiene una característica representada por $1/f$ a $1/f^2$ hasta una frecuencia (f) de alrededor de 1 MHz, como se muestra en la Figura 2.14

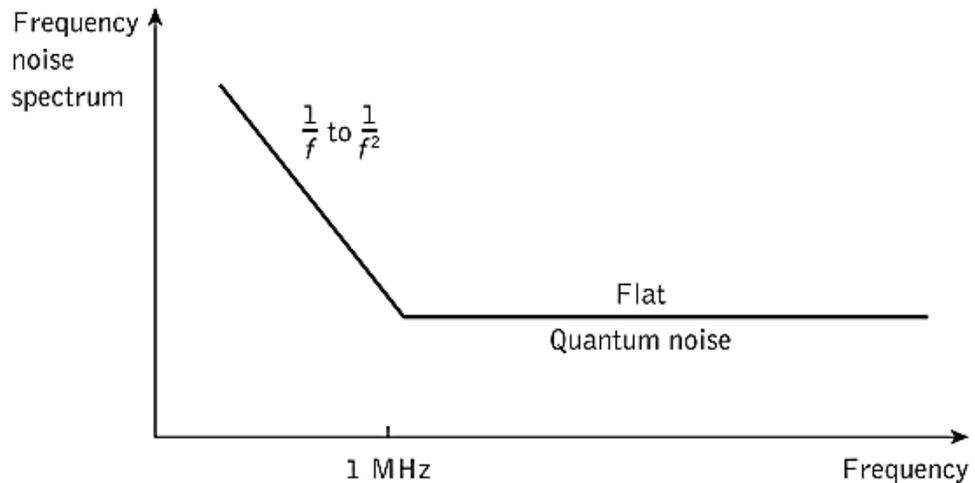


Figura 2. 14: Ruido de fase del láser de inyección.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

En frecuencias superiores a 1 MHz, el espectro de ruido es plano o blanco y está asociado a fluctuaciones cuánticas (algunas veces referidas como ruido cuántico) que son una causa principal del ensanchamiento del ancho de línea dentro de los láseres semiconductores. (Senior & Jamro, 2009)

2.7.1.3 Inyección de láser a la fibra

Una de las mayores dificultades con el uso de láseres dentro de los sistemas de fibra óptica se refiere a los problemas asociados con el acoplamiento eficiente de la luz entre el láser y la fibra óptica (particularmente la fibra monomodo con su núcleo de pequeño diámetro y baja apertura numérica). Aunque los láseres de inyección son relativamente direccionales tienen campos de salida divergentes que no corresponden a los ángulos de aceptación estrechos de fibras monomodo. (Safford, 2012)

Se desarrollaron técnicas de acoplamiento para mejorar la eficiencia del sistema tal cual como se ilustra en la figura 2.15 (Senior & Jamro, 2009):

- **Acoplamiento a tope:** la eficiencia del acoplamiento se obtiene posicionando el extremo de la fibra muy cerca de la fase del láser. Desafortunadamente, esta técnica permite reflejos posteriores de la fibra para acoplarse fuertemente al láser que produce ruido a la

salida del dispositivo que puede causar degradaciones de rendimiento en sistemas de alta velocidad.

- **Acoplamiento de fibra hemisférico cónico:** La eficiencia de acoplamiento puede mejorarse sustancialmente cuando el campo de salida del láser se combina con el campo de salida de la fibra. Tal coincidencia se logra generalmente al emplear un lente semiesférico formado en el extremo de una fibra óptica cónica.
- **Sistema de lente confocal:** tales sistemas de lentes proporcionan una relajación en las tolerancias de alineación normalmente requerido para lograr un acoplamiento de fibra microlente eficiente.

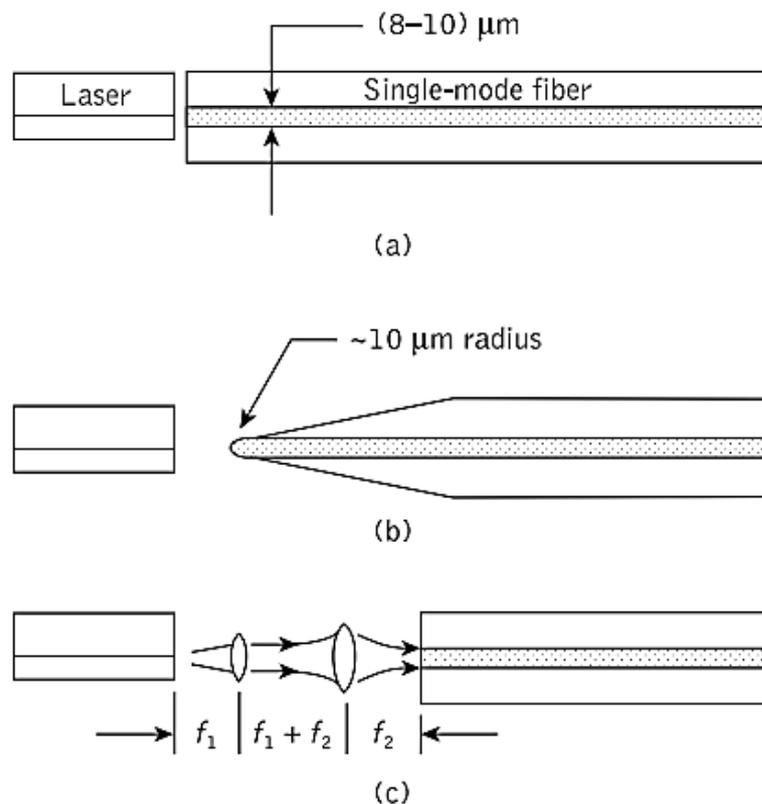


Figura 2. 15: Técnicas de acoplamiento.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

2.7.2 Diodo emisor de luz, LED

El LED admite muchos modos ópticos dentro de su estructura y, por lo tanto, se usa a menudo como una fuente multimodo. el LED puede funcionar a densidades de corriente más bajas que el láser de inyección. Las diversas

características operativas, rendimiento, potencia serán señaladas (León & Hernán, 2011)

2.7.2.1 Potencia y eficiencia del LED

La potencia generada internamente por un LED puede determinarse considerando el exceso de electrones y agujeros en el material de cualquier tipo. El LED es un dispositivo muy lineal en comparación con la mayoría de las inyecciones láser y por lo tanto, tiende a ser más adecuado para la transmisión analógica donde las limitaciones severas se ponen en la linealidad de la fuente óptica.

Sin embargo, en la práctica los LED presentan no linealidades que dependen de la configuración utilizada. Por lo tanto, a menudo es necesario usar alguna forma de técnica de circuito de linealización (por ejemplo, linealización de pre distorsión o retroalimentación negativa) con el fin de garantizar el rendimiento lineal del dispositivo para permitir su uso en sistemas de transmisión analógica de alta calidad. (Senior & Jamro, 2009)

2.7.2.2 Estructuras LED

Hay seis tipos principales de estructura LED y aunque solo dos han encontrado un amplio uso en sistemas de fibra óptica, otro se ha aplicado cada vez más. Estos son el emisor de superficie, el emisor de borde y el LED superluminiscente respectivamente. (Senior & Jamro, 2009)

Emisor de superficie LED

Un método para obtener alta radiación es restringir la emisión a una pequeña región activa dentro del dispositivo. Los dispositivos de homoestructura proporcionan una mayor eficiencia eléctrica y confinamiento óptico, así como menos absorción de la radiación emitida. Estas estructuras tienen una baja impedancia térmica en la región activa permitiendo altas densidades de corriente y dando una emisión de alta radiancia en la fibra óptica como se muestra en la figura 2.16. (Senior & Jamro, 2009)

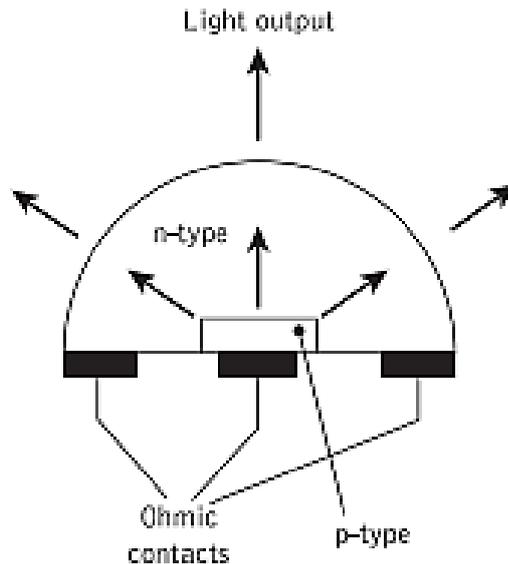


Figura 2. 16: Emisor de superficie LED.
Fuente:(Senior & Jamro, 2009)

Emisor de borde LED

Otra estructura básica de alta radiación utilizada actualmente en las comunicaciones ópticas es el LED de emisor de borde. Este dispositivo tiene una geometría similar a un láser de inyección de banda de contacto convencional. Aprovecha capas de guía transparentes con una capa activa muy delgada (50 a 100 μm) para que la luz producida en la capa activa se extiende a las capas de guía transparentes, reduciendo autoabsorción en la capa activa. Los emisores de superficie en general irradian más potencia al aire que los emisores de borde ya que la luz emitida es menos afectada por la reabsorción y la recombinación interfacial (Senior & Jamro, 2009)

LED superluminiscentes

Otra geometría de dispositivo que proporciona beneficios significativos para aplicaciones de comunicación es el diodo superluminiscente. Este dispositivo ofrece ventajas de:

- Potencia alta de salida
- Haz de salida direccional
- Ancho de línea espectral

Los cuales resultan útiles para el acoplamiento de importantes niveles de potencia óptica en la fibra, en particular para fibra monomodo. Además, el

proceso de emisión súper radiante dentro del SLD tiende a aumentar el ancho de banda por encima de los LED más convencionales (Angeles et al., 2009)

2.8 Detectores Ópticos

El detector es un componente esencial de un sistema de comunicación de fibra óptica y es uno de los elementos cruciales que dictan el rendimiento general del sistema por lo que permite la instalación de menos estaciones repetidoras y disminuye tanto el capital, costos de inversión y mantenimiento. Su función es convertir la señal óptica recibida en una señal eléctrica, que luego se amplifica antes del procesamiento. Por lo tanto, al considerar la atenuación de la señal a lo largo del enlace, el rendimiento del sistema se determina en el detector. (Senior & Jamro, 2009)

El papel que desempeña el detector exige que debe cumplir requisitos muy estrictos para rendimiento y compatibilidad. Los siguientes criterios definen el rendimiento importante y requisitos de compatibilidad para detectores que generalmente son similares a los requisitos para las fuentes:

- **Alta sensibilidad en las longitudes de onda de funcionamiento:** Los sistemas de primera generación tienen longitudes de onda entre 0,8 y 0,9 μm . Sin embargo, se puede obtener una ventaja considerable en el detector de fuentes de segunda generación con longitudes de onda operativas superiores a 1,1 μm tanto la atenuación como la dispersión de la fibra se reducen. Hay mucha actividad de investigación actualmente en esta región de longitud de onda más larga, especialmente en lo que se refiere a las longitudes de onda alrededor de 1.3 μm donde la atenuación y la dispersión del material pueden ser minimizadas.
- **Alta fidelidad:** Para reproducir la forma de onda de la señal recibida con fidelidad, para la transmisión analógica la respuesta del fotodetector debe ser lineal con respecto a la señal óptica en un amplio rango.
- **Gran respuesta eléctrica a la señal óptica recibida:** El fotodetector debería producir una señal eléctrica máxima para una cantidad dada de potencia óptica; es decir, la eficiencia cuántica debe ser alta.

- **Un ruido mínimo introducido por el detector:** Corrientes oscuras, corrientes de fuga y la conductancia de derivación debe ser baja. También el mecanismo de ganancia dentro del detector o los circuitos asociados deben ser de bajo nivel de ruido.
- **Estabilidad de las características de rendimiento:** Idealmente, las características de rendimiento del detector deben ser independiente de los cambios en las condiciones ambientales. Sin embargo, los detectores actualmente favorecidos (fotodiodos) tienen características (sensibilidad, ruido, ganancia interna) que varían con la temperatura y, por lo tanto, las compensaciones por los efectos de temperatura a menudo son necesarios.
- **Talla pequeña:** El tamaño físico del detector debe ser pequeño para un acoplamiento eficaz a la fibra y para permitir un fácil empaquetado con los siguientes componentes electrónicos.
- **Voltajes de polarización baja:** Idealmente, el detector no debería requerir voltajes de polarización excesivos o corrientes
- **Alta fiabilidad:** El detector debe ser capaz de un funcionamiento estable y continuo en temperatura ambiente durante muchos años.
- **Bajo costo:** Las consideraciones económicas a menudo son de primordial importancia en cualquier aplicación de sistema de comunicación a gran escala (España, 2005).

2.9 Amplificadores Ópticos

Los amplificadores ópticos, como su nombre lo indica, operan únicamente en el dominio óptico sin interconversión de fotones a electrones. Por lo tanto, en lugar de usar repetidores regenerativos que requieren dispositivos optoelectrónicas para fuente y detector, junto con circuitos electrónicos para reajustar y dar forma al pulso. Los amplificadores se colocan a intervalos a lo largo de un enlace de fibra para proporcionar la amplificación lineal de la señal óptica transmitida.

El amplificador óptico, en principio, proporciona un sistema mucho más simple en que es un solo componente en línea que se puede usar para

cualquier tipo de modulación prácticamente a cualquier velocidad de transmisión. Además, dicho dispositivo puede ser bidireccional y si es lo suficientemente lineal que puede permitir el funcionamiento multiplex de varias señales a diferentes longitudes de onda (es decir, multiplexación por división de longitud de onda).(Senior & Jamro, 2009)

Los dos enfoques principales para la amplificación óptica se han concentrado en amplificadores ópticos semiconductores que utilizan la emisión estimulada de portadores inyectados y amplificadores de fibra en los que la ganancia es proporcionada por la dispersión estimulada Raman o Brillouin. Ambos tipos de amplificadores (es decir, semiconductor y fibra, específicamente dopados de erbio y Raman) tienen la capacidad de proporcionar alta ganancia en anchos de banda espectrales amplios, haciéndolos eminentemente adecuados para aplicaciones de sistemas de fibra óptica como se ilustra en la figura 2.17. (Senior & Jamro, 2009)

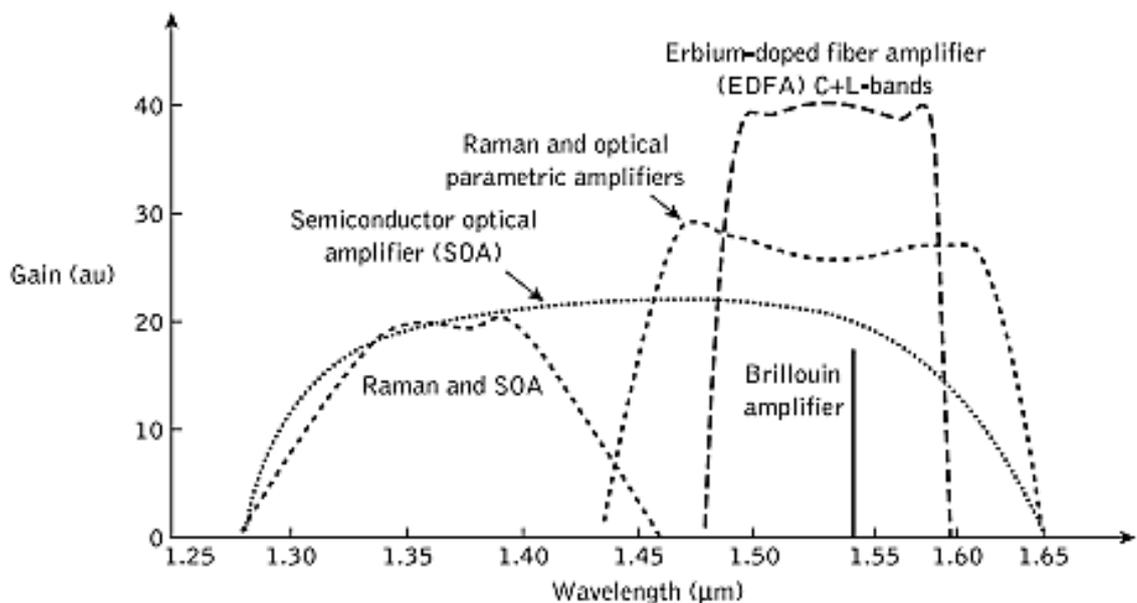


Figura 2. 17: Ganancia del ancho de banda de amplificadores ópticos.
Fuente:(Senior & Jamro, 2009)

Los amplificadores ópticos semiconductores, sin embargo, ofrecen una ventaja debido a su tamaño más pequeño y también porque pueden integrarse para producir subsistemas que son un elemento esencial de los sistemas actuales de comunicación óptica y redes.(Senior & Jamro, 2009)

2.9.1 Amplificadores de fibra y guía de onda

Los requisitos básicos para un amplificador óptico incluyen atributos tales como alta ganancia de señal, alta potencia de salida saturada, generación mínima de ruido (dentro del amplificador) y ancho de banda ultra ancho. Los amplificadores de fibra y guía de ondas se han convertido en componentes esenciales para los sistemas de comunicación de fibra óptica de alto rendimiento, ya que son capaces de cumplir con todos los requisitos antes mencionados.

En la figura 2.18 se muestra una representación general de un amplificador de fibra. El medio de ganancia normalmente comprende una longitud de fibra de modo único conectada a un acoplador dicróico (un acoplador de multiplexación por división de longitud de onda) que proporciona baja pérdida de inserción tanto en la señal como en las longitudes de onda de la bomba. La excitación se produce a través del bombeo óptico desde un láser de estado sólido o semiconductor de alta potencia que se combina con la señal de entrada óptica dentro del acoplador. Por lo tanto, la señal óptica amplificada se emite desde el otro extremo del medio de ganancia.

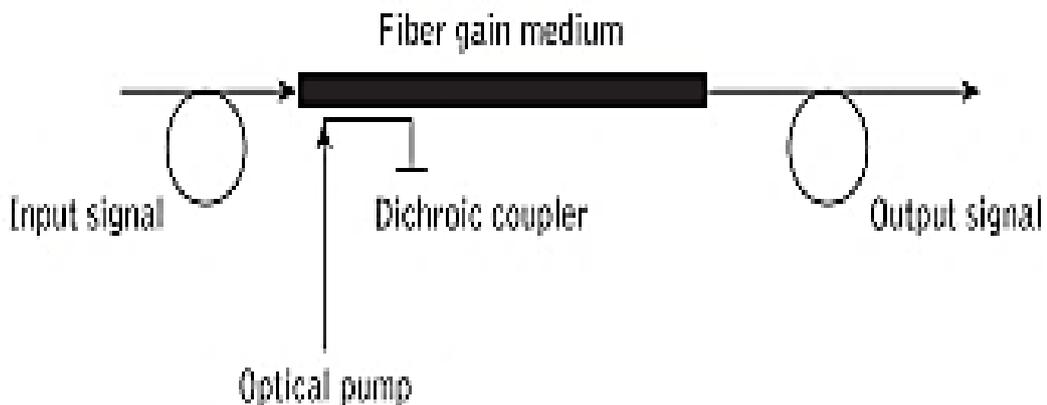


Figura 2. 18: Esquema de un amplificador de fibra.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Las principales opciones para implementar amplificadores de fibra: amplificadores de fibra dopados con tierras raras, amplificadores de fibra Raman y amplificadores de fibra Brillouin. Los SOA se utilizan en una amplia gama de aplicaciones de sistema, algunos de los cuales se ilustran en la figura 2.19 Estos incluyen uso como: un amplificador de potencia en el transmisor,

un amplificador de repetidor óptico en línea y un preamplificador óptico en el receptor. (Senior & Jamro, 2009)

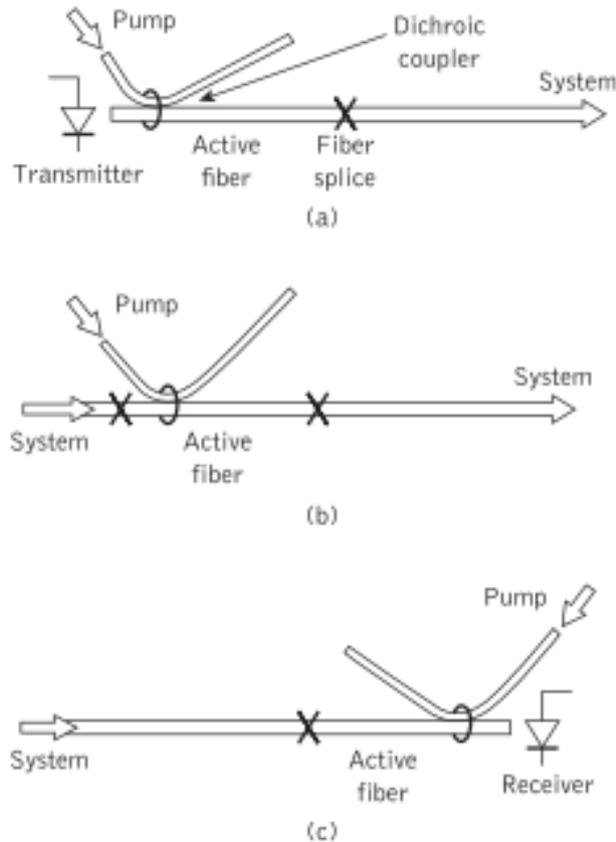


Figura 2. 19: Aplicaciones del sistema para el amplificador de fibra.
 Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

2.9.2 Amplificadores de fibra dopados con Erblio

El trabajo en amplificadores de fibra de tierras raras se ha concentrado en el dopante de erbio, particularmente en fibras de modo simple basadas en sílice. Se han demostrado altas ganancias de entre 30 y 40 dB con bajo nivel de ruido con potencias ópticas de bombeo en el rango de 50 a 100 mW.

Un factor que limita la ganancia disponible de un amplificador de fibra dopada con erbio es un fenómeno conocido como absorción de estado excitado (ESA). Este proceso se ilustra en los diagramas de nivel de energía para un sistema de fibra dopada con erbio que se muestra en la figura 2.20. Erbium proporciona un esquema de emisión de tres niveles que se ilustra en la figura 2.20 (a). Sin embargo, en la fibra de erbio, los fotones amplificadores

a la longitud de onda de la bomba tienden a promover los electrones en el nivel superior de las ondas en un estado de excitación aún más alto, como se muestra en la figura 2.20 (b)

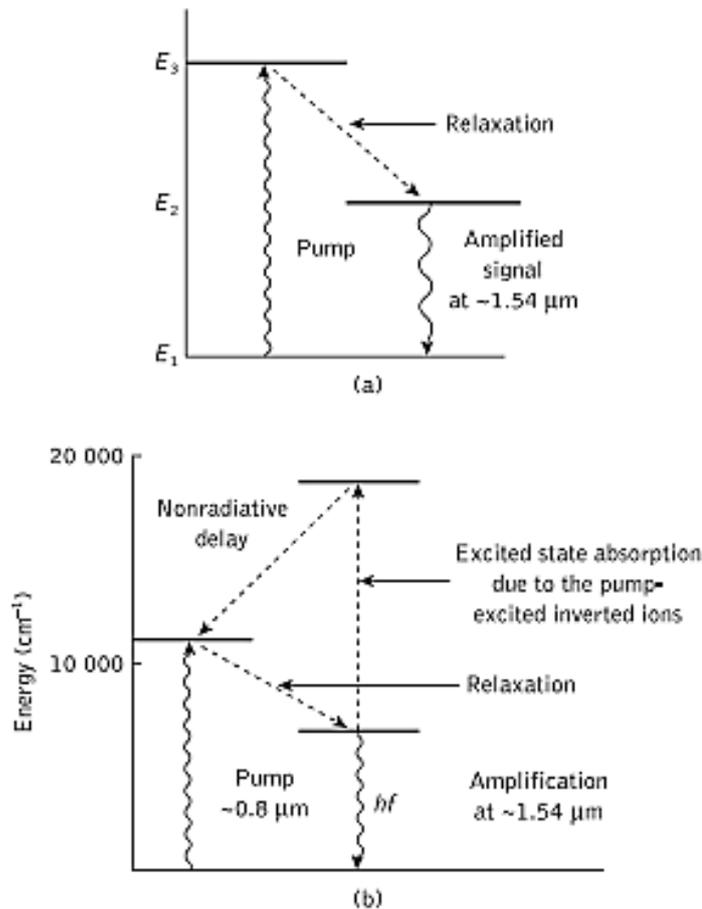


Figura 2. 20: Diagramas nivel de energía para láser de fibra sílice dopado con erbio. Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Estos electrones luego decaen de forma no radiativa a niveles intermedios, como las bandas de bombeo, y luego eventualmente vuelven al nivel superior de láser. Por lo tanto, la ESA reduce la eficiencia de bombeo del dispositivo y, como resultado, es necesario bombear a una potencia mayor para obtener una ganancia específica.(Senior & Jamro, 2009).

La figura 2.21 proporciona un espectro óptico para amplificadores de fibra que muestran los principales sistemas fijos de fibra y fibra Raman y sus correspondientes bandas de amplificación. Muestra la potencia de salida saturada para cada tipo de amplificador de fibra representado como la función de la longitud de onda óptica. El rango de diferentes bandas de longitud de

onda de comunicación óptica (es decir, ventanas con longitud de onda) también se proporciona en la parte superior de la figura.

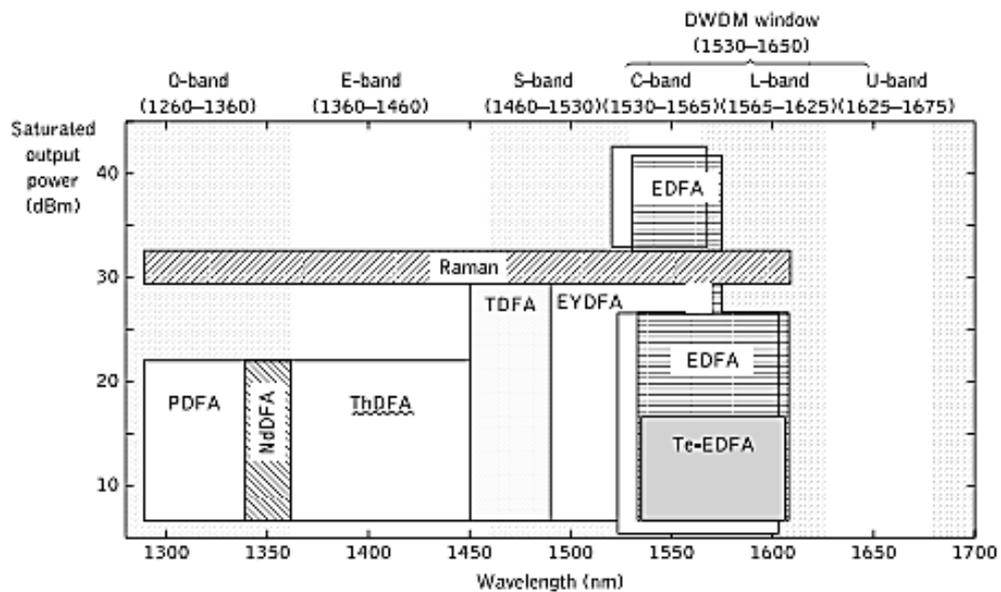


Figura 2. 21: Rango de longitud de onda para diferentes amplificadores de fibra.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Dado que cada material posee diferentes propiedades de absorción-emisión para absorber energía, ya sea en un solo paso o en varios pasos, y para emitir luz en uno o más rangos espectrales estrechos, por lo tanto, no es posible construir un solo amplificador de fibra dopado con tierras raras que pueda proporcionar la amplificación para todas las bandas de fibra. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el amplificador de fibra Raman proporciona amplificación a través de todas las bandas de fibra que cubren las ventanas de 1.3 μm y 1.5 μm . (Senior & Jamro, 2009)

2.9.3 Amplificadores de fibra Raman y Brillouin

Los efectos no lineales dentro de la fibra óptica también se pueden emplear para proporcionar amplificación óptica. Dicha amplificación puede lograrse mediante el uso de dispersión Raman estimulada, dispersión de Brillouin estimulada o mezcla estimulada de cuatro fotones, que proporciona ganancia paramétrica inyectando un haz láser de alta potencia en una fibra óptica no dopada (o dopada).

Entre estas amplificaciones de Raman se muestran las ventajas de la coincidencia de fase propia entre la bomba y la señal junto con una amplia ganancia de ancho de banda o respuesta de alta velocidad en comparación con los otros procesos no lineales.(Huidobro, 2001)

En particular, el amplio ancho de banda de ganancia asociado con la amplificación de Raman es atractivo para sistemas multiplexados por división de longitud de onda (WDM) ya que amplificadores de fibra Raman en comparación con amplificadores de fibra dopada proporcionan ganancia en toda la banda de fibra (es decir, 0.8 a 1.6 μm). en los amplificadores de fibra Raman la frecuencia es 500 cm mayor que la señal a amplificar, y la señal de bombeo puede propagarse en cualquier dirección a lo largo de la fibra. En la figura 2.22 se muestra una representación esquemática de la capacidad de bombeo hacia delante y hacia atrás de los amplificadores de fibra Raman.(Senior & Jamro, 2009)

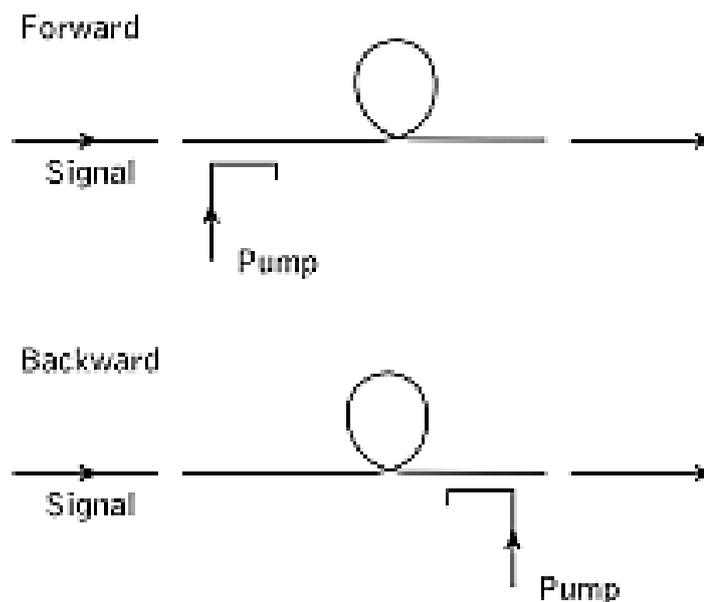


Figura 2. 22: Capacidad de bombeo asociada con el amplificador Raman de fibra.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Por el contrario, la dispersión estimulada de Brillouin es un mecanismo de amplificación no lineal muy eficiente que puede proporcionar altas ganancias con potencias de bomba óptica moderadas de alrededor de 1 mW.

Sin embargo, es el resultado del proceso de dispersión en el que la longitud de onda de la bomba a menudo está a una distancia de alrededor de 20 GHz de la frecuencia de la señal óptica a amplificar. Además, es un proceso de banda estrecha y el ancho de banda de ganancia solo puede estar en el rango de 15 a 20 MHz en la fibra de sílice a una longitud de onda de 1,5 μm .

La limitación en el ancho de banda espectral en una fibra de sílice pura es de alrededor de 50 MHz, lo que fundamentalmente restringe el uso de amplificadores Brillouin a comunicaciones de relativamente baja velocidad. Aunque es posible extender el ancho de banda espectral a 100 a 200 MHz con el dopaje de germanio del núcleo de fibra, no alivia de forma significativa este problema.

Sin embargo, cuando la fibra se bombea con un láser CW con una potencia en el rango de 5 a 10 mW, se pueden obtener ganancias superiores a 15 dB. No obstante, se debe mantener una diferencia de frecuencia muy precisa de alrededor de 11 GHz entre la bomba óptica y la señal para asegurar que el fenómeno de dispersión de Brillouin no disminuya. Por lo tanto, se percibe que este tipo de amplificador de fibra tiene un rango de aplicación bastante restringido. (Senior & Jamro, 2009)

2.9.4 Amplificadores de fibra de banda ancha

Las combinaciones de amplificadores de fibra que pueden usarse para proporcionar amplificación que se extiende a lo largo de un amplio rango de longitudes de onda a menudo se denominan amplificadores de banda ancha o híbridos.

Estas combinaciones pueden ser en serie, en paralelo o en una combinación de ambas configuraciones, mientras que los amplificadores de fibra óptica utilizados en tales combinaciones pueden ser fibras de la tierra rara, fibras Raman o la combinación de ambos tipos de amplificadores de fibra.

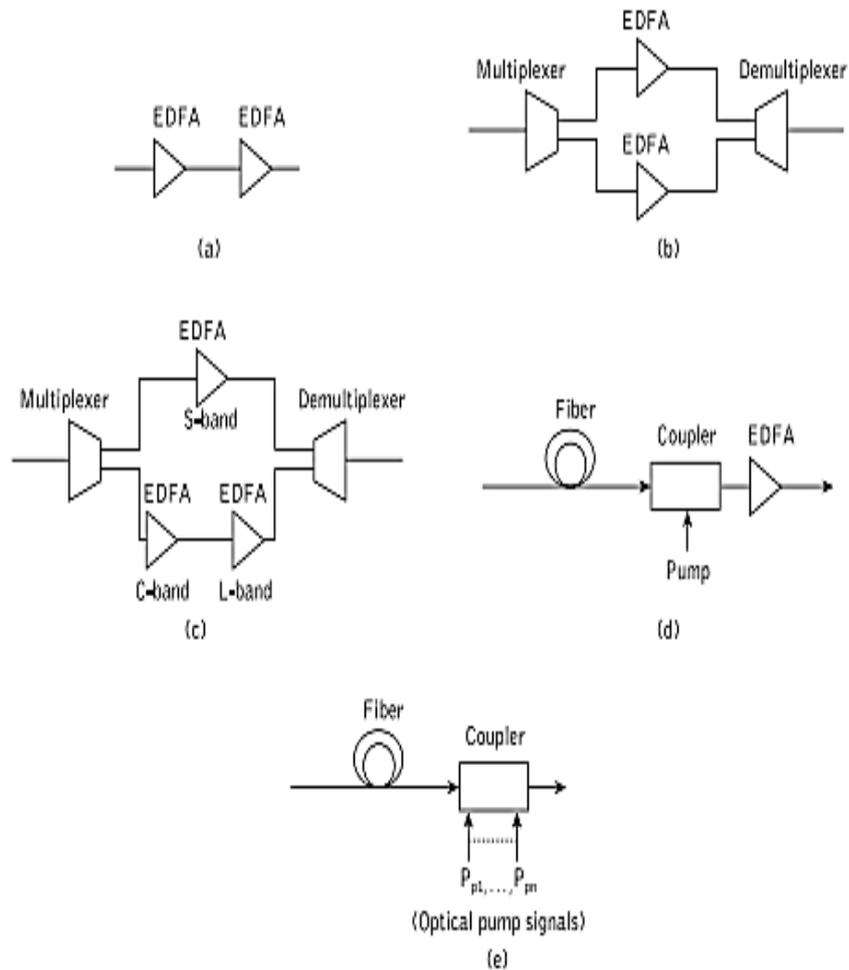


Figura 2. 23: Configuraciones de amplificador para proporcionar amplificación AB
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

La figura 2.23 ilustra estas diferentes formas de obtener la amplificación de banda ancha utilizando amplificadores de fibra. En la figura 2.23 (a) se muestra una configuración dual o serial, donde dos EDFA están conectados en serie o lograr la amplificación de banda ancha, cada uno proporcionando la ganancia para las bandas C y L.

La figura 2.23 (b) representa la configuración paralela con dos EDFA, cada uno colocado en una bifurcación para lograr la amplificación de banda ancha para las bandas C y L, respectivamente. Se puede lograr una mayor expansión en el ancho de banda de amplificación cuando la configuración en serie se introduce dentro de cualquier brazo de la configuración paralela, como se indica en la figura 2.23 (c).

También es posible obtener amplificación de banda ancha usando diferentes tipos de amplificadores de fibra donde nuevamente la configuración se puede organizar usando una combinación en serie, paralela o híbrida. Por ejemplo, la figura 2.23 (d) muestra un EDFA en combinación en serie con un amplificador de fibra Raman. También es posible lograr la amplificación de banda ancha utilizando solo amplificadores de fibra Raman. En este caso, en lugar de usar una única bomba de longitud de onda óptica, se pueden usar múltiples fuentes de bomba para lograr la amplificación de banda ancha.

La figura 2.23 (e) ilustra el concepto de un amplificador Raman de longitud de onda de bomba múltiple donde potencia con subíndice adicional describiendo el número para cada fuente de bomba óptica. En este caso, se puede obtener la amplificación completa usando etapas múltiples cada una para las bandas S, C y L, respectivamente. Sin embargo, esta técnica de múltiples etapas requiere que la multiplexión de longitud de onda de la señal óptica se amplifique en cada una de ellas. (Senior & Jamro, 2009)

2.10 WDM / DWDM

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) implica la transmisión de varias señales ópticas de longitud de onda máxima diferentes en paralelo en una fibra óptica única. Aunque en términos espectrales la WDM óptica es análoga a la FDM eléctrica, tiene la distinción de que cada canal de WDM tiene efectivamente acceso a toda la banda de fibra de modulación de intensidad que con la tecnología actual es del orden de varios gigahertzios.

La técnica se ilustra en la figura 2.24 donde se muestra un sistema de comunicación de fibra óptica convencional (es decir, longitud de onda nominal única) junto con un dúplex (es decir, dos señales ópticas de longitud de onda nominal diferentes que viajan en direcciones opuestas que proporcionan transmisión bidireccional) y también un múltiplex (es decir, dos o más señales ópticas de longitud de onda nominal diferentes transmitidas en la misma dirección) sistema de comunicación de fibra.

Es la última operación WDM que ha generado un interés particular dentro de las telecomunicaciones. Por ejemplo, WDM de dos canales es muy atractivo para una simple mejora del sistema, como el uso de un sistema de 565 Mbit en un enlace de 140 Mbit instalado, o para duplicar la capacidad de un enlace de 565 Mbit. Además, esta estrategia de multiplexación supera ciertas restricciones presupuestarias de energía asociadas con la TDM eléctrica.

Cuando la velocidad de transmisión sobre un enlace óptico particular se duplica utilizando TDM, generalmente se requieren entre 3 y 6 dB adicionales de potencia óptica en el receptor. En el caso de WDM, sin embargo, también se incurre en pérdidas adicionales a partir de la incorporación de multiplexores y demultiplexores de longitud de onda. La multiplexación por división de longitud de onda en sistemas de fibra óptica IM / DD puede implementarse utilizando fuentes de láser LED o de inyección con fibra multimodo o de modo único. (Senior & Jamro, 2009)

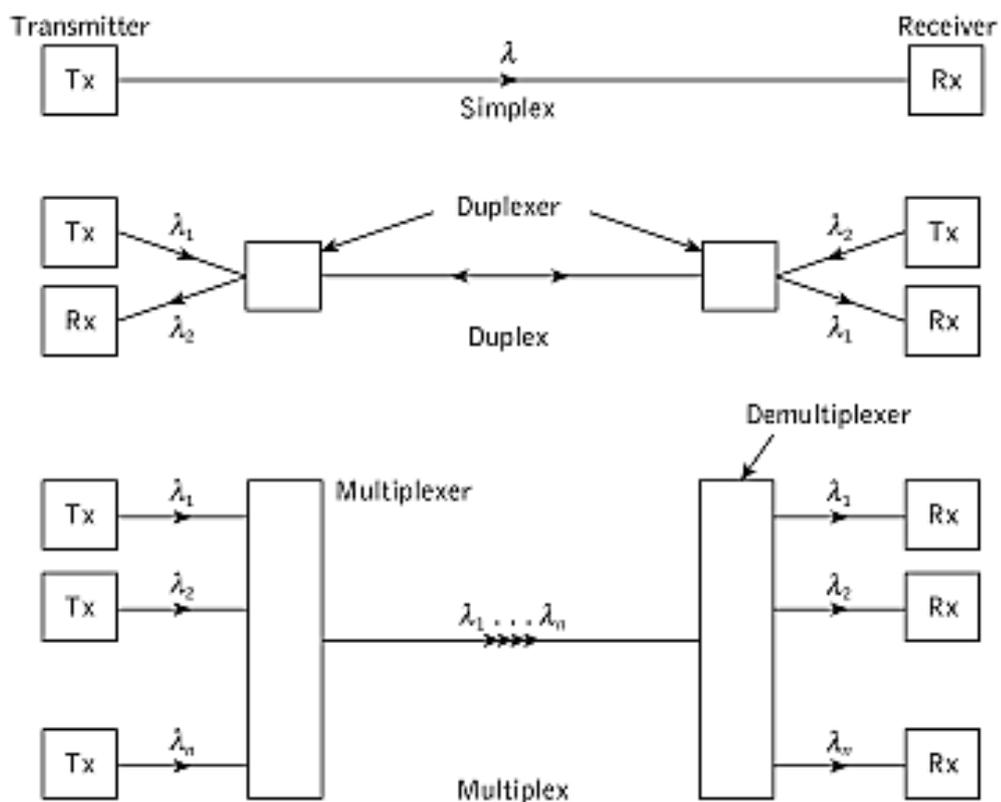


Figura 2. 24: Modos de funcionamiento del sistema de fibra óptica (WDM)
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Sin embargo, el despliegue generalizado de la fibra monomodo ha alentado la investigación de WDM en este medio de transmisión. En particular, los desarrollos relacionados con la transmisión WDM de fibra monomodo se pueden distinguir en dos grandes categorías, a saber, WDM grueso (CWDM) y WDM denso (DWDM). Aunque ambas categorías usan el mismo concepto de canales de longitud de onda múltiple en una sola fibra, difieren en el espaciado de canales que emplean. CWDM, como lo implica la terminología, utiliza un espaciado de canales más amplio y, por lo tanto, proporciona un número significativamente menor de canales que DWDM. (Senior & Jamro, 2009)

CWDM se especifica en la Recomendación UIT-T G.694.2 que define una cuadrícula de longitud de onda con espaciamientos de canal de 20 nm e incluye 18 longitudes de onda entre 1271 y 1611 nm como se muestra en la figura 2.24 Además, tanto el CWDM unidireccional como el bidireccional se proporcionan en la Recomendación UIT-T G.695. Además, la Recomendación G.694.2 proporciona especificaciones de interfaz óptica para sistemas CWDM multicanal en distancias objetivo de 40 km y 80 km. (UIT-T, 2007)

La figura 2.25 también muestra una característica de atenuación para la fibra monomodo estándar mostrada por la línea punteada que indica que cinco de los canales de longitud de onda CWDM caen dentro de la banda E que no se puede utilizar debido al pico de agua. Sin embargo, como la fibra de bajo pico de agua (LWPF) puede emplearse en la región de longitud de onda de la banda E con una característica de atenuación que se muestra con la línea en negrita en la figura 2.25, luego, los sistemas modulares CWDM bidireccionales de 16 canales se han convertido en disponibles comercialmente.

DWDM originalmente se refería a señales ópticas multiplexadas en la región de longitud de onda de 1,55 μm que utilizan las capacidades de los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) para aumentar la capacidad del sistema y, por lo tanto, para reducir el costo del sistema.

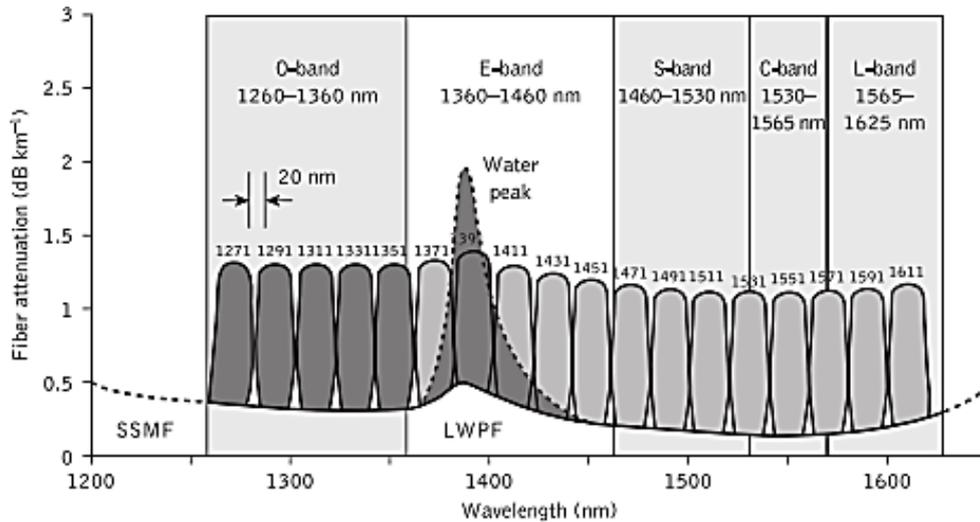


Figura 2. 25: Asignación de canal de longitud de onda óptica.
Fuente: (UIT-T, 2007)

La figura 2.26 muestra un esquema de bloques para un sistema DWDM donde hay una gran cantidad de canales N cada uno utilizando una sola longitud de onda (es decir, desde λ_1 a λ_N), se multiplexan en un medio de transmisión de fibra única. Tanto el despliegue de los EDFA como la compensación de la dispersión son necesarios para que los sistemas de DWDM de larga distancia compensen cualquier pérdida de potencia de la señal óptica causada por los multiplexores de longitud de onda óptica y otros dispositivos ópticos pasivos. Finalmente, un demultiplexor de longitud de onda distribuye cada canal al receptor correspondiente. (Senior & Jamro, 2009)

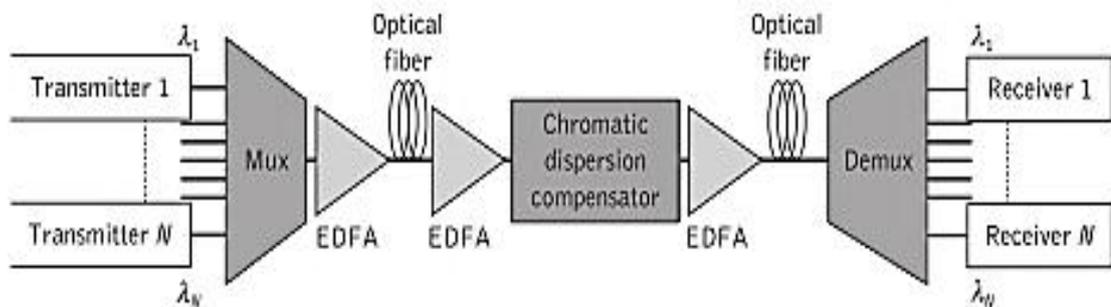


Figura 2. 26 Esquema de bloque de un sistema DWDM.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Los sistemas DWDM utilizan espaciamentos estrechos de canales y, por lo tanto, pueden acomodar varios cientos de canales de longitud de onda en una sola fibra óptica. Las tres posibles separaciones de canales especificadas

para los sistemas DWDM son 1.6 nm (200 GHz), 0.8 nm (100 GHz) y 0.4 nm (50 GHz) mientras que un espaciado de canal aún más pequeño de 0.1 nm (12.5 GHz) es factible, en cuyo caso el sistema también puede denominarse super-DWDM.

A diferencia de la transmisión CWDM, los sistemas DWDM usan filtros ópticos de banda estrecha en la sección de demultiplexación debido al estrecho requisito de espaciamiento de los canales. Además, los transmisores DWDM requieren fuentes de láser de temperatura controlada para estabilizar las longitudes de onda de la señal emitida desde cada transmisor y también la gran cantidad de canales consume un nivel de potencia mucho más alto. Por ejemplo, un sistema CWDM de 16 canales consume tan solo 4 W de potencia mientras que un sistema DWDM convencional requiere aproximadamente 80 W para transmitir el mismo número de canales.

Los recientes desarrollos del sistema DWDM, sin embargo, incluyen módulos transceptores conectables y sintonizables por software que son capaces de transmitir 40 u 80 canales. Tales transceptores se pueden enchufar según sea necesario en cualquier longitud de onda y, por lo tanto, pueden manejar un rango completo de señales de longitud de onda mientras se reduce el costo total del sistema DWDM. Además, el consumo de energía de estos transceptores se mantiene entre 1 y 4 W cuando opera en un rango de temperatura de -5 a 70 ° C. (Senior & Jamro, 2009).

Otra estrategia de WDM que se ha investigado para aplicaciones tanto de telecomunicaciones como de no telecomunicación se ilustra en la figura 2.27. En este caso, en lugar de fuentes de láser de inyección de ancho de línea estrecho, se utilizaron LED de emisión de borde de ancho espectral ancho (63 nm) para proporcionar las señales de portador óptico de longitud de onda múltiple que se transmitieron en fibra óptica monomodo.

Sin embargo, la emisión espectral completa de cada ELED no se transmitió para cada canal de longitud de onda. En cambio, se obtuvo un corte espectral relativamente estrecho (3,65 nm) para cada canal separado usando

el dispositivo multiplexor WDM de red de difracción, como se muestra en la figura 2.27 antes de la transmisión por el enlace óptico.

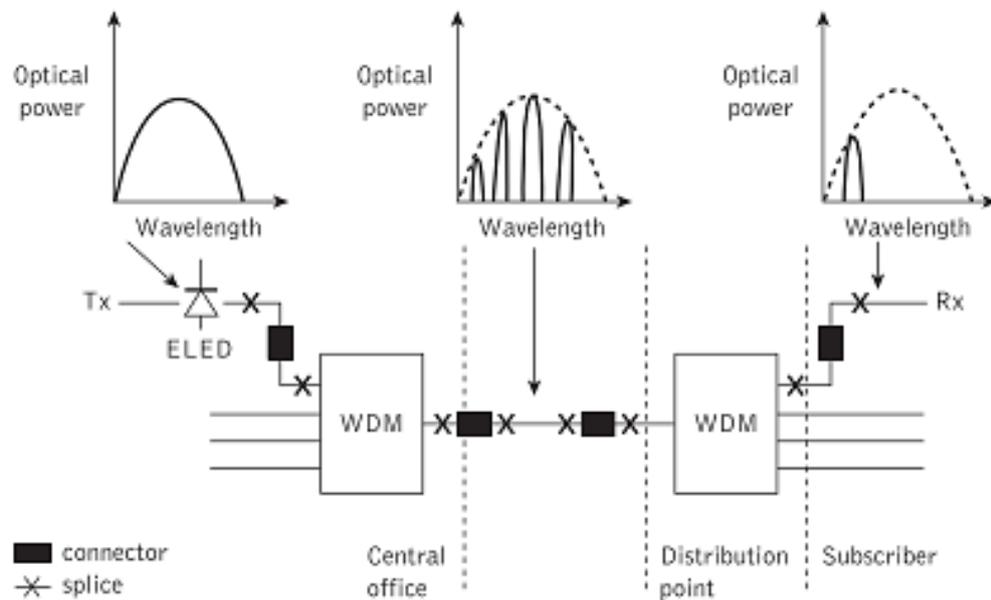


Figura 2. 27: División espectral de salidas LED para formar canales WDM.
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

Esta técnica, que se conoce como corte espectral, podría permitir que se empleen LED con la misma salida espectral global mientras se siguen proporcionando los canales de longitud de onda distintivos para la transmisión entre cada terminal de abonado. En este caso, un dispositivo demultiplexador WDM está ubicado en un punto de distribución para separar y distribuir los diferentes canales ópticos de longitud de onda a los terminales de recepción de abonado apropiados. Se ha demostrado una estrategia similar para 16 canales que utilizan LED superluminiscentes, transmitiendo de nuevo en fibra monomodo. (Senior & Jamro, 2009)

Las fuentes de láser de semiconductores también se pueden usar para la generación de señales ópticas en cortes espectrales. La figura 2.28 muestra un esquema de bloques de un subsistema utilizado para generar un número de canales en el espectro utilizando un láser de femtosegundo y EDFA. Eso también incorpora moduladores ópticos y líneas de retardo para operar en múltiples señales que se amplifican antes de la etapa de división y después de la etapa de combinación

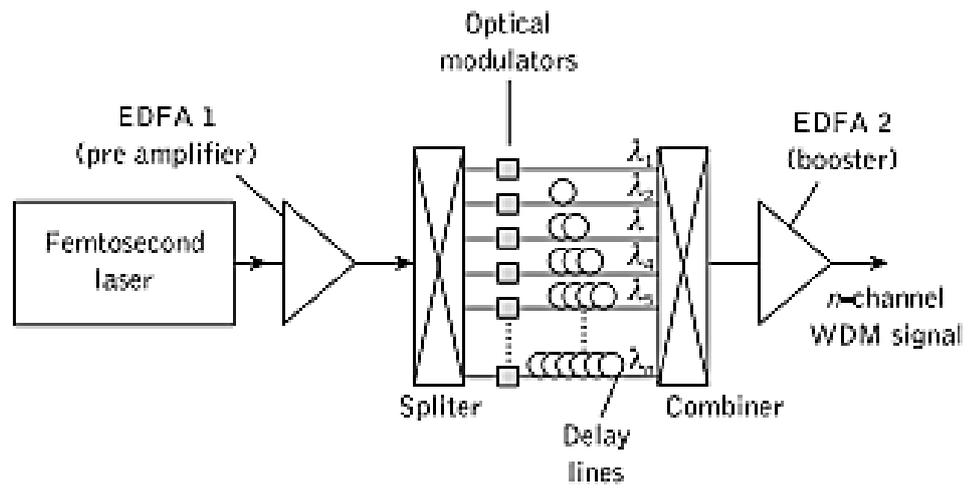


Figura 2. 28: Esquema de bloque de una técnica de corte de espectro
Fuente: (Senior & Jamro, 2009)

CAPITULO 3: Diseño y simulación del Sistema Óptico.

3.1 Descripción y simulación del proyecto.

El proyecto se refiere a un diseño óptico de enlace de fibra a través de cable interoceánico entre Ecuador continental y las Islas Galápagos para proveer servicios de gepon, utilizando tecnología WDM en banda C.

Para la simulación de este proyecto se eligió el software Opti system con interfaz en Matlab utilizado para el diseño de enlaces ópticos con ciertas características, se puede realizar pruebas de ensayo y error, tienes todos los componentes de un sistema óptico, amplificadores, receptores, transmisores, acepta los diferentes tipos de modulación y multiplexación, incluso diagramas de la señal. Para realizar el análisis en el simulador se plantearon diferentes parámetros como el modelo de la fibra, la distancia y ganancia entre cada amplificador para que arroje un valor óptimo de BER y logre el enlace garantizar conectividad.

3.2 Locación geográfica.

Para el modelo sugerido del cable de fibra óptica submarino, se consideran los puntos, Punta Carnero en la provincia de Santa Elena y la isla de San Cristóbal en las islas Galápagos, se eligió el diseño de estos sitios porque hay un nodo en Punta Carnero en donde llega la fibra óptica correspondiente a la Corporación Nacional de Telecomunicaciones, CNT por lo que se consideró como el lugar propicio para desarrollar el enlace, en relación a Galápagos, se tuvo en cuenta San Cristóbal, ya que es la isla con menos millas hasta Ecuador continental, y con la estación terrena de la empresa pública CNT.

La localización exacta del anclaje de la fibra, ya que existe una estructura previa por la EP, es en la playa Segunda, Zona Naval de la Armada Ecuatoriana, en donde se tendría que el cable óptico bordear un tramo la isla San Cristóbal para poder enlazarnos a la estación.

3.3 Recorrido óptimo de la fibra.

Teniendo en cuenta que nuestras Islas Galápagos es considerada una de las 7 maravillas del mundo por su preservación a la vida, a la naturaleza, a la flora y fauna, los diversos tipos de trabajo en este caso un proyecto tecnológico en donde se utilizará toda una aérea de conservación debe causar el menor impacto para que no afecte el lecho marino, ni la vida de las diversas especies que habitan en sus islas.

Para poder anclar el cable óptico a sus costas, debe ser un lugar arenoso ya que se debe enterrarlo a cierta profundidad para que garantice la vida útil del sistemas sin fallos externos, como existe una infraestructura previa en las islas y en el continente dio lugar a que sean los lugares idóneos para realizar el cableado, ya que tienen acceso por carreteras, equipos, espacio físico apto para implementar las centrales, los puntos son: Santa Elena, Punta Carnero y San Cristóbal, playa Segunda, Zona Naval de la Armada, a una distancia de 1050km como se muestra en la figura 3.1.

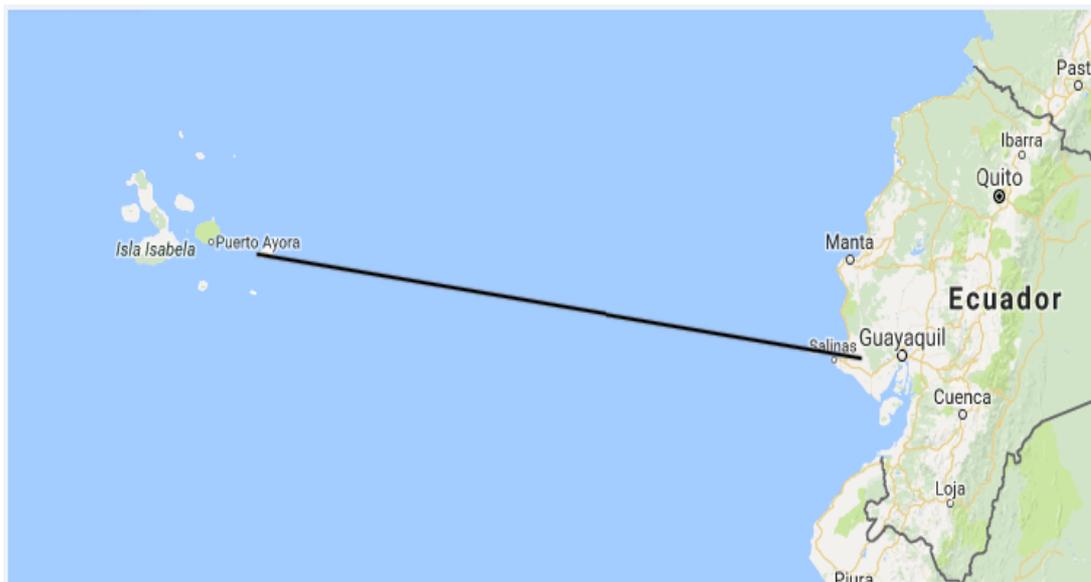


Figura 3. 1: Distancia 1050 km entre el Continente y el Archipiélago.
Fuente: Google Earth.

Una vez señalado el tramo se divide en dos diferentes zonas, zona marítima y zona terrestre. Debido al lecho marino se debe considerar aspectos

naturales y la profundidad del suelo para poder tener una ruta sin complicaciones, ni pérdidas.

3.3.1 Aspectos Naturales.

La geomorfología de las Islas Galápagos está conformada por su plataforma de origen volcánica y se extiende por las cordilleras de Carnegie y Colon como prolongaciones naturales, el centro de expansión de las Galápagos, el punto caliente de Galápagos, la zona de subducción y los lineamientos marinos volcánicos. La cordillera de Colon es el centro de divergencia de las Galápagos y los lineamientos submarinos. Su origen está asociado a la influencia del punto caliente de Galápagos en este centro de expansión generalmente con profundidades menores a 1800m, el área de interés corresponde a los desplazamientos del material volcánico (Pazmiño & Santana, 2005).

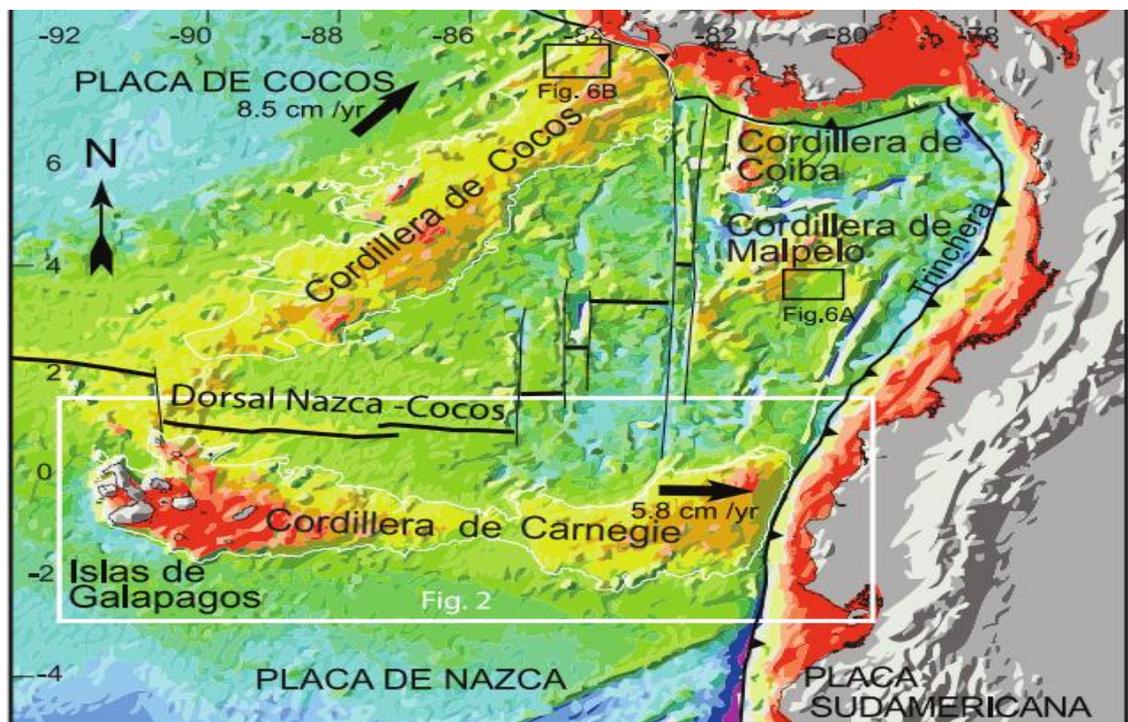


Figura 3. 2: Cordillera submarina de Carnegie y plataforma volcánica de Galápagos
Fuente: (Pazmiño & Santana, 2005)

Para poder establecer el recorrido de fibra en la parte marina es primordial evitar tramos cercanos a la cordillera de Carnegie y la plataforma volcánica, o llamados puntos calientes, ya que, al existir desplazamiento de

material volcánico, gases concentrados puede afectar la estructura de la fibra y causar graves daños al sistema de comunicación. (Pazmiño & Santana, 2005)

De acuerdo al estudio se fijó que el punto de anclaje de la fibra en el Archipiélago será Puerto Baquerizo Moreno, por lo que no habrá afectación en la estructura del cable ya que la plataforma volcánica se ubica a una distancia de 220 Km (Pazmiño & Santana, 2005)

3.3.2 Profundidad del suelo Marino

Para establecer la ruta que seguirá el enlace, se empleó cartas batimétricas del INOCAR, la cual será por zonas que no superan los 3.500 metros de profundidad. La parte costera de Punta Carnero y San Cristóbal no superan los 100 m de profundidad. La longitud del tendido de la fibra en el sistema de comunicaciones es aproximadamente 990 km.

Para definir la ruta más óptima con profundidades precisas se debe realizar estudios de geología y geofísica marina en el territorio ecuatoriano, donde comprendería la instalación del sistema de comunicación, no existe documentación de tales parámetros por lo que está regido a cartas batimétricas provenientes del INOCAR.

El enlace diseñado es punto a punto por lo que no tiene redundancia, la topología no es en anillo, por ende, se debe garantizar la instalación de la fibra previniendo a nivel de factores externos cualquier tipo de daño que pueda incurrir en la misma, desde afectaciones por barcos pesqueros, turismo, diversas actividades marítimas.

El recorrido del cable en el tramo terrestre será por ductería hasta las respectivas centrales, la distancia desde el punto de amarre (BMH) en la costa hasta el nodo en la provincia de Santa Elena es de 7 km, la distancia del punto de amarre playa Segunda Naval, hasta la respectiva central es de 2km. Lo que da una distancia total de 1050 km.

3.4 Componentes del sistema óptico submarino

3.4.1 Tramo Terrestre

Se refiere al tramo correspondiente entre el pozo de amarre BMH y la estación, los equipos que se emplearan son:

- SLTE, equipo terminal de Línea
- PFE, equipo de generador de potencia
- BMH, pozo de amarre.
- Sistema de administración de la red
- Cable terrestre

Actualmente a través de modulación DWDM (Multiplexación por división de longitud de onda densa) se puede obtener capacidades de canales de 0.8nm de 100Gb/s.

El equipo que se empleara permite analizar el comportamiento de la red, señales atenuadas, errores de bits, conocer la fiabilidad del sistema, las características importantes presentadas es detección coherente de la luz y procesamiento digital de señales, con este parámetro se podrá concluir que el procesamiento digital su función es corregir y detectar errores ocasionados por la dispersión cromática o polarización, sin emplear compensadores ópticos.

El Equipo SLTE es el elemento que me brinda potencia a todo mi enlace óptico, se genera la multiplexación óptica y el procesamiento de señal lo que permite la transmisión de información por todo el canal. La Compañía Xtera® es un proveedor integrado, de innovadoras soluciones para Sistemas Submarinos, presenta con estas características:

- Hasta 200 canales de 10/40/100 Gb/s
- Gama de esquemas de protección simples y rentables
- 37,5 GHz Separación entre canales
- Detección coherente: VER
- Instalaciones de comunicación de datos
- Alcance extendido a través de la amplificación Raman

- Fast Ethernet / 1 GbE / 10 GbE / 100 GbE
- Multiplexor de caída de adición óptico reconfigurable
- STM-1 a STM-256
- Sistema de gestión de red unificada punto a punto

3.4.2 Tramo Marino

Es el trayecto en el lecho marino, entre los pozos de amarre de las respectivas costas. Los elementos que la conforman:

- Cable Submarino
- Repetidores: amplificar y regenerar la señal.
- Unidades de derivación: integrar estaciones secundarias a la línea troncal

El componente fundamental del enlace es el medio físico, para poder recibir y transmitir la señal, en este caso la fibra óptica. De acuerdo con el tipo de fibra y sus especificaciones, la más óptima es la fibra monomodo ya que se requiere recorrer grandes distancias, el núcleo es pequeño y el haz de luz se proyecta de forma lineal.

Nuestro sistema debe estar regido bajo para parámetros internacionales, como son las recomendaciones UIT-T para el caso de la fibra se debe considerar estos aspectos, a continuación, se señalarán los tipos de fibras monomodo con su recomendación UIT-T:

“Recomendación UIT-T G.652 (2005), *Características de las fibras y cables ópticos monomodo.*

Recomendación UIT-T G.653 (2006), *Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada.*

Recomendación UIT-T G.654 (2006), *Características de los cables de fibra óptica monomodo con corte desplazado.*

Recomendación UIT-T G.655 (2006), *Características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula.*

Recomendación UIT-T G.656 (2006), *Características de las fibras y cables con dispersión no nula para el transporte óptico de banda ancha.*”(UIT-T, 2007)

Se puede deducir que las características de las fibras y cables ópticos apropiados para un enlace submarino tienen que cumplir las medidas y parámetros G.655 Y G.666, en relación con los valores que define dichas recomendaciones.

La recomendación G.655, señala las características de fibras y cables ópticos monomodo con dispersión desplazada no nula, en donde el valor absoluto del coeficiente es mayor que algún valor diferente de cero en longitudes de onda superiores a 1550 nm. En los sistemas con multiplexación por división de longitud de onda densa DWDM, en este modelo de fibra, la dispersión reduce los efectos no lineales que puede generar pérdida espectral.(UIT-T, 2007)

La recomendación G.656, señala las Características de las fibras y cables con dispersión no nula para el transporte óptico de banda ancha, en donde el valor positivo del coeficiente de dispersión es mayor que otros valores no nulos en longitudes de onda de 1460-1625 nm. En el intervalo especificado de longitud de onda se puede utilizar este tipo de fibra para sistemas CWDM y DWDM. Es óptima para enlaces submarinos de gran distancia ya que se reduce el crecimiento de los efectos no lineales a través de la dispersión que pueden afectar en sistemas de DWDM (UIT-T, 2007).

3.5 Simulación en base a la elección de la fibra

Para el tipo de fibra se inclinó a la marca Corning al modelo Vascade como se muestra en la tabla 3.1 con la gama de sus diferentes fibras, ya que proporciona características de confiabilidad, gran estabilidad óptica, capacidad y velocidad, propiedades ópticas administradas y de equivalencia en las redes submarinas incluso a distancias transoceánicas.

Tabla 3. 1 Tipos de fibras, marca Corning, valores comparativos.

Typical Values at 1550 nm						
	Vascade® EX3000 Fiber	Vascade® EX2000 Fiber	Vascade® EX1000 Fiber	Vascade® LEAF® EP Fiber	Vascade® L1000 Fiber	Vascade® S1000 Fiber
Description	An ultra-low-loss fiber with very large effective area and high positive dispersion	An ultra-low-loss fiber with large effective area and high positive dispersion	An ultra-low-loss fiber with high positive dispersion	A negative dispersion, NZDSF with large effective area and positive dispersion slope	A high positive dispersion fiber with large effective area	A high negative dispersion fiber with negative dispersion slope
Attenuation (dB/km)	0.158	0.160	0.167	0.198	0.182	0.231
Effective Area (μm ²)	150	112	76	65	100	27
Dispersion (ps/nm·km)	+20.8	+20.2	+18.5	-4.0	+18.5	-38.0
Dispersion Slope (ps/nm ² ·km)	+0.06	+0.06	+0.06	+0.12	+0.06	-0.12
PMD _D (ps/√km)	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
Effective Group Index of Refraction (N _{eff})	1.4623	1.4625	1.4626	1.4690	1.4684	1.4743

Fuente: (CORNING, 2018)

En base a estos datos como es la atenuación y la dispersión cromática de cada una de las fibras en 50 km como se ilustra en la figura 3.3, utilizando multiplexación WDM se realizó la respectiva simulación para poder obtener el resultado de BER y conocer cual tipo de fibra es idóneo para garantizar conectividad.

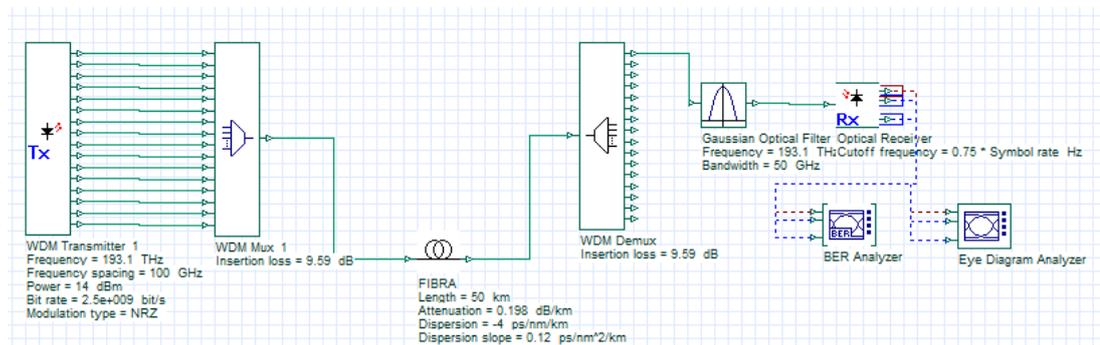


Figura 3. 3 50 km, características de la fibra óptica.

Elaborado por: Autor

Como se ha detallado previamente los componentes a usar en el sistema de comunicación óptica serian: SLTE con potencia de transmisión de 14dBm, tasa de Bits 10 Gb/s, multiplexación y demultiplexacion un total de 19,18dB,

amplificador de erbio con ganancia de 11dB, filtro 1.5dB, receptor óptico, y el tramo de fibra de 50 km.

Tabla 3. 2 Resultados obtenidos Ber – Factor Q.

Typical Values at 1550 nm						
	Vascade® EX3000 Fiber	Vascade® EX2000 Fiber	Vascade® EX1000 Fiber	Vascade® LEAF® EP Fiber	Vascade® L1000 Fiber	Vascade® S1000 Fiber
Attenuation (dB/km)	0.158	0.160	0.167	0.198	0.182	0.231
Effective Area (µm ²)	150	112	76	65	100	27
Dispersion (ps/nm·km)	+20.8	+20.2	+18.5	-4.0	+18.5	-38.0
Dispersion Slope (ps/nm ² ·km)	+0.06	+0.06	+0.06	+0.12	+0.06	-0.12
PMD _Q (ps/√km)	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05
Effective Group Index of Refraction (N _{eff})	1.4623	1.4625	1.4626	1.4690	1.4684	1.4743
TASA DE BIT BER	1,04 X 10⁻⁹	5,22 x 10⁻⁹	3,53 x 10⁻¹⁰	5,77 x 10⁻¹⁰	1,23 x 10⁻⁹	1
MAX FACTOR Q	5,98	5,79	6,15	8,81	5,95	0

Elaborado por: Autor

En base a los valores obtenidos en la tabla 3.2 se puede concluir que la fibra más idónea y que cumple los parámetros de la recomendación UIT-T G.655 para efectuar el enlace es la Vascade LEAF, fibra monomodo, ya que obtuvo el menor número de bits erróneos conforme al total enviado.

3.5.1 Atenuación de la fibra

Para calcular la atenuación total de la fibra, se necesita saber el recorrido total del enlace, que es de 1050 km, basados en los tramos terrestres y marinos, como se mencionó antes la distancia es de 7km - 2km, y 990km respectivamente, adicional a este valor se debe considerar el 5% como margen de error por factores no previstos.

De acuerdo con las especificaciones de las recomendaciones UIT-T, la fibra se debe encontrar dentro de los parámetros 6.55 y 6.56, en base a los modelos de fibra el que cumple los requerimientos, operando a banda C, longitud de onda de 1550nm, y con dispersión desplazada no nula, fibra

monomodo Corning Vascade LEAF EP FIBER, la cual presenta atenuación por longitud de 0,198 dB/Km

$$\text{Perdidas en la fibra: } D * \alpha$$

Donde D se refiere a distancia (Km) y α corresponde al coeficiente de atenuación de la fibra. (dB/km). Perdidas de la fibra: $1050 * 0,198$ que nos da un valor de atenuación de 209 dB/km

Para calcular la dispersión total acumulada $\Delta(T)$, se debe conocer los valores de la dispersión cromática $M(\lambda)$, el ancho espectral de la fuente $\Delta(\lambda)$ y la longitud total del sistema óptico L, por lo que, como no se puede calcular con precisión la capacidad de cada canal ya que siempre se estará innovando técnicas de transmisión que nos aproximan al límite espectral que es de THz, se considera la dispersión cromática en base al modelo de fibra elegido, que muestra un coeficiente de -4 ps/nm-km, se considera el ancho espectral como valor típico de cada haz de luz, que es 0.1nm para enlaces de grandes distancias, se puede calcular:

$$\text{Dispersión total acumulada } \Delta(T): M(\lambda) * \Delta(\lambda) * L$$

Nos da un valor de 42,62 ps, el cual no debe superar el 10% del tiempo de bit, basándonos en la norma SONET/SDH. Si se emplea técnicas de procesamiento digital de señal para mejorar el rendimiento en el receptor que permite compensar la señal lo opuesto a la dispersión, que es el retraso, deformación del pulso óptico en relación con la propagación de la fibra, se podría trabajar a velocidades mayores de 5 hasta 40 Gb/s.

El Ancho de banda AB se calcula por medio de la dispersión acumulada $\Delta(T)$, y su resultado nos permite definir que mientras el SLTE emplee la codificación retorna a cero (RZ), se tendría que la capacidad total de cada canal va a ser igual al ancho de banda obtenido.

$$AB = 0.5 \Delta(T)$$

Resultado de 11.73Gb/s por canal.

3.5.2 Atenuación por empalmes

Cada carrete de fibra comprende 25km de cable, lo que para una distancia de 1050km, corresponderían 42 bobinas, por efecto 41 empalmes realizados, adicional a esto se debe agregar los empalmes efectuados en los pozos de amarre, que da un total de 43 empalmes en todo el enlace óptico. Para calcular la atenuación total de empalmes α_e , se debe multiplicar el número total de empalmes N_e realizados a lo largo del sistema con el valor estándar por pérdida de cada empalme que es de 0.02 dB, y así se obtendrá el valor de α_e que es de 0.86 dB

3.5.3 Atenuación por inserción de conectores

El enlace solo tendrá dos conectores, que están ubicados a los extremos, en el lado de transmisión y recepción respectivamente. El valor de acuerdo con el tipo de conector de pérdida es de 0.4 dB, la atenuación total α_c es igual al número de conectores N_c por su coeficiente de pérdida que nos da un valor de 0,8 dB

3.5.4 Atenuación por inserción

Cuando nuestro sistema está definido por multiplexación WDM, éste genera un valor de pérdida por la multiplexación y demultiplexación que es igual a 19,18 dB

3.5.5 Atenuación por filtros

Pérdida generada por filtros es igual a 1,5 dB como valor promedio.

3.5.6 Atenuación de penalización por dispersión

El valor de pérdida es de 2dB y ocurre por efecto de las no linealidades, y esto hace que pierda potencia el enlace.

3.5.7 Atenuación por envejecimiento.

El tiempo de vida de todos los componentes, especialmente los amplificadores, de un sistema óptico submarino corresponde a 25 años, por lo que a medida que el tiempo transcurra se incrementará la atenuación el

0.005dB/km durante el tiempo de vida útil del enlace. El valor para considerar de atenuación es de 2,5 dB/km.

3.5.8 Margen de pérdidas

Es un valor que se considera en los sistemas de comunicaciones por factores que al momento del estudio no tuvieron mayor relevancia o no se contemplaron esas posibles pérdidas, puede ser temas de acoplamiento, inserción, mal realizada una fusión, el rango es de 4,8 dB a 6 dB. Para este diseño se contemplará pérdida de 4,8 Db

3.5.9 Atenuación total del enlace óptico

Para poder obtener la atenuación total se debe sumar todas las pérdidas previamente calculadas que se presentan en el sistema, y esto nos da un valor de 241 dB

3.6 Potencia del Sistema

De acuerdo con el mejor equipo SLTE en el mercado, conforme a sus valores de potencia de salida, y umbral de recepción se basará nuestro proyecto. El equipo es Xtera's que proporciona potencia de salida de 24dBm con pre amplificadores de 14dBm y el umbral de recepción -28dBm.

Para obtener el valor de pérdidas máximas que puede soportar el equipo aun teniendo potencia de recepción favorable, se calcula a través del presupuesto de potencia ΔP que es igual a la potencia de salida Tx, P_{TX} , menos la sensibilidad del Rx, P_{RX} , que nos da un valor máximo de 42 dB de pérdida, pero las atenuaciones totales del enlace es igual 241 dB por ende se necesita colocar amplificadores a cierta distancia a lo largo del enlace para garantizar la potencia de la señal, y que sea la comunicación óptima.

3.6.1 Amplificadores

Para el diseño se empleará amplificadores Xtera® ya que ofrece un sistema de transmisión altamente optimizado y robusto, es un repetidor EDFA que reduce el ruido de la línea, lo que permite ofrecer sistemas de gran ancho

de banda y largo alcance, puede instalarse a una profundidad calificada a 8,000m, control de inclinación del amplificador, eliminando la necesidad de ecualizadores de inclinación separados.

Como se ha obtenido el valor de la atenuación total del enlace y se conoce la potencia de recepción de nuestro equipo SLTE, en base a la distancia total del enlace que es 1050Km, y la profundidad que es 3500m conforme a las cartas barométricas, se colocara cada 50km un amplificador, esto nos da un total de 20 amplificadores Xtera® a lo largo del enlace, con una ganancia total de 220 dB, ya que cada amplificador proporciona 11dB

3.6.2 Potencia de Recepción

Para poder calcular la potencia de recepción P_{RX} , es igual a la potencia de transmisión del SLTE P_{TX} , más la ganancia de los amplificadores G_A , por el número total N_A colocados a lo largo del sistema, menos el valor total obtenido por las atenuaciones αT en el enlace.

Se obtiene un valor de -7.14 dBm en donde se puede concluir que el valor obtenido garantiza la recepción de las ondas transmitidas ya que es mayor que el umbral de recepción del SLTE que es -28dBm.

3.7 Simulación en base a distancia y potencia de Amplificadores

Una vez definida el tipo de fibra para el enlace, se enfoca en la distancia y ganancia entre cada amplificador. La multiplexación que se empleara en el sistema es de WDM y se calculara en un trayecto de 150 km.

Con exactamente iguales valores que se utilizaron para calcular la tasa de bit, ahora se adicionará como valor fijo: que son los datos de fabricante en la fibra resultante de la simulación previa, valor de atenuación 0,198 dB/Km, el valor de la dispersión cromática -4ps/nm-Km y la ganancia del amplificador que es de 11dB, colocado cada 75 km, como se ilustra en la figura 3.4:

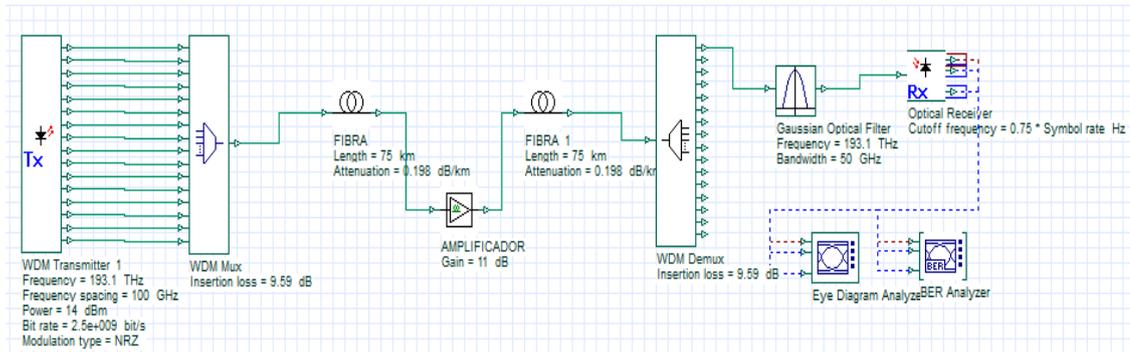


Figura 3. 4 150 km, Ga y distancia de amplificadores.
Elaborado por: Autor

En esta simulación se obtuvo como resultado de BER 6.38×10^{-8} , cabe señalar que no se utilizaron las técnicas PSD, detección de luz, ni compensación por dispersión. Para comparar resultados de cuál es la distancia correcta y ganancia de cada amplificador para que el enlace sea óptimo, se hizo pruebas con distancia y ganancia diferente, 50 km y 11 dB respectivamente, para conocer la tasa de bit. El resultado del BER con estos parámetros es de 6.56×10^{-13} donde se puede concluir que la mejor distancia y ganancia para que arroje una tasa de bit aceptable es de 50 km de distancia entre los 20 amplificadores que se emplearán, a una ganancia de 11 dB

Con estos valores técnicos obtenidos se puede simular la complejidad y totalidad del enlace de fibra óptica entre el continente y Galápagos, los elementos que corresponden al sistema global óptico como se ilustra en la figura 3.5, en base a cálculos y parámetros específicos son:

- Terminal de línea óptico
 - ◆ Multiplexación WDM
 - ◆ P_{tx} : 14 dBm
 - ◆ 100GHz entre frecuencia/ 16 canales
 - ◆ BER: 2,5Gb/s
- Multiplexación y demultiplexación WDM
 - ◆ P_T de inserción: 19.18 dBm
 - ◆ AB: 20 Ghz
 - ◆ Canales: 16

- Amplificador EDFA
 - ◆ G_A : 11dB
 - ◆ Total: 20 amplificadores

- Fibra Vascade LEAF EP
 - ◆ L: 1058 km
 - ◆ α : 0,198dB/Km
 - ◆ Dispersión cromática: -4ps/nm-Km

- Filtro
 - ◆ AB: 10 GHz
 - ◆ Perdida: 1,5 dB

- Receptor
 - ◆ BER: 2.5Gb/s

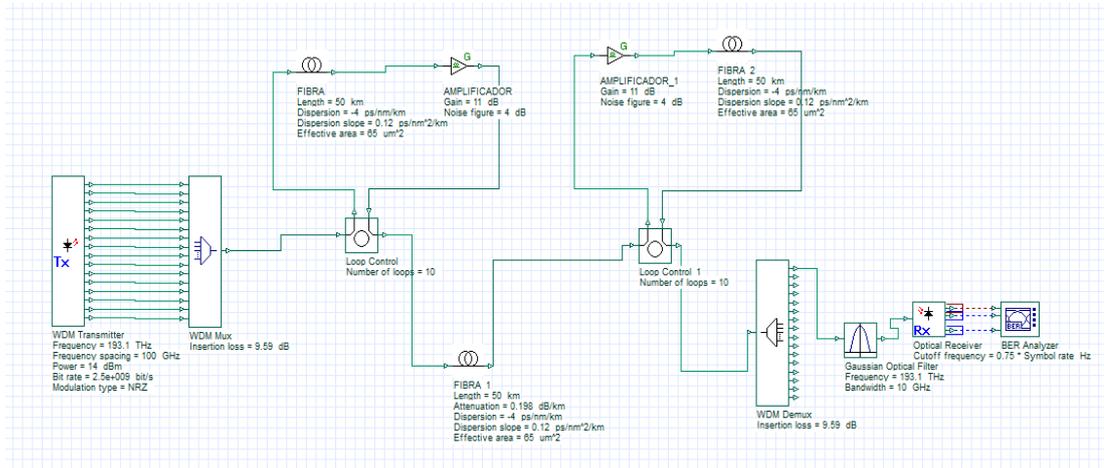


Figura 3. 5 Enlace de fibra interoceánico entre el continente y Galápagos.
Elaborado por: Autor

El enlace propuesto tiene una distancia entre los puntos referidos de 1050 Km, colocados 20 amplificadores a lo largo del enlace, en base a tecnología WDM, genera una capacidad del sistema de 40Gb/s, dando como resultado valores de tasa de bit de 10^{-18} concluyendo que en 16 canales de 2,5 Gb/s la transmisión de la señal es óptima lo que permite garantizar la conectividad del enlace como se muestra en la tabla 3.3, Identificando los

diagramas de mayor y menor tasa de bit, en las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

Tabla 3. 3 Resultado de BER y factor Q del enlace óptico submarino.

CANAL	FRECUENCIA	TASA DE BIT	SNR
1	193.1	3.70×10^{-14}	7.50
2	193.2	4.08×10^{-15}	7.31
3	193.3	6.40×10^{-15}	7.70
4	193.4	2.90×10^{-15}	7.40
5	193.5	6.95×10^{-18}	6.20
6	193.6	2.8×10^{-13}	7.14
7	193.7	5.40×10^{-16}	8.50
8	193.8	1.20×10^{-17}	6.30
9	193.9	4.06×10^{-13}	8.40
10	194.0	2.90×10^{-17}	7.50
11	194.1	8.70×10^{-17}	7.01
12	194.2	4.28×10^{-12}	6.50
13	194.3	7.40×10^{-15}	8.42
14	194.4	4.13×10^{-18}	8.75
15	194.5	1.4×10^{-14}	7.16
16	194.6	8.92×10^{-13}	8.20

Elaborado por: Autor

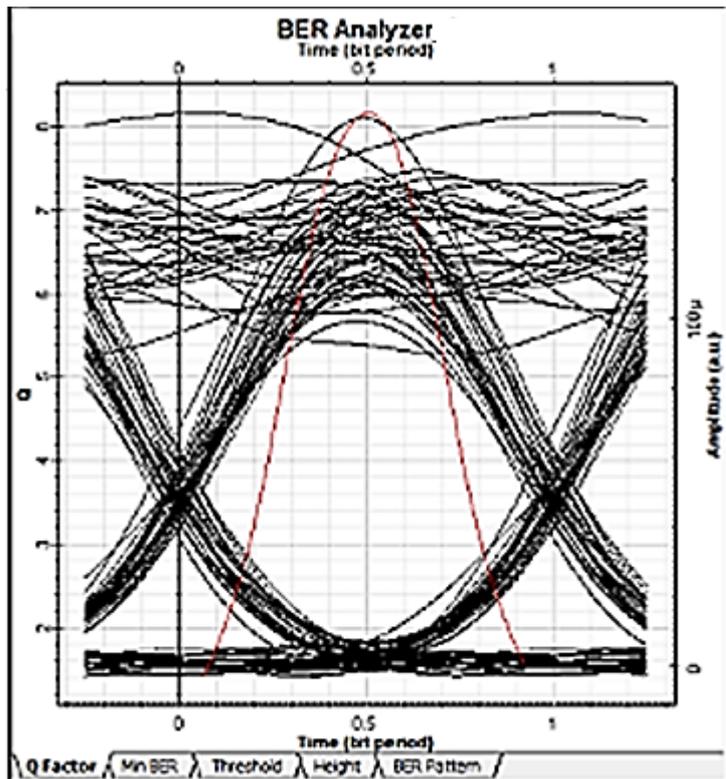


Figura 3. 6 Canal 12
Elaborado por: Autor

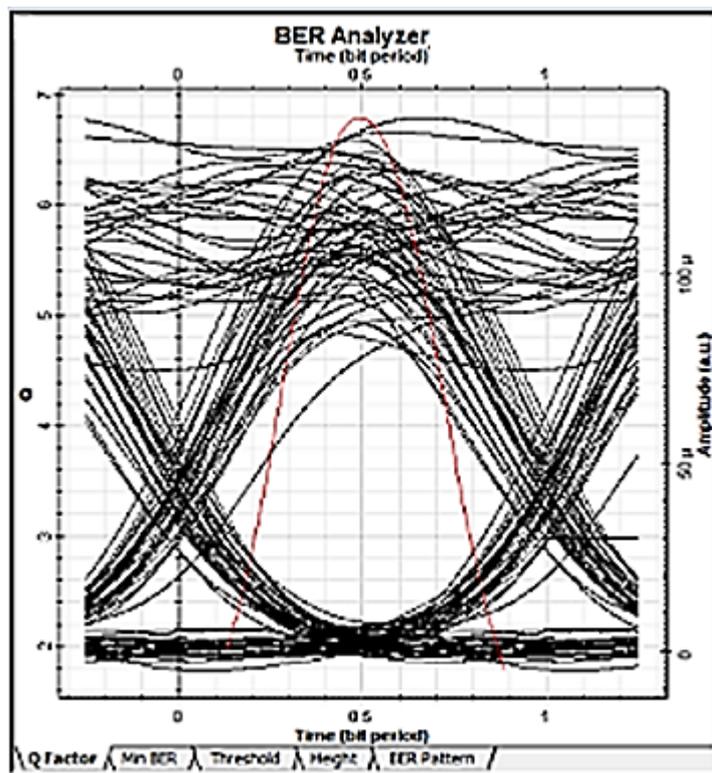


Figura 3. 7 Canal 14
Elaborado por: Autor

CAPÍTULO 4: Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La realización de este trabajo de titulación, una de las ventajas es que permite ampliar los conocimientos de fibra óptica en el campo de sistemas submarinos, conocer los componentes del enlace, sus características y poder elegir los mejores elementos en base a ciertos parámetros para que el enlace entre el continente y el Archipiélago de Galápagos sea óptimo, eficaz, a mayor velocidad de transmisión y que garantice conectividad.

- En la actualidad en el Archipiélago como único medio de conexión es a través de enlaces satelitales, los cuales no garantizan una conectividad al 100%, ya que es limitado por lo que no hay acceso a la red por parte de la población.

- El proyecto brindará conexión a alta capacidad y velocidad, servicios de voz, datos y video con un sistema de gestión centralizado, dotará de acceso universal a las Tecnologías de Información y Comunicación, mejorará a nivel socioeconómico de la región, aportando grandes ventajas, beneficios a hogares, PYME e institutos, mejorando el turismo y generando ganancias económicas, culturales y sociales a las islas Galápagos.

4.2 Recomendaciones

- El presente trabajo se enfocó en el diseño de un enlace troncal, en este caso punto a punto, por lo que, a la hora de la implementación, su estructura topológica debe ser en anillo para efectos de redundancia y si se presenta alguna alteración, complicación en el enlace principal no afecte a la conectividad existiendo un back up que garantice la transmisión.
- Otra opción para garantizar conectividad a las islas Galápagos y que tenga acceso a nivel mundial a través del SAM-1 que conecta a Sudamérica, EEUU y el caribe, el cual existe conexión en la provincia de Santa Elena, es realizar un Branch Unit en el cable SAM-1 e instalar fibra a las respectivas Islas Galápagos.

Referencia bibliográfica

- Agrawal, G. (2002). *Fiber-optic communication systems* (3era ed.). New York, NY: Wiley-Interscience. Recuperado a partir de <http://dx.doi.org/10.1002/0471221147>
- Angeles, S., Arredondo, L., & Martiez, N. (2009). *Diseño y optimización del enlace de comunicaciones entre Los Cabos y Puerto Vallarta por medio de fibra óptica submarina* (Thesis). Recuperado a partir de <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/2973>
- Brito, M., & Carlos, J. (2004). *Sistemas de transmisión de cable submarino. Integración de Cuba a la red mundial de cables submarinos* (Thesis). Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas . Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones. Recuperado a partir de <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/xmlui/handle/123456789/7022>
- Burns, B. (2012). Submarine Cable System History. Recuperado 15 de febrero de 2018, a partir de <http://www.submarinecablesystems.com/default.asp?pg=history>
- Capmany, J., Fraile, F., & Martiez, J. (2001). *Fundamentos de comunicaciones ópticas* (2da ed.). Madrid: Síntesis.
- Carter, S. (2012). *Cyrus Field: Man of Two Worlds* (1st ed.). New York: Putman. Recuperado a partir de <https://www.encyclopedia.com/people/social-sciences-and-law/business-leaders/cyrus-west-field>
- Corning. (2018). Vascade® Optical Fibers. Recuperado 02 de febrero de 2018, a partir de <https://www.corning.com/california/products/communication-networks/products/fiber/vascade-fibers.html>

Dibner, B. (2012). *The Atlantic Cable* (2nd ed.). New York: punctum Books.
Recuperado a partir de
<http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=16024>

España, M. (2005). *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios* (1era ed.). Madrid: Díaz de Santos.

Guillén, B. (2016). El primer cable submarino de la historia duró solo tres semanas | Tecnología | EL PAÍS. Recuperado a partir de
https://elpais.com/tecnologia/2016/05/27/actualidad/1464352294_380991.html

Huidobro, J. (2001). *Fundamentos de telecomunicaciones*. Madrid, España: Paraninfo : Thomson Learning.

Huidobro, J. (2014). *Telecomunicaciones: tecnologías, redes y servicios* (2DA ed.). Paracuellos de Jarama, Madrid: Ra-Ma.

Leiva, A., Olivares, R., & Tarifeno, M. (2007). Efectos de la dispersión por modo de polarización (PMD) en la propagación de pulsos a través de fibras ópticas. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, ISSN 0718-3291, Vol. 15, N°. 3, 2007, pags. 336-343, 15.
<https://doi.org/10.4067/S0718-33052007000300014>

León, Z., & Hernán, S. (2011). *Operación y mantenimiento de una red de cable submarino*. Recuperado a partir de
<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/123456789/1053>

Mahlke, G., & Gössing, P. (2010). *Conductores de fibras ópticas: conceptos básicos, técnica del cable, planificación de las instalaciones* (2da ed.). Erlangen; [S.l.: Publicis MCD ; Marcombo.

- Martín, J. (2010). *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones* (1ra ed.). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Martínez, J. (2005). *Redes de comunicaciones* (1ra ed.). Valencia: Editorial de la UPV.
- Pazmiño, N., & Santana, E. (2005). *Plataforma Continental del Ecuador* (1era ed., Vol. 5). Guayaquil: Santillana.
- Rubio, B. (2014). *Introducción a la ingeniería de la fibra óptica* (2da ed.). Madrid: RA-MA Ed.
- Safford, E. (2012). *Introducción a la fibra óptica y el laser* (2da ed.). Madrid: Paraninfo.
- Senior, J., & Jamro, M. (2009). *Optical fiber communications: principles and practice* (3. ed). Harlow: Prentice Hall.
- UIT-T. (2007). Recomendaciones UIT-T de la Serie G: Sistemas y medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales, 22.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Bravo Ronquillo, Nelly Azucena** con C.C: # 093046891-3 autor del Trabajo de Titulación **“Diseño de un enlace óptico entre la provincia de Santa Elena y las Islas Galápagos para proveer servicio de internet con tecnología gepon”**, previo a la obtención del título de **INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 5 de marzo de 2018

Nombre: Bravo Ronquillo, Nelly Azucena
C.C: 093046891-3

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño de un enlace óptico entre la provincia de Santa Elena y las Islas Galápagos para proveer servicio de internet con tecnología gepon		
AUTOR(ES)	Bravo Ronquillo, Nelly Azucena		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Edwin F. Palacios Meléndez		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	5 de marzo de 2018	No. DE PÁGINAS:	84
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de fibra óptica, Planta Externa, Sistemas de Transmisión		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	WDM, FIBRA OPTICA, SLTE, BER, FACTOR Q, AMPLIFICADOR		
RESUMEN/ABSTRACT :	<p>El siguiente trabajo de titulación desarrollado señala un modelo óptimo de enlace submarino para conectar Ecuador continental con el Archipiélago de Galápagos a través del medio de transmisión que es la fibra óptica, para proveer servicios de internet con tecnología gepon, garantizar conectividad de sus habitantes y turistas con el resto del mundo mediante un sistema de calidad, a altas velocidad y con gran capacidad de ancho de banda.</p> <p>Los capítulos referidos en este trabajo de titulación, como en el primero, en sus objetivos plantea mejorar la calidad de conexión a internet del Archipiélago de Galápagos, en el capítulo dos se realizó una amplia investigación de todos sus componentes, activos y pasivos, de un sistema submarino, y en el tercer capítulo en base a la información obtenida, se efectuó una simulación bajo ciertos parámetros dando como resultado que elementos serían los idóneos para garantizar la efectividad y viabilidad del enlace.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593991095582	E-mail: nelly_20_b@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: +593-9-68366762		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			