



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**APLICACIONES PRÁCTICAS EN EL OTDR EMULADOR PARA SISTEMAS
DE COMUNICACIONES ÓPTICAS**

Previa la obtención del Título

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

ELABORADO POR:

Rafael David Tómalá Acosta

Guayaquil, 20 de Febrero del 2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Rafael David Tómalá Acosta como requerimiento parcial para la obtención del
título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES.

Guayaquil, 20 de Febrero del 2014

DIRECTOR

MsC. Néstor Zamora Cedeño

REVISADO POR

Ing. Marcos Montenegro Tamayo.
Revisor Metodológico

MsC. Luis Pinzon Barriga.
Revisor de Contenido



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

RAFAEL DAVID TÓMALA ACOSTA

DECLARÓ QUE:

El proyecto de tesis denominado “Aplicaciones prácticas en el OTDR Emulador para Sistemas de Comunicaciones Ópticas” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Guayaquil, 20 de Febrero del 2014



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, RAFAEL DAVID TÓMALA ACOSTA

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del proyecto titulado: “Aplicaciones prácticas en el OTDR Emulador para Sistemas de Comunicaciones Ópticas”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, 20 de Febrero del 2014

DEDICATORIA

Cuando caemos al suelo nos duele, pero también necesitamos confiar en el suelo para levantarnos. Dedico este trabajo a todas aquellas personas que me han brindado todo su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado.

Índice General

Índice de Figuras.....	9
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN..	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Antecedentes.....	13
1.3. Justificación del Problema.....	14
1.4. Definición del Problema.....	14
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	14
1.5.1. Objetivo General.....	14
1.5.2. Objetivos Específicos.....	15
1.6. Idea a Defender.....	15
1.7. Metodología de Investigación.....	15
CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica de las Comunicaciones Ópticas.....	16
2.1. Necesidad de Comunicaciones Ópticas.....	16
2.2. Evolución de las Comunicaciones Ópticas.....	20
2.3. Sistemas de Comunicaciones Ópticas.....	27
2.4. Elementos de un Sistema de Comunicaciones Ópticas.....	29
2.4.1. La Fibra Óptica como medio de comunicación.....	30
2.4.2. Transmisores Ópticos.....	32
2.4.3. Receptores Ópticos.....	36
2.5. Las Fibras Ópticas.....	37
2.5.1. Fibra Óptica Multimodo de Índice escalonado.....	38
2.5.2. Fibra Óptica Multimodo de Índice Gradual.....	38
2.5.3. Fibra Óptica Monomodo (SM).....	39
CAPÍTULO 3: REFLECTÓMETROS ÓPTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.	41

3.1.	Introducción al uso de OTDR.....	41
3.2.	Adquisición de Datos del OTDR.	42
3.2.1.	Nivel de inyección.	43
3.2.2.	Longitud de Onda.....	44
3.2.3.	Ancho de Pulso.	46
3.2.4.	Alcance.	47
3.2.5.	Promediando.....	47
3.3.	Mediciones del OTDR.....	48
3.3.1.	Interpretación de eventos.....	48
3.3.2.	Mediciones en el OTDR.	51
3.3.3.	Métodos de medición	51
	CAPÍTULO 4: APLICACIONES PRÁCTICAS DEL OTDR EMULATOR.....	53
4.1.	Práctica #1: Introducción a la Operación del OTDR Emulador.	53
4.2.	Práctica #2: Anchura de pulso del OTDR Emulador.....	56
	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
5.1.	Conclusiones.	¡Error! Marcador no definido.
5.2.	Recomendaciones.	¡Error! Marcador no definido.
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Gráfica del incremento del ancho de banda óptico durante siglo y medio (1850-2000).....	18
Figura 2. 2: Gráfica del incremento de la capacidad de transmisión.	19
Figura 2. 3: Gráfica del incremento del ancho de banda óptico agrupadas en generaciones.....	21
Figura 2. 4: Redes Internacionales de Fibra Óptica.	25
Figura 2. 5: Diagrama de bloques de un Sistema de Comunicación Óptico. ...	28
Figura 2. 6: Diagrama de bloque de elementos de Sistemas de Comunicación Óptica.....	30
Figura 2. 7: Estructura de una fibra óptica.	31
Figura 2. 8: Fibra Óptica Multimodal (MM).	31
Figura 2. 9: Fibra Óptica Monomodo (SM).	32
Figura 2. 10: Diagrama de Bloque de un Transmisor Óptico	32
Figura 2. 11: Diagrama de un transmisor óptico de modulación interna.	33
Figura 2. 12: Diagrama de un transmisor óptico de modulación externa.	33
Figura 2. 13: Diodo de emisor de luz de tipo lateral.	34
Figura 2. 14: Diodo laser.	34
Figura 2. 15: Diagrama esquemático del láser FP.	35
Figura 2. 16: Diagrama esquemático del láser DBF.....	35
Figura 2. 17: Diagrama esquemático del láser FP.	36
Figura 2. 18: Clasificación de la Fibra Óptica.....	37
Figura 2. 19: Fibra óptica multimodo de índice escalonado.	38
Figura 2. 20: Fibra óptica multimodo de índice gradual.....	39
Figura 2. 21: Fibra óptica monomodo.....	40

Capítulo 3

Figura 3. 1: Modelo de OTDR de la familia JDSU T-BERD/MTS.	41
Figura 3. 2: Efectos de la macro flexión sobre una fibra.	45

Figura 3. 3: Efectos de la dispersión desplazada.....	45
Figura 3. 4: Medición de la fibra utilizando diferentes anchos de pulso.	46
Figura 3. 5: Evento reflectante debido a un cruce del conector.	49
Figura 3. 6: Evento de reflexión en dos uniones de conectores muy cercanos.49	
Figura 3. 7: Evento de reflexión en un extremo de la fibra.	50
Figura 3. 8: Evento de no reflexión.....	50

Capítulo 4

Figura 4. 1: Ventana de inicio de OTDR Emulador.	53
Figura 4. 2: Funcionamiento del OTDR Emulador en tiempo real.....	54
Figura 4. 3: Selección de la fibra desde <i>Virtual Fibers</i>	54
Figura 4. 4: Selección de <i>Auto Set Trace Parameters</i>	55
Figura 4. 5: Código para los estados <i>mode</i> y <i>parameter</i>	55
Figura 4. 6: Pulso corto de luz del láser en la fibra.....	56
Figura 4. 7: Pulso corto de luz del láser en la fibra.....	57

Resumen

El trabajo de titulación denominado “Aplicaciones prácticas en el OTDR Emulador para Sistemas de Comunicaciones Ópticas” se describió el estado del arte o los fundamentos teóricos de las comunicaciones ópticas incluyendo el tipo de fibra ópticas utilizada en infraestructuras de telecomunicaciones. Después se estudió al reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), lo que permitió entender su funcionamiento antes de emplear la plataforma de simulación OTDR Emulador. La herramienta OTDR Emulador es un software cuyas características son similares a los OTDRs reales, se presentan cada una de las simulaciones en tiempo real.

Con esta plataforma no se requiere de mucha inversión como es la compra de un OTDR que oscila entre diez y treinta mil dólares, el OTDR Emulador tiene un costo de doscientos dólares la licencia profesional para cada computador. Lo que sería una excelente inversión adquirir esta herramienta robusta para la enseñanza de la asignatura de Sistemas de Fibra Óptica

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

1.1. Introducción.

Las comunicaciones a través de la fibra óptica se han empleado desde tiempos muy remotos. Una manera primitiva en espacios abiertos fue el uso de señales de fuego, una forma digital de comunicación muy temprana para ser funcional. A través de los años, el estudio de la naturaleza de la luz iniciada por Sir Isaac Newton en el siglo XVII. Posteriormente, han existido científicos de relevada importancia que han perfeccionado y creados teorías dentro del campo de las telecomunicaciones.

Hasta hace poco, casi todos los sistemas de comunicación se han basado en la transmisión de información a través de cables eléctricos o han hecho uso de radiofrecuencias y microondas electromagnética que se propaga la radiación en el espacio libre. Al parecer, el uso de la luz habría sido una opción más natural para las comunicaciones, ya que, a diferencia de la electricidad y las ondas de radio, que no tenía que ser descubierto.

Las razones de la demora en el desarrollo de esta tecnología son dos: la dificultad de producir una fuente luminosa que pudiera ser conmutada aparecen y desaparecen rápidamente y por lo tanto podría codificar información a una velocidad alta, y el hecho de que la luz es fácilmente obstruido por objetos opacos como las nubes, la niebla, el humo y la neblina. A diferencia de la radiofrecuencia y la radiación de microondas, la luz es raramente conveniente para la comunicación en el espacio libre.

Las comunicaciones Lightwave (por onda de luz) han entrado recientemente en cuenta, sin embargo, y de hecho lo que hoy es la tecnología preferida en muchas aplicaciones. Se utiliza para la transmisión de voz, datos, telemetría y vídeo en larga distancia y redes de área local, y es adecuado para una gran diversidad de otras aplicaciones (por ejemplo, la televisión por cable).

La tecnología Lightwave ofrece la enorme capacidad del usuario de transmisión, distancias lejanas de repetidores, la inmunidad de la interferencia electromagnética, y la relativa facilidad de la instalación.

Los Sistemas de Comunicación de Fibra Óptica son los sistemas de ondas de luz que emplean fibras ópticas para la transmisión de información. Estos sistemas se han desplegado en todo el mundo desde 1980 y, de hecho, han revolucionado la tecnología detrás de las telecomunicaciones. De hecho, la tecnología de ondas de luz, junto con la microelectrónica, se cree que es un factor importante en el advenimiento de la "era de la información."

En otras palabras, todos los sistemas de comunicaciones transmiten datos A/D y D/A o información de un punto a otro, independientemente de la separación entre los dos puntos, ya sean por distancias cortas en kilómetros o transoceánicas. La información se realiza a menudo por una onda portadora electromagnética cuya frecuencia puede variar de unos pocos megahercios a varios cientos de terahercios.

1.2. Antecedentes.

Para el presente trabajo de titulación, se realiza una revisión de trabajos académicos como temas de tesis desarrollados, artículos de investigación, etc., que tengan relación con Sistemas de Comunicaciones Ópticas y de la detección de fallos en enlaces mediante Fibra Óptica.

Un trabajo de graduación muy interesante en la que evalúa un tipo de modulación a través de simulación en MatLab, la cual se denomina "SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA DPSK UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA" realizada por Johnny Velasco Delgado graduado en la ESPOL.

Otro trabajo encontrado y que se considera importante fue elaborado en la Universidad Carlos III de Madrid, España por Miguel Ángel Ruiz Calvo, el

cual se denomina “DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE ESPECTROS ÓPTICOS BASADO EN UN FILTRO SINTONIZABLE FABRY-PEROT”

1.3. Justificación del Problema.

A través del Software “OTDR Emulator” se podrá detectar los posibles fallos en fibras ópticas, aunque no dispongamos del OTDR (Hardware) físicamente por su alto costo, esta plataforma permite proporcionar una experiencia real de funcionamiento de un OTDR.

OTDR Emulator, se basa en técnicas de modelización matemática avanzada y de una pantalla gráfica real, la ventaja de este programa es que puede trabajar en línea (online) y en un laboratorio de cómputo. Se puede trabajar con la versión de prueba, con ciertas limitantes pero que no afectan el desarrollo del presente trabajo de titulación, al final se presentará el costo real del software.

1.4. Definición del Problema.

Necesidad de realizar aplicaciones prácticas para detección de fallos en enlaces de fibra óptica a través del OTDR Emulator, ya que hasta la actualidad en la asignatura de Sistemas de Fibra Óptica no se cuenta con el instrumento de medición (hardware) ni de simulación real de un OTDR.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

Una vez definido el problema de investigación se procederá a describir el Objetivo General y los Objetivos Específicos.

1.5.1. Objetivo General.

Desarrollar aplicaciones prácticas en el OTDR Emulator para Sistemas de Comunicaciones Ópticas.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Describir la fundamentación teórica de los Sistemas de Comunicaciones Ópticos.
- Diagnosticar la situación actual de instrumentos de medición para prácticas en la asignatura de Sistemas de Fibra Óptica.
- Elaborar simulaciones a través del OTDR Emulador para detección de posibles fallos en enlaces de fibra óptica.

1.6. Idea a Defender.

A través del desarrollo de aplicaciones prácticas a través del OTDR Emulador permitirá que los estudiantes de Ingeniería en Telecomunicaciones específicamente de la asignatura Sistemas de Fibra Óptica entender el comportamiento real de reflectómetro de dominio de tiempo óptico (OTDR) y al mismo tiempo detectar fallos en los enlaces de fibra óptica.

1.7. Metodología de Investigación.

El trabajo de titulación es de carácter Exploratorio y Explicativo. Se considera exploratorio, porque examinamos el funcionamiento del reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR) en sistemas de comunicaciones ópticas que provocan el fenómeno en cuestión; se considera explicativo, debido a que utilizaremos la plataforma de simulación OTDR Emulador que describirá el por qué ocurre el fenómeno.

CAPÍTULO 2: Fundamentación Teórica de las Comunicaciones Ópticas

2.1. Necesidad de Comunicaciones Ópticas.

Couch, W. L., II (2008) manifiesta que el advenimiento de la telegrafía en 1830 sustituyó a la utilización de la luz por la electricidad y comenzó la era de las comunicaciones eléctricas. La velocidad de bits B podría aumentarse aproximadamente a 10 b/s por el uso de técnicas de codificación nuevas, tales como el código Morse. El uso de repetidoras intermedias permitió la existencia de una comunicación a larga distancia (aproximadamente 1000 km).

De hecho, el primer cable telegráfico transatlántico éxito se puso en funcionamiento en 1866. La Telegrafía utiliza esencialmente un esquema digital a través de dos pulsos eléctricos de diferente duración (puntos y rayas del código Morse).

Roden, M. S. (2006) sostiene que la invención del teléfono en 1876 trajo un cambio importante en la medida en que se transmiten señales eléctricas en forma analógica a través de una corriente eléctrica continuamente variable. Es decir, que las técnicas eléctricas analógicas fueron dominando los sistemas de comunicación para un siglo más o menos.

El desarrollo de las redes telefónicas de todo el mundo durante el siglo XX dio lugar a muchos avances en el diseño de sistemas de comunicación eléctricos. El uso de cables coaxiales en lugar de pares de cables aumentó considerablemente la capacidad del sistema. El primer sistema de cable coaxial, puesta en circulación en 1940, era un sistema de 3 MHz capaz de transmitir 300 canales de voz o un solo canal de televisión.

El ancho de banda de tales sistemas estaba limitado por las pérdidas de cable dependientes de la frecuencia, aumentando rápidamente para frecuencias más allá de 10 MHz.

Esta limitación llevó al desarrollo de sistemas de comunicación de microondas en el que una onda portadora electromagnética con frecuencias en la gama de 1-10 GHz se utiliza para transmitir la señal mediante el uso de técnicas de modulación adecuadas.

En el año 1948 entro a funcionar el primer sistema de microondas, que operaba con una frecuencia portadora igual a los 4 GHz. A partir de ese año, los dos sistemas tanto coaxial como microondas se han ido involucrando de manera considerable y cuya capacidad era de operar a velocidades de bits aproximadamente en 100 Mbps.

Ya para el año 1975 entra a funcionar el sistema coaxial avanzado que para ese entonces operaba a una velocidad de 274 Mbps, pero con una desventaja o inconveniente fue el pequeño espacio que tenían los repetidores aproximadamente 1 Km, para lo cual igual se hizo muy costoso para operar. (Guauxochitl M., A. 2009)

Guauxochitl M, A. (2009) afirma en su trabajo que las comunicaciones por microondas admiten separaciones entre repetidoras a mayores distancias, aunque la limitación es la tasa de bits debido a la frecuencia de portadora. En las comunicaciones ópticas se emplea al producto de $B \cdot L$, donde B se lo conoce como el ancho de banda eléctrico (MHz) o velocidad (tasa) de transmisión (bps) y L como la longitud (km) de la fibra óptica o la distancia del enlace; este producto se denomina ancho de banda óptico (MHz-Km o Mbps-Km).

En la figura 2.1 se observa el crecimiento o evolución del ancho de banda óptico $B_o = B \cdot L$ (Coimbra G., E., 2014) esto ha ocurrido por los avances tecnológicos durante los años 1850 y 2000. Ya para mediados del año 1970 estos sistemas de comunicaciones disponían de anchos de bandas ópticos aproximadamente igual a 100 Mbps-Km, aunque para la actualidad esos

valores fueron muy limitados, debido a que en ese entonces existieron limitaciones tecnológicas y económicas.

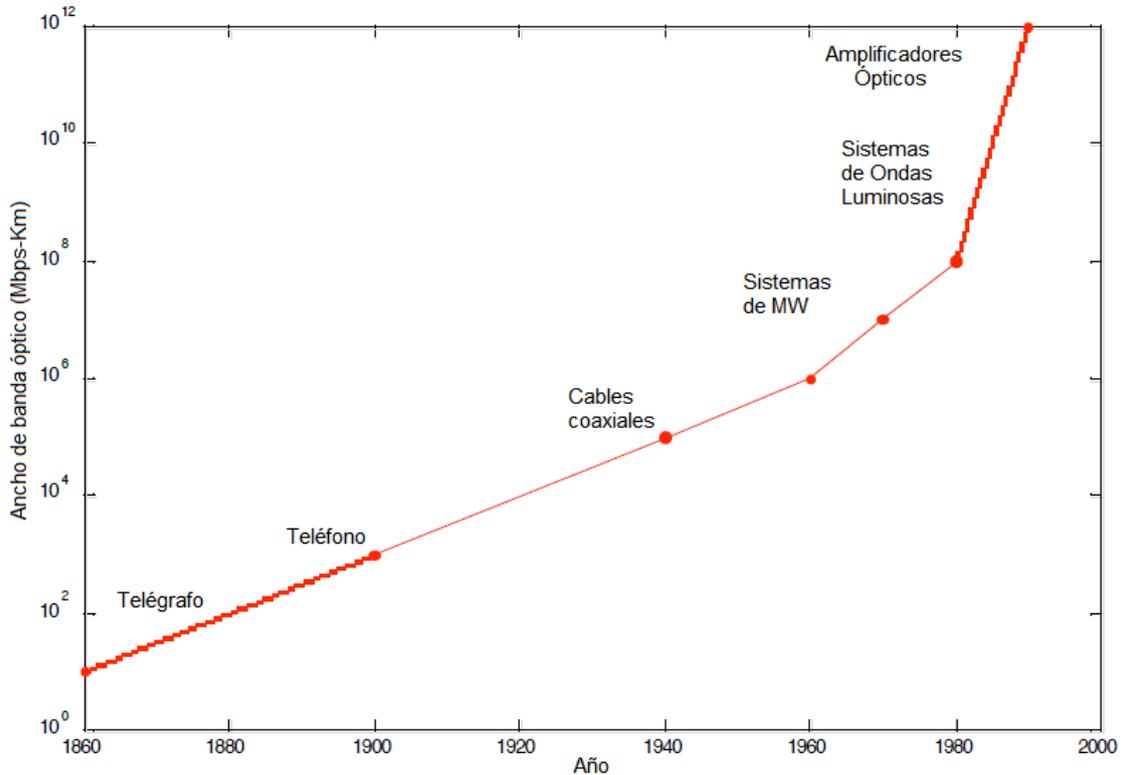


Figura 2. 1: Gráfica del incremento del ancho de banda óptico durante siglo y medio (1850-2000).

Fuente: Guauxochitl M, A. (2009)

En la década del año 1950 no existía disponibilidad de fuentes ópticas coherentes y tampoco la fibra como medio de transmisión adecuado. Chitode, J. S., (2009) manifiesta que tras el invento del láser y su despliegue durante el año 1960, se pudo solucionar el problema que se mencionó. Entonces la atención se centró en la búsqueda de formas para el uso de luz láser para las comunicaciones ópticas.

Muchas ideas se adelantaron durante la década de 1960 (Sklar, B., 2009), siendo la más notable la idea de confinamiento de luz usando una secuencia de lentes de gas.

Basch, E. E., & Brown, T. G. (1985) indicaban que para el año 1966 se recomendaba o sugería a las fibras ópticas como la mejor opción para transmitir información, ya que eran aptos para guiar la señal de luz, de forma casi idéntica a la guía de los electrones en los alambres de cobre. El problema principal fueron las elevadas pérdidas (1000 dB/km) de fibras ópticas disponibles durante la década de 1960.

Grandes avances surgieron para el año 1970, con lo que se logró disminuir notablemente las pérdidas en las fibras, reduciéndose por debajo de los 20 dB/km en la región de longitud de onda cercana 1 μ m. A partir de esa época se contaba ya con fuentes ópticas robustas y fibras ópticas de baja pérdida, permitiendo así el inicio de los sistemas de comunicaciones ópticas a nivel mundial hasta la actualidad.

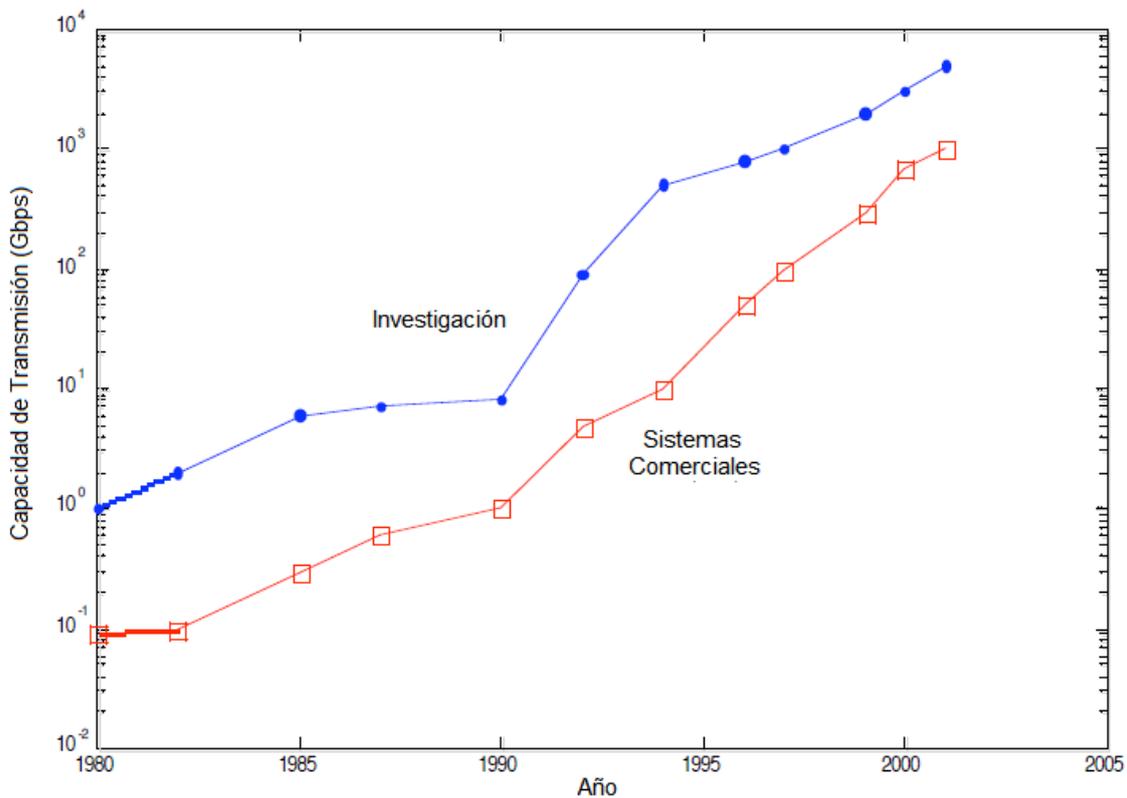


Figura 2. 2: Gráfica del incremento de la capacidad de transmisión.
Fuente: Guauxochitl M, A. (2009)

En la figura 2.2 se muestra el incremento en la capacidad de los sistemas de comunicaciones ópticas desde el año 1980 a través de varias generaciones de desarrollo. Desde ese entonces, se ha desplegado comercialmente los sistemas de comunicaciones ópticas, a través de la investigación y desarrollo (I+D).

Los acelerados avances tecnológicos en el campo de las comunicaciones ópticas, han permitido aumentar la tasa de transmisión en un factor de 100.000 durante un período de menos de 25 años. También en ese período, se incrementaron notablemente las distancias de transmisión hasta los 10000 Km (antes 10 Km).

Finalmente, los sistemas de comunicaciones ópticos modernos han excedido por un factor de 10^7 en relación a la primera generación del sistema en mención.

2.2. Evolución de las Comunicaciones Ópticas.

Para esta sección describiremos la evolución de los sistemas de comunicaciones ópticos en relación a la sección 2.1., Hong C., P. (2006) en su tesis de maestría, indica que para el año 1975 se iniciaron las fases investigativas de comunicaciones ópticas, y que durante 25 años ha progresado en varias generaciones distintas.

En la figura 2.3 se muestra el crecimiento del ancho de banda óptico ($B_o = B \cdot L$) durante el período de 25 años (desde el año 1975 hasta el año 2000) ha sido cuantificada mediante pruebas en laboratorios experimentales. La pendiente positiva indica el crecimiento, es decir, que cada año se duplica el ancho de banda óptico (B_o), la misma origina las cuatro generaciones indicadas en la figura 2.3, aunque también está presente la saturación en relación al crecimiento del ancho de banda óptico.

Cada nueva generación trae un cambio fundamental que contribuye al mejoramiento del rendimiento del sistema.

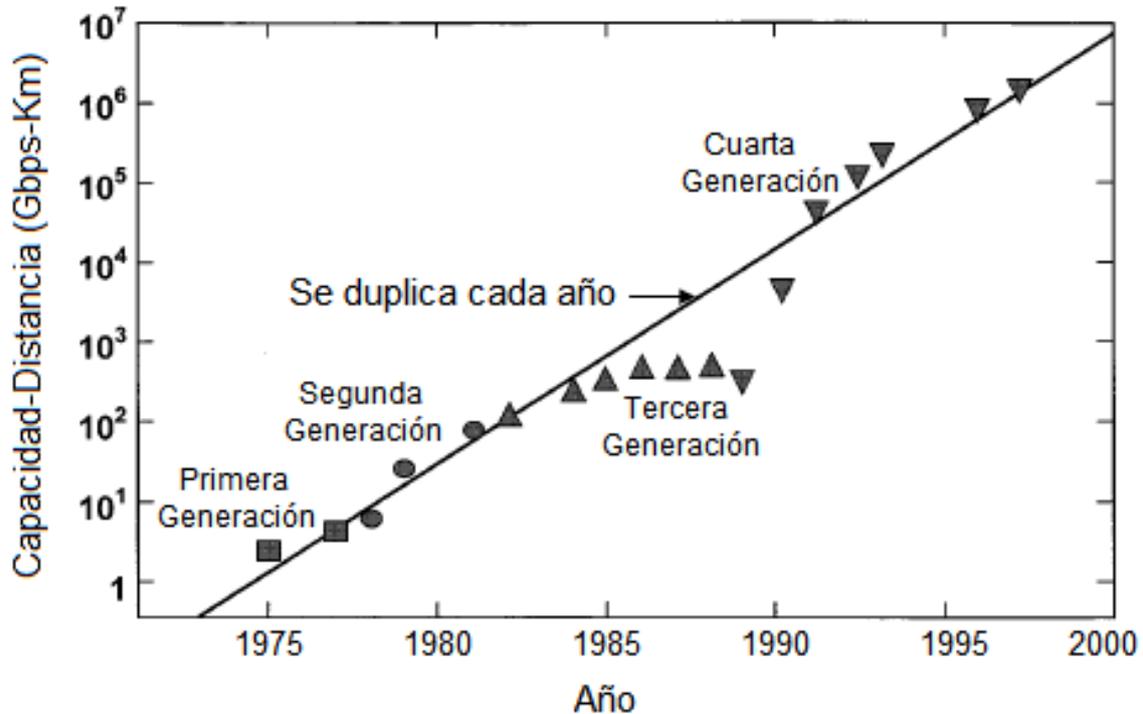


Figura 2. 3: Gráfica del incremento del ancho de banda óptico agrupadas en generaciones.

Fuente: Guauxochitl M, A. (2009)

De la figura 2.3, se describirá cada una de las generaciones.

- ✓ La primera generación, operaba a una longitud de onda $\lambda = 0.8 \mu m$ y se empleaba láseres de GaAs (conocido como semiconductores). Einarrson, G., (2000) manifiesta que después de varios ensayos de campo durante el período de 1977-1979, se convirtieron en tales sistemas disponibles comercialmente en 1980. Ellos funcionan a una velocidad de 45 Mbps, y se permiten separaciones de repetidoras de hasta 10 km.

La distancia entre las repetidoras ópticas son superiores (mayores) a los sistemas coaxiales (1 Km), siendo esto un factor importante para los científicos que desarrollaron estos sistemas, porque disminuían los costos en instalaciones y mantenimiento de cada repetidora.

Estaba claro que durante la década de 1970 la separación entre repetidoras podría aumentarse considerablemente debido a la operación del sistema óptico en la región de la longitud de onda cercana a $1.3 \mu m$, donde la pérdida de la fibra era inferior a 1 dB/km. Adicionalmente, se presentaba valores mínimos de dispersión en la fibra óptica en la región de longitud de onda mencionada en el párrafo anterior. Esta realización llevó a un esfuerzo mundial para el desarrollo de los láseres y detectores que operan cerca de $1.3 \mu m$.

- ✓ Para Roden, M. S. (2006), la segunda generación estaba disponible desde principios de 1980, aunque la tasa de bits de los primeros sistemas se limitaba a menos de 100 Mbps, debido a la dispersión de las fibras multimodo (MM). Esta limitación fue superada por el uso de fibras de modo único (SM). Para el año 1981 se realizaron pruebas experimentales que demostraban transmisiones de 2 Gbps con fibras monomodo con longitud de 44 Km. La inserción de estos nuevos equipos o sistemas desarrollados para su comercialización fue poco después.

Grosz, D. F., (2004) sostiene que en el año 1987, los sistemas de segunda generación, operaban a velocidades de hasta 1.7 Gbps con una separación entre repetidoras de 50 km, para ese entonces ya estaban disponibles comercialmente. Mientras que Álvarez G., E., Hernández A., C. G., & Quiroz U., G. A. (2007) indicaban en su trabajo de tesis de ingeniero, que las distancias entre repetidoras en los sistemas de segunda generación fue limitado su operatividad por las pérdidas en la fibra cuya longitud de onda era $1.3 \mu m$ (típicamente 0,5 dB/km).

Las pérdidas en las fibras SiO_2 fueron mínimas, aproximadamente a $1.55 \mu m$. Para el año 1979 dentro de la región espectral se obtenían pérdidas de hasta 0.2 dB/km.

- ✓ Para Roden, M. S. (2006), la tercera generación funcionaban a 2.5 Gbps cuya disponibilidad comercial llegó en el año 1900. Estos sistemas fueron capaces de operar a velocidades muy altas de hasta 10 Gbps. También fue mejorado el rendimiento a través de fibras de dispersión y láseres de oscilación en un único modo longitudinal.

Mientras Álvarez G., E., et al (2007) indicaba que otro inconveniente fue la regeneración periódica de la señal a través de repetidoras electrónicas cuyas distancias eran entre 60 y 70 km. También se podían aumentar las distancias entre repetidoras a través de un sistema de detección heterodino/homodino, y a la vez mejoraba la sensibilidad del receptor. También se conocía como Sistemas Coherentes, que se desarrollaron en la década de los años 80, aunque entraron al mercado en 1989.

- ✓ Álvarez G., E., et al (2007) sostiene que la cuarta generación utilizaban amplificadores ópticos que ampliaron las distancias entre repetidoras y también se utilizaba la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para incrementar la tasa de bits. Como fue evidente a partir de diferentes pistas (véase la figura 2.2) antes y después de 1992, la aparición de la técnica WDM revolucionaba y que daba a lugar la duplicación de la capacidad del sistema cada 6 meses más o menos, ya para el año 2001 los sistemas ópticos funcionaban a velocidades de 10 Tbps.

En el proyecto de fin de carrera de Ocón G., J. (2012) indica que en la mayoría de los sistemas WDM las pérdidas de la fibra se compensaban periódicamente mediante amplificadores de fibra dopada con erbio para distancias entre 60 km y 80 km. Los amplificadores en mención, se desarrollaron a partir del año 1985 y disponible comercialmente en 1990.

Para Alfonso J., C. (2002) pruebas de laboratorio realizadas en 1991 demostraron la posibilidad de transmisión de datos a velocidades de 2.5 Gbps y 5 Gbps para distancias de 21000 km y 14300 km respectivamente, cuya configuración era la recirculación de bucle. Mientras Montero H., D. A. (2004) indica que con las pruebas realizadas en 1991 fue posible la creación y despliegue de los sistemas de transmisión submarinas completamente óptico y a través de amplificación se realizó las comunicaciones intercontinentales.

Para 1996, se había demostrado que transmitía a velocidades de 5 Gbps y distancias de 11300 km mediante el uso de cables submarinos reales, lo que llegaron a estar disponible para su comercialización para comunicaciones transatlántica y transpacífica.

A partir de 1996 numerosos sistemas de comunicaciones ópticas submarinos se han desplegado en todo el mundo. En la figura 2.4 se ilustra la red internacional submarina de fibra óptica en el 2000. El enlace de fibra óptica de 27000 km alrededor del mundo (conocido como FLAG) entró en funcionamiento en 1998, uniendo muchos países de Asia y Europa. (Celis B., I., & Rosas M., H. E., 2008)

Para el año 2000 empezó a operar un nuevo sistema de comunicaciones óptica denominado África One; el mismo rodeaba el continente africano y cubría una distancia de transmisión total de 35000 km. Varios sistemas WDM se desplegaron a través de los océanos Atlántico y Pacífico durante 1998-2001 en respuesta al aumento inducido por Internet en el tráfico de datos; que han aumentado la capacidad total en varios órdenes de magnitud. Una verdadera red global que abarca 250000 km con una capacidad de 2.56 Tbps (64 canales WDM a 10 Gbps sobre 4 pares de fibra) que empezó a funcionar en el 2002.

Después de un año, la capacidad del sistema aumento a 11 Tbps (273 canales, cada uno operaba a 40 Gbps), aunque la distancia de transmisión se limitó en 117 km. En otras pruebas experimentales, lograron transmitir 300 canales cada uno operando a 11.6 Gbps, a una distancia de 7380 km, resultando un ancho de banda óptico de 25000 Tbps-km.

- ✓ Gutiérrez L., V. et al. (2013) manifiesta que la quinta generación se refiere a la ampliación de la gama de longitud de onda sobre la cual un sistema WDM operaría de forma simultánea. La ventana de longitud de onda convencional (banda C) cubría el intervalo de 1.53 a 1.57 μ m. Se extendió tanto en el largo y corto de longitud de onda, funcionando en las bandas L y S, respectivamente.

Por otra parte, se desarrolló en ese entonces una nueva fibra denominada fibra seca con pérdidas pequeñas en el rango de longitud de onda de 1.30 a 1.65 μ m. A partir de la disponibilidad de esta fibra óptica y con nuevos amplificadores se lograron sistemas WDM con miles de canales.

Los sistemas de quinta generación también aumentaron las velocidades de cada canal dentro de la señal WDM. A partir del 2000, muchos canales utilizados operaban a 40 Gbps; la migración hacia 160 Gbps también es posible en el futuro. Tales sistemas requieren un manejo extremadamente cuidadoso de dispersión de la fibra.

Muy a pesar de que la tecnología de comunicaciones ópticas es de apenas 35 años, su progreso tecnológico acelerado ha alcanzado un cierto grado de madurez. Esto también es evidente a partir de la publicación de un gran número de libros sobre comunicaciones ópticas y redes WDM desde 1995.

2.3. Sistemas de Comunicaciones Ópticas.

Como se mencionó anteriormente, los sistemas de comunicación óptica difieren en principio de los sistemas de microondas sólo en la gama de frecuencia de portadora utilizada para transportar la información. Las frecuencias de portadora en sistemas ópticos son de 200 THz, que difieren mucho de las frecuencias de portadora de sistemas de microondas de 1 GHz.

Guauchochitl M, A. (2009) sostiene en su trabajo de grado, que se esperaba un aumento de hasta 10000 veces de la capacidad de información en sistemas de comunicación óptica debido a las altas frecuencias de portadoras utilizadas en los sistemas ópticos. Este aumento puede ser entendido por señalar que el ancho de banda de la portadora modulada puede ser de hasta un pequeño porcentaje de la frecuencia portadora.

Tomando, por ejemplo, el 1% como el valor límite, sistemas de comunicaciones ópticas tienen el potencial de llevar la información a velocidades de 1 Tbps. Este es el ancho de banda de enorme potencial de los sistemas de comunicación óptica que es la fuerza motriz detrás del desarrollo de todo el mundo y el despliegue de sistemas de ondas de luz. Los sistemas actuales operan a velocidades de 10 Gbps, lo que indica que hay un amplio margen para seguir realizando mejoras.

En la figura 2.5 se ilustra el diagrama de bloques genérico de un sistema de comunicación óptica, que dispone de un transmisor (óptico), un canal de comunicación (fibra óptica), y un receptor (óptico), los tres elementos son comunes a todos los sistemas de comunicaciones. Las comunicaciones por fibra óptica se clasifican en guiadas y no guiadas. Celis B., I., et al (2008) sostiene que los sistemas ópticos guiados, emiten un haz óptico (Tx) que es confinada mediante el uso de fibras ópticas, por este motivo se denomina Sistema de Comunicación por Fibra Óptica.

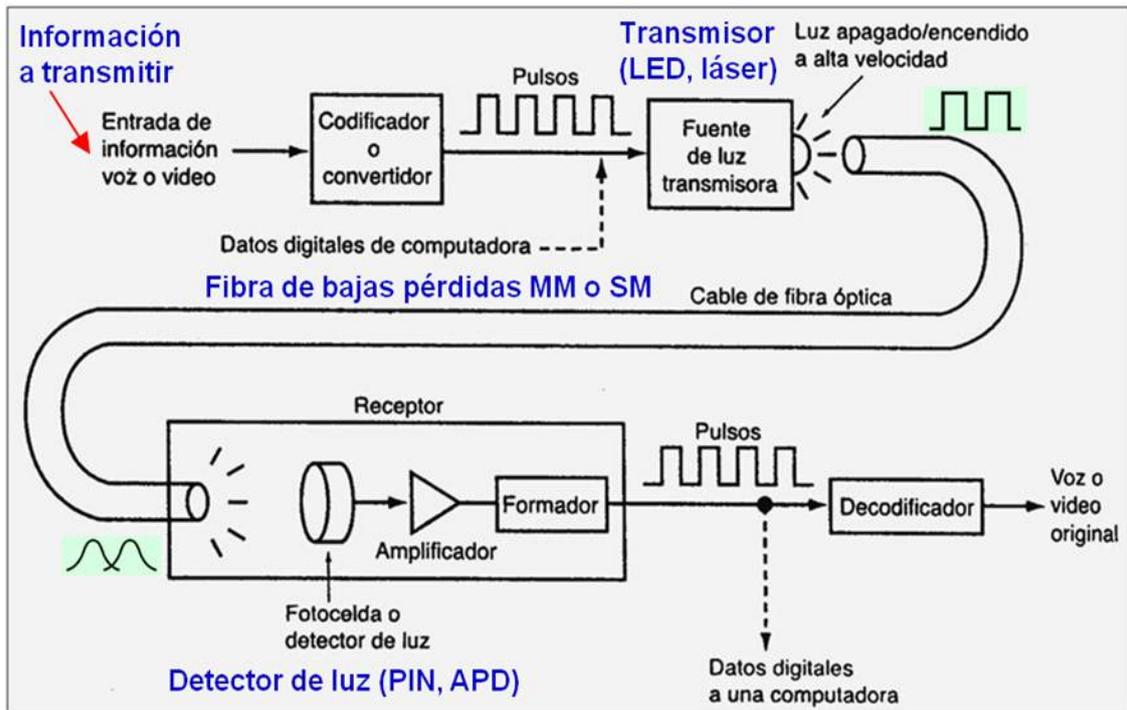


Figura 2. 5: Diagrama de bloques de un Sistema de Comunicación Óptica.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Mientras que los sistemas de comunicación óptica no guiados, los haces óptico emitidos por el transmisor son propagados de forma similar a las microondas. Estos son los menos apropiados para aplicaciones de radiodifusión que los sistemas de microondas, debido a que los haces ópticos se extienden principalmente en la dirección hacia delante (como resultado de su longitud de onda corta).

En el caso de la propagación terrestre, la señal en sistemas no guiados puede deteriorarse considerablemente por la dispersión dentro de la atmósfera. Este problema, por supuesto, desaparece en las comunicaciones en el espacio libre por encima de la atmósfera de la tierra (por ejemplo, las comunicaciones entre satélites). Aunque se necesitan los sistemas de comunicación óptica de espacio libre para ciertas aplicaciones que han sido ampliamente estudiados, y la mayoría de las aplicaciones terrestres hacen uso de sistemas de comunicación de fibra óptica.

La aplicación de comunicaciones de fibra óptica es en general posible en cualquier área que requiera la transferencia de información de un lugar a otro. Es decir, los sistemas de comunicación de fibra óptica se han desarrollado principalmente para aplicaciones de telecomunicaciones. Esto es comprensible a la vista de las redes telefónicas existentes en todo el mundo que se utilizan para transmitir señales de voz no sólo, sino también datos de la computadora y los mensajes de fax.

Las aplicaciones de telecomunicaciones se pueden clasificar ampliamente en dos categorías, a largo y corto recorrido, que estarán siempre en función de las señales ópticas a transmitirse para distancias pequeñas o grandes, comparación con las interurbanas que son de 100 km. Los sistemas de telecomunicaciones utilizados para distancias extensas, necesitan de líneas troncalizadas de alta capacidad. De hecho, la tecnología detrás de comunicación de fibra óptica es a menudo impulsada por las aplicaciones de larga distancia.

Cada generación sucesiva de los sistemas de comunicaciones ópticos fue capaz de funcionar a velocidades más altas y en distancias más largas. La regeneración periódica de las señales ópticas mediante el uso de repetidores todavía es solicitada en la mayoría de los sistemas de larga distancia. Finalmente, las distancias de separación para realizar transmisiones fueron de miles de kilómetros mediante el uso de amplificadores ópticos.

2.4. Elementos de un Sistema de Comunicaciones Ópticas.

Los elementos que conforman los sistemas de comunicaciones ópticas se muestran en el diagrama de bloques de la figura 2.6 en la cual el medio de transmisión son los cables de fibra óptica. Mientras que los otros componentes, es decir, el transmisor óptico, fuente óptica, detector óptico y receptor óptico, son diseñados para satisfacer las necesidades específicas de un canal de comunicación.

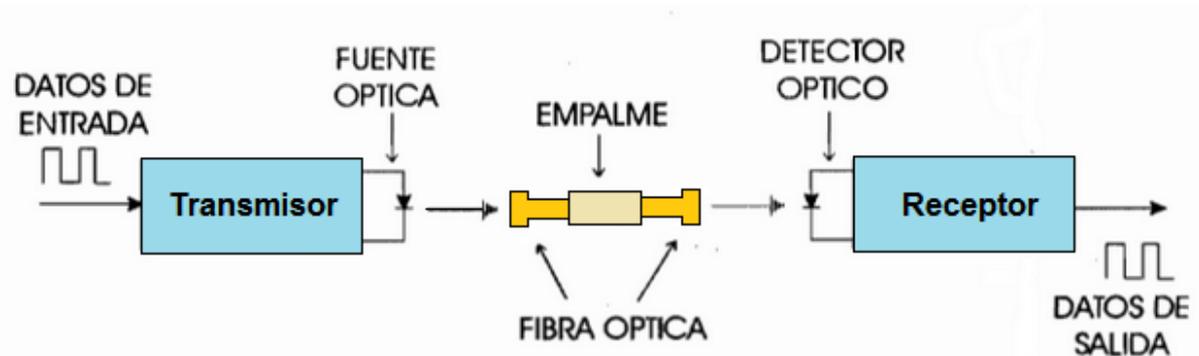


Figura 2. 6: Diagrama de bloque de elementos de Sistemas de Comunicación Óptica.
Fuente: Infante R., A. (2009)

En esta sección se describe brevemente a la fibra óptica (la siguiente sección 2.5 se explicará en detalle todo lo relacionado a la Fibra Óptica). Es decir, que esta sección discute las cuestiones generales relacionadas con el papel de la fibra óptica como medio de comunicación. El propósito de esta sección fue la de proporcionar una visión general e introductoria de los cinco elementos, en las siguientes secciones entrarán en detalle.

2.4.1. La Fibra Óptica como medio de comunicación.

El papel del medio de comunicación es transportar la señal óptica del transmisor al receptor sin distorsionarla. La mayoría de los sistemas ópticos emplean a la fibra óptica (véase la figura 2.7) como medio de comunicación, debido a que la fibra de silicio emite haces de luz con bajas pérdidas $\leq 0.2 \text{ dB/km}$. Con este tipo de fibra, también se redujo la potencia óptica en 1% después de 100 km.

Por eso, las pérdidas en las fibras ópticas todavía son un problema a la hora de diseñar un sistema óptico de larga distancia, así como también el escoger correctamente las repetidoras o amplificadores. Otro problema que se presenta en el diseño es la dispersión de la fibra, lo que conduce a la ampliación de los impulsos ópticos individuales con propagación.

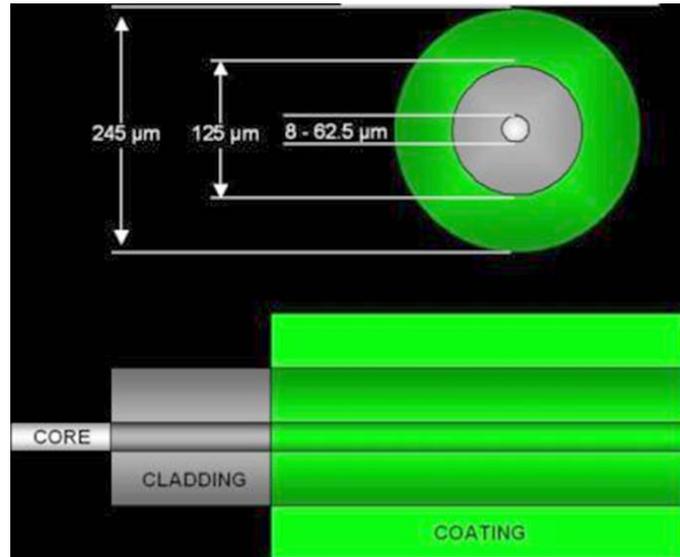


Figura 2. 7: Estructura de una fibra óptica.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Celis B., I., et al (2008) sostiene que los pulsos ópticos eran propagados fuera de la ranura de bit que le asignaban, es por esto que la señal transmitida se degradará severamente. Finalmente, se hacía imposible recuperar la señal original con una alta precisión.

Este inconveniente resulta ser más grave en las fibras multimodo (MM), debido a que los impulsos se propagan rápidamente (típicamente a una velocidad de 10 ns/km) a diferentes velocidades asociadas con diferentes modos de fibra, tal como se ilustra en la figura 2.8.



Figura 2. 8: Fibra Óptica Multimodal (MM).
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Es por este motivo que la mayoría de sistemas ópticos emplean las fibras monomodo (SM) para transmisiones a largas distancias debido a que se propaga en una sola dirección (véase la figura 2.9), sin descartar la dispersión que conduce a la ampliación de pulso (típicamente $<0,1$ ns/km), pero es muy pequeño como para ser aceptable y se reducen aún más a través del control de la anchura espectral de la fuente óptica.



Figura 2. 9: Fibra Óptica Monomodo (SM).
 Fuente: Coimbra G., E., (2014)

2.4.2. Transmisores Ópticos.

El papel de un transmisor óptico es la de convertir la señal eléctrica en forma óptica y para lanzar la señal óptica resultante en la fibra óptica. La figura 2.10 se muestra el diagrama de bloques de un transmisor óptico, el cual se compone de una fuente óptica, un modulador, y un acoplador de canal.

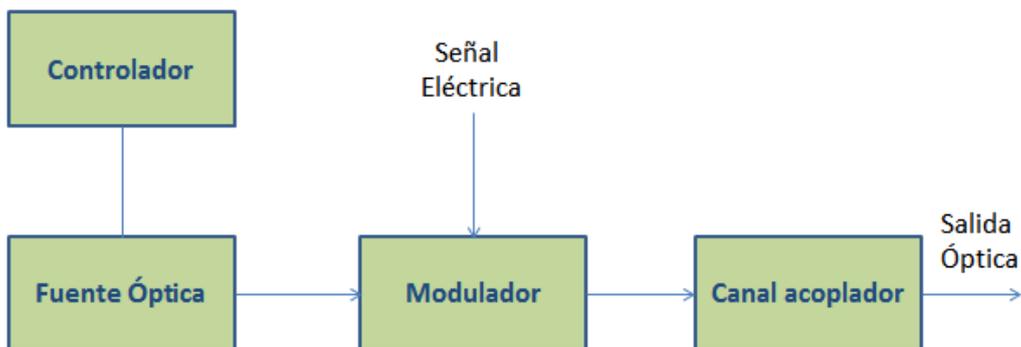


Figura 2. 10: Diagrama de Bloque de un Transmisor Óptico
 Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Mientras que en las figuras 2.11 y 2.12 se muestran diagramas de bloques como ejemplos de transmisores ópticos con modulación interna y externa respectivamente.

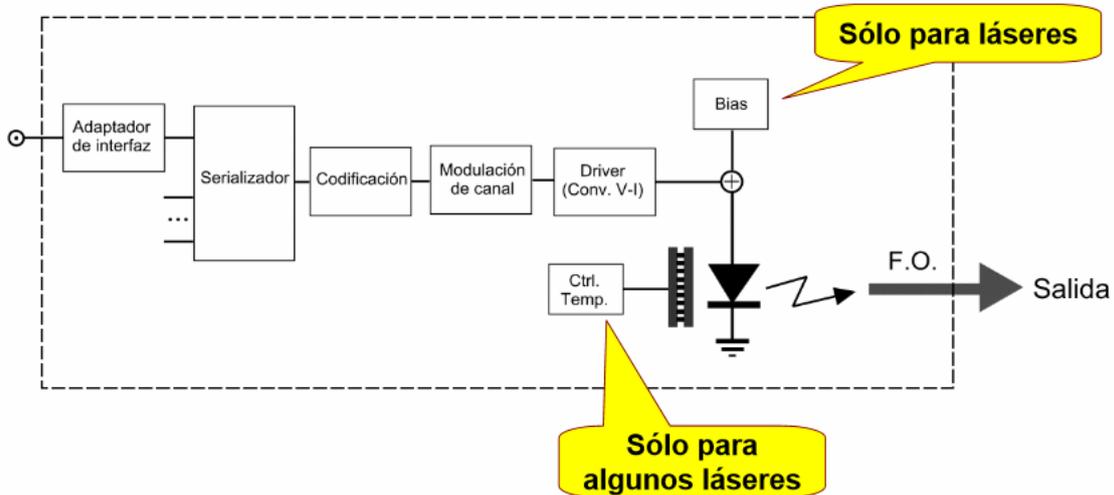


Figura 2. 11: Diagrama de un transmisor óptico de modulación interna.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

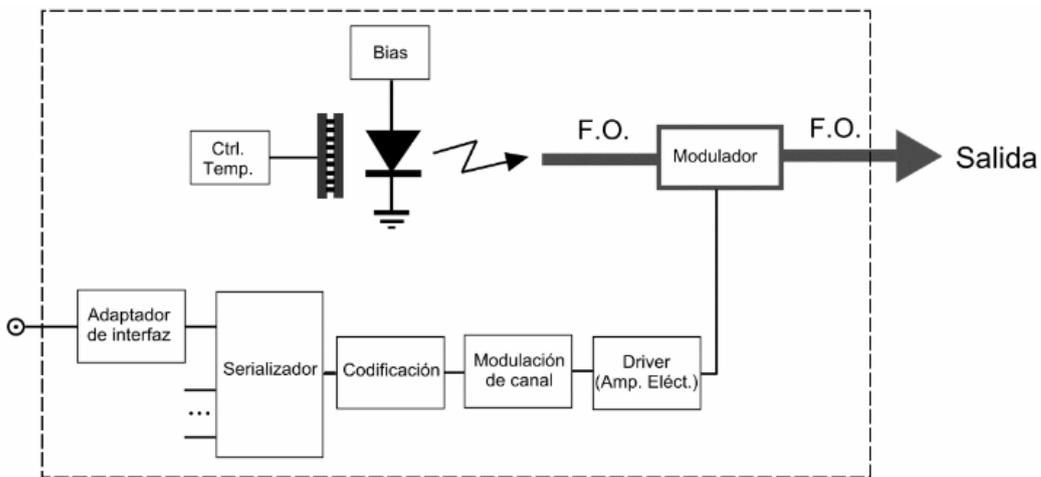


Figura 2. 12: Diagrama de un transmisor óptico de modulación externa.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Los láseres semiconductores o diodos emisores de luz se usan como fuentes ópticas, debido a su compatibilidad con el canal de comunicación de fibra óptica. La señal óptica se genera mediante la modulación de la onda portadora óptica. Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor que emite un espectro estrecho de luz. Este efecto es una forma de electroluminiscencia.

En general, los LEDs son menos potentes que las impresoras láser, pero son mucho menos caros. En la figura 2.13 se muestra un tipo de LED empleado en comunicaciones ópticas.



Figura 2. 13: Diodo de emisor de luz de tipo lateral.
Fuente: Señalín A., G. M. (2012)

Mientras que un láser semiconductor, es una fuente óptica que emite fotones en un haz coherente, es decir, que permite la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. La luz del láser consiste en una sola longitud de onda emitida en un haz estrecho. En la figura 2.14 se muestra un tipo de diodo laser (LD) o laser semiconductor.



Figura 2. 14: Diodo laser.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Los láseres Fabry-Perot (FP) emiten luz en una serie de longitudes de onda discretas, la entrega de una anchura espectral entre 5 y 8 nm. La figura 2.15 muestra el diagrama esquemático del láser FP.

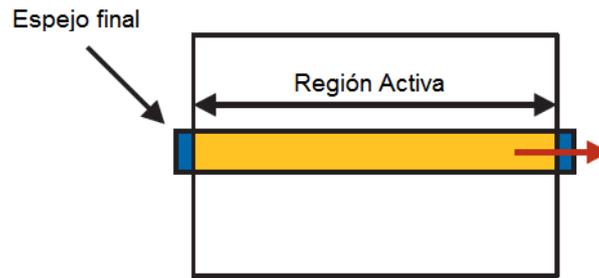


Figura 2. 15: Diagrama esquemático del láser FP.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Otro tipo de láser es el de retroalimentación distribuida (DFB), que es mucho más precisa que un simple láser FP, pero su capacidad de suministro de potencia de salida es mucho menor. Los láseres FP emiten una gran cantidad de armónicos en un rango de longitud de onda de 5 y 8 nm. Mientras que los láseres DFB, por otro lado seleccionan sólo una longitud de onda principal en el espectro del láser FP, proporcionando una anchura espectral estrecha de <0,1 nm. En la figura 2.16 se muestra el diagrama esquemático del láser DFB.

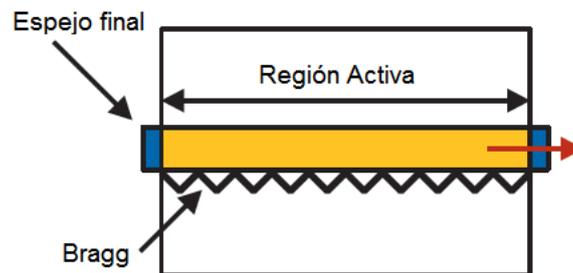


Figura 2. 16: Diagrama esquemático del láser DFB.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Es necesario conocer que la potencia inyectada a menudo se expresa en unidades de <<dBm>> con 1 mW como nivel de referencia, cuya fórmula es:

$$P(\text{dBm}) = 10 \log\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right)$$

En conclusión, los LEDs están limitados sus capacidades de modulación, es por eso que la mayoría de los sistemas ópticos emplean los láseres semiconductores como fuentes ópticas.

2.4.3. Receptores Ópticos.

Gutiérrez L., V. et al (2013) manifiesta que los receptores ópticos convierten las señales ópticas recibidas en señales eléctricas en el extremo de salida del receptor óptico. En la figura 2.17 observamos el diagrama de bloques del receptor óptico, compuesto por un acoplador, un fotodetector, y un demodulador. El canal acoplador capta la señal óptica y la envía al fotodetector, que a su vez se utilizan como fotodetectores debido a su compatibilidad con todo el sistema. Mientras que el demodulador se encarga en presentar en la salida una señal eléctrica.

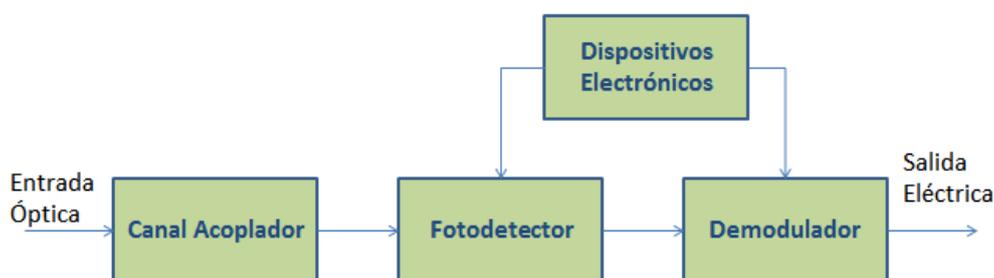


Figura 2. 17: Diagrama esquemático del láser FP.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

Dentro del proceso de la demodulación en los receptores ópticos va a depender del tipo de modulación a escoger FSK o PSK, que adicionalmente requieren de sistemas heterodinos u homodinos.

El rendimiento de un sistema óptico se caracteriza a través de la tasa de error de bits (BER). Aunque la BER se puede definir como el número de errores cometidos por segundo, tal definición hace que la tasa de bits BER sea dependiente. Es habitual definir al BER como la probabilidad media de identificación de bits correctos.

Celis B., I., et al (2008) manifiesta que un $BER = 10^{-6}$ es la probabilidad de un error por cada millón de bits. La mayoría de los sistemas ópticos especifica un $BER = 10^{-9}$ como el requisito de funcionamiento; algunos incluso requieren de un $BER = 10^{-14}$.

Un parámetro importante para cualquier receptor es la sensibilidad del receptor. Por lo general se define como la potencia óptica promedio mínimo requerido para realizar un $BER = 10^{-9}$. Los receptores ópticos son muy sensibles ante la presencia de la relación señal/ruido (SNR), sin dejar de incluir otros factores que generen ruido, corrompiendo así la señal recibida.

Aunque en el mercado hay receptores perfectos, algo de ruido se introducen debido al proceso de fotodetección, conocido como ruido cuántico o el ruido de disparo, ya que tiene su origen en la naturaleza de la partícula de los electrones. Los receptores ópticos que operan en el límite de ruido de disparo se denominan receptores cuánticos limitados por el ruido. En la práctica no existen receptores que operen en el límite cuántico debido a la presencia de varias otras fuentes de ruido.

2.5. Las Fibras Ópticas.

La fibra óptica actualmente es el elemento básico en infraestructuras de Sistemas de Telecomunicaciones, debido a la capacidad del gran ancho de banda y las características de baja atenuación, lo que hace que sean ideales para la transmisiones con altas velocidades (gigabit y más allá). En la sección anterior se presentó los componentes básicos que conforman un sistema de comunicación de fibra óptica. En la figura 2.18 se muestran los tres tipos básicos de cable de fibra óptica se utilizan en sistemas de comunicación.

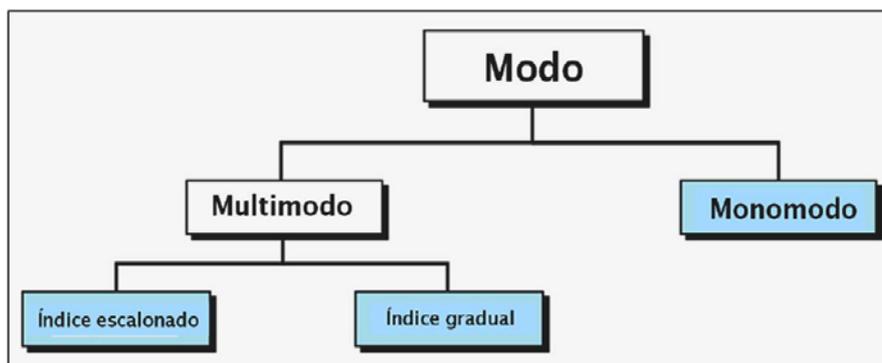


Figura 2. 18: Clasificación de la Fibra Óptica.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

2.5.1. Fibra Óptica Multimodo de Índice escalonado.

Las fibras multimodo (MM) de índice escalonado (SI) fue el primer diseño de la fibra, pero es demasiado lento para la mayoría de usos, debido a la dispersión causada por las diferentes longitudes de trayectoria de los distintos modos. Este tipo de fibra apenas se utiliza en aplicaciones de telecomunicaciones y comunicación de datos actuales.

Mynbaev, D. K. & Scheiner, L. (2001) sostiene que las fibras MM de índice escalonado, permite guiar rayos de luz a través de la reflexión total en el límite entre el núcleo y el revestimiento. El índice de refracción es uniforme en el núcleo, cuyo diámetro mínimo es 50 o 62.5 μm , un diámetro de revestimiento entre 100 y 140 μm , y una apertura numérica entre 0,2 y 0,5. La figura 2.19 muestra la forma de propagación de la señal de luz en una fibra multimodo de índice escalonado.

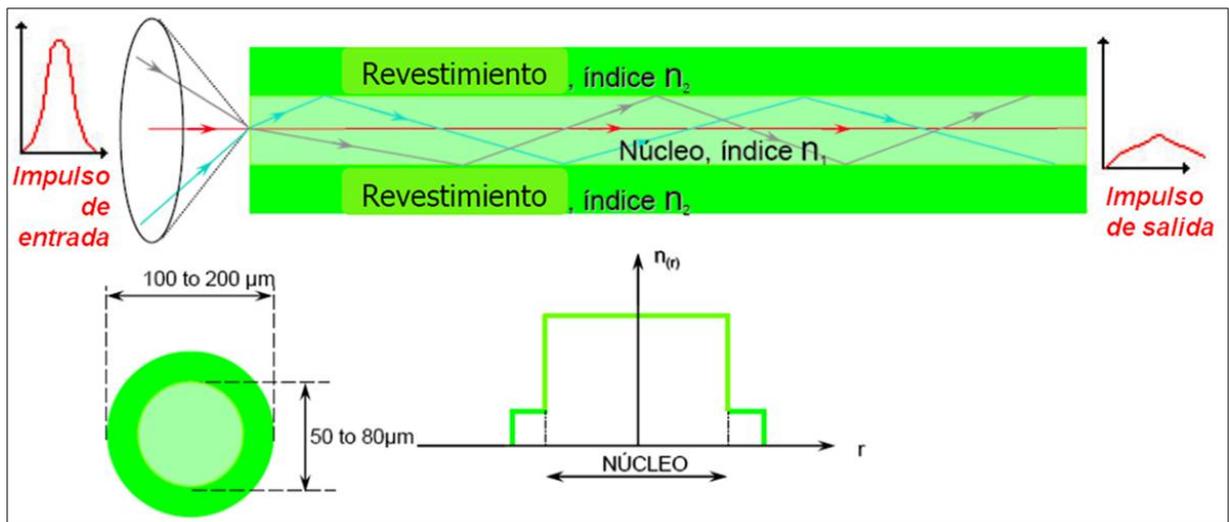


Figura 2. 19: Fibra óptica multimodo de índice escalonado.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

2.5.2. Fibra Óptica Multimodo de Índice Gradual.

La fibra multimodo de Índice Gradual (GI), es utilizada por las variaciones en la composición del vidrio en el núcleo para compensar las diferentes longitudes de trayectoria de los modos. Ofrece cientos de veces más ancho de banda que la fibra de índice escalonado.

Mynbaev, D. K. et al (2001) manifiesta que el núcleo de índice graduado (GI) de fibra multimodo posee un índice de refracción no uniforme, que disminuye gradualmente desde el eje central para el revestimiento. Esta variación del índice del núcleo obliga a los rayos de luz para el progreso a través de la fibra en forma sinusoidal.

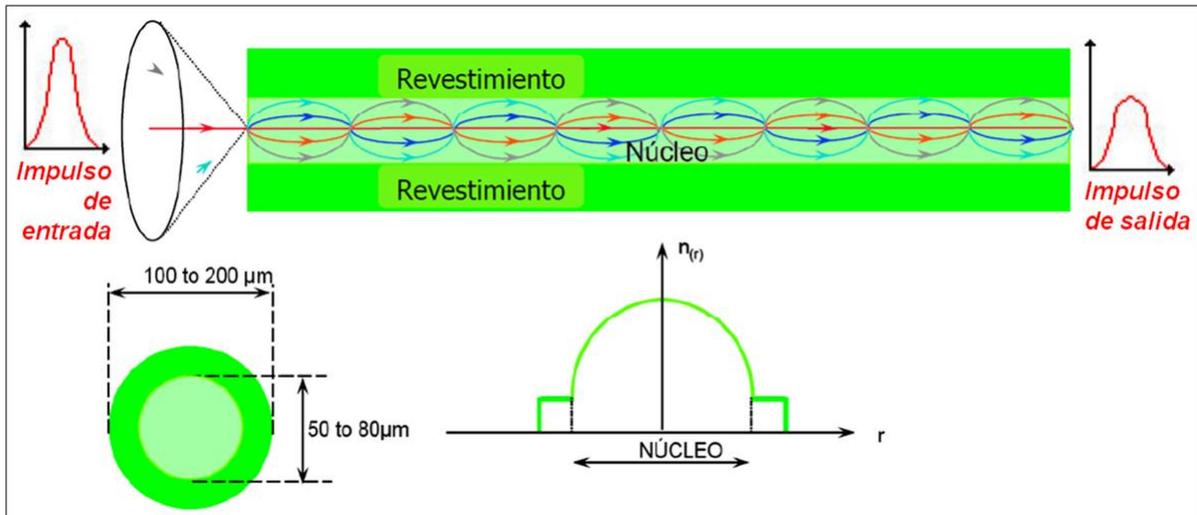


Figura 2. 20: Fibra óptica multimodo de índice graduado.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

2.5.3. Fibra Óptica Monomodo (SM)

Las fibras ópticas monomodo (SM) cuenta con atenuación inferior a las fibras multimodo (MM) y retiene mejor cada pulso de luz, ya que no muestra la dispersión causada por múltiples modos. Por lo tanto, la información se puede transmitir en distancias más largas. Mynbaev, D. K. et al (2001) indica que al igual que la fibra multimodo, la fibra monomodo era generalmente caracterizada como la fibra de índice escalonado, que significaba que el índice de refracción del núcleo de la fibra es un paso por encima de la del revestimiento y no se graduó como lo es en fibra de índice graduado.

Las fibras monomodo modernos han evolucionado hacia diseños más complejos, como revestido emparejado, revestido reprimido, y otras estructuras.

Otra de las ventajas de utilizar la fibra monomodo, es su mayor rendimiento con respecto al ancho de banda. El diámetro del núcleo reducido de fibra monomodo limita la luz a un solo modo de propagación (véase la figura 2.21), lo que elimina la dispersión modal por completo. Con los componentes adecuados de dispersión de compensación, una fibra monomodo puede transportar señales de 10 y 40 Gbps o superior a largas distancias.

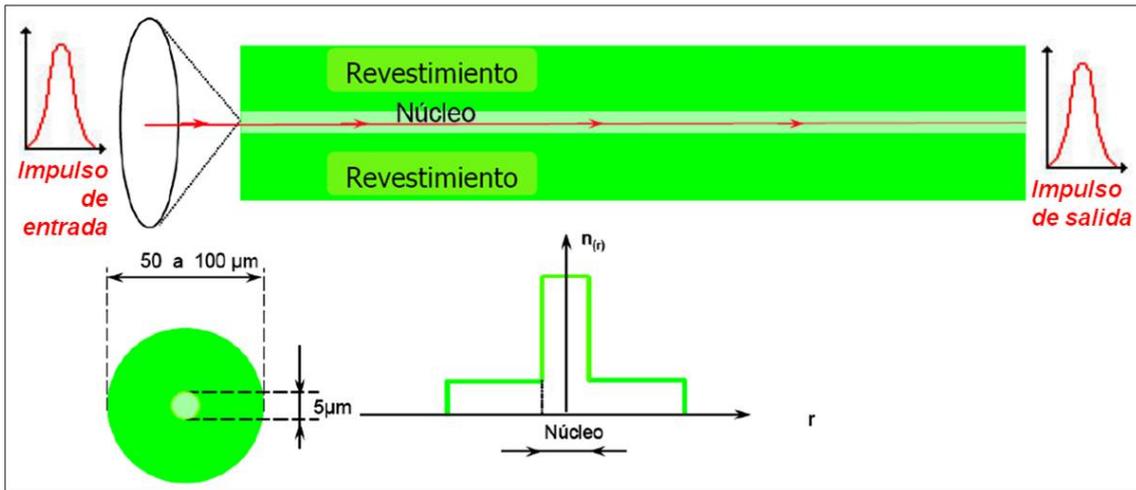


Figura 2. 21: Fibra óptica monomodo.
Fuente: Coimbra G., E., (2014)

El sistema de la capacidad de carga se puede aumentar aún más mediante la inyección de múltiples señales de diferentes longitudes de onda en una fibra, también conocido como Multiplexación por División de Longitud de Onda (*Wavelength Division Multiplexing*).

CAPÍTULO 3: REFLECTÓMETROS ÓPTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.

3.1. Introducción al uso de OTDR.

El OTDR conocido como reflectómetro óptico en el dominio del tiempo, es muy versátil para muchas aplicaciones. Es importante seleccionar un OTDR con las especificaciones adecuadas para la aplicación necesaria. Con los recientes avances en la modularidad, algunos OTDRs, tales como la flexibilidad de la familia JDSU T-BERD®/MTS (véase la figura 3.1), que pueden configurarse para realizar pruebas en casi cualquier red de fibra óptica, monomodo o multimodo ya sea en recorridos cortos o largos.

El uso de un OTDR se define ampliamente como un proceso de dos pasos:

1. Adquisición: El OTDR capta los datos y muestra los resultados numéricamente o gráficamente.
2. Medición: Los técnicos analizan los datos y en base a los resultados, decidirá ya sea para almacenar, imprimir, o ir a la adquisición de la próxima fibra.



Figura 3. 1: Modelo de OTDR de la familia JDSU T-BERD/MTS.

Fuente: <http://www.jdsu.com/>.

3.2. Adquisición de Datos del OTDR.

La mayoría de los OTDRs modernos pueden seleccionar automáticamente los parámetros de adquisición óptimos para una fibra en particular, mediante el envío de impulsos de prueba en un proceso conocido como auto-configuración. El uso de la función de configuración automática, los técnicos deberán de seleccionar la longitud de onda (o longitudes de onda) para probar, adquirir (valor medio) el tiempo, y los parámetros de la fibra (índice de refracción, por ejemplo, si no se han ingresado aún).

A continuación se describen los tres enfoques principales que se utilizan al configurar un OTDR:

1. Los técnicos deben permitir que el OTDR se auto configure y aceptar la adquisición de los parámetros del OTDR seleccionado.
2. Los técnicos con más experiencia permiten que el OTDR se auto configure, luego analizar los resultados brevemente y cambiar uno o más parámetros de adquisición para optimizar la configuración de los requisitos de la prueba en particular.
3. Técnicos experimentados optan por no utilizar la función de configuración automática por completo e introducir los parámetros de adquisición basados en la experiencia y el conocimiento del enlace en pruebas.

Típicamente, cuando se prueban los cables de varias fibras ópticas, una vez que se han seleccionado los parámetros de adquisición apropiados, ahí quedarán bloqueados. Estos mismos parámetros se utilizan para todos los tipos de fibra, esta característica acelera drásticamente el proceso de adquisición y establece la coherencia en los datos, lo cual es útil para el análisis o la comparación de las fibras.

Las siguientes subsecciones discuten varios parámetros de adquisición y sus efectos sobre la traza resultante del OTDR.

3.2.1. Nivel de inyección.

El nivel de inyección se define como el nivel de potencia en el que el OTDR inyecta luz en la fibra que está bajo prueba. Cuanto mayor sea el nivel de inyección, mayor será el rango dinámico. Si el nivel de inyección es bajo, la traza de OTDR contendrá ruido, y la medición con exactitud se verá disminuida. Debido a las pobres condiciones en el inicio, lo que da como resultado niveles bajos o disminuidos de inyección.

La presencia de suciedad en la cara de conectores y *pigtails* de baja calidad o cables de conexión (*patch cords*) dañados, son las principales causas de los bajos niveles de inyección. Es importante que todos los puntos de conexión físicos estén libres de polvo y suciedad en un sistema óptico. Con diámetros de núcleo de menos de $10\ \mu\text{m}$ en sistemas de un solo modo, la presencia inclusive de una partícula de suciedad o polvo de $4\ \mu\text{m}$ (aproximadamente del tamaño de la materia en partículas en el humo del cigarrillo) puede degradar gravemente los niveles de inyecciones.

Los kits de limpieza están disponibles para sistemas ópticos, tales kits o herramientas básicas son: la solución de limpieza isopropílico, papel Joseph, esterilizaciones de aire comprimido, y toallitas impregnada; todas listas para su uso. Los métodos más avanzados utilizan productos de limpieza de cassette y sistemas de limpieza integrados, como el sistema JDSU CleanBlast™.

El acoplamiento de conectores sucios al conector OTDR puede rayar al conector OTDR, y de manera permanentemente degradar las condiciones iniciales. Algunos OTDRs, tales como la familia T-BERD/MTS, muestran el nivel de inyección medido durante la adquisición en tiempo real o justo antes de promediar.

Para determinar la calidad relativa del nivel de inyección, el OTDR debe mirar distancias cortas. Al observar la retro dispersión que no es más que regresar el pulso de lanzamiento, y compararlo con el valor esperado.

A veces es posible que el nivel de inyección mostrado sea inaceptable, cuando en la realidad es aceptable, lo que puede ocurrir si hay un atenuador o un divisor en el sistema cerca del OTDR. En este caso, el nivel de retro dispersión será menor de lo esperado según lo medido por el medidor de nivel de inyección.

Aunque el nivel de inyección aumenta a medida que aumenta la anchura de pulso, la escala que se muestra se calibra por separado para cada ancho de pulso. Por lo tanto, la escala es significativa en cualquier ancho de pulso, y el aumento de la anchura del pulso no cambiará el nivel de inyección mal en una buena.

3.2.2. Longitud de Onda.

El comportamiento de un sistema óptico está directamente relacionado con su longitud de onda de transmisión. La fibra óptica presenta diferentes características de pérdidas en diferentes longitudes de onda. Además, los valores de pérdida de empalme también difieren en diferentes longitudes de onda.

En general, se deberá probar la fibra usando la misma longitud de onda utilizada para la transmisión. Por lo tanto, 850 y/o 1300 nm de longitud de onda se utilizan para los sistemas multimodo y 1310 y/o 1550 nm longitud de onda se utilizan para sistemas monomodo. Al probar una sola longitud de onda, considerar los siguientes parámetros:

1. Para obtener un rango dinámico dado, utilizando una longitud de onda de 1550 nm verá distancias más largas abajo de la misma fibra de una longitud de onda de 1310 nm debido a la menor atenuación en la fibra.
 - a. 0.35 dB / km a 1310 nm significa que aproximadamente 1 dB de la señal se pierde cada 3 km.
 - b. 0.2 dB / km a 1550 nm significa que aproximadamente 1 dB de la señal se pierde cada 5 km.

2. La fibra monomodo tiene un modo de campo de diámetro mayor en 1550 que en 1310 nm y en 1625 que en 1550 nm. Campos de modo más grandes son menos sensibles a la desviación lateral durante el empalme, pero que son más sensibles a las pérdidas sufridas por flexión durante la instalación o en el proceso de cableado.
- a. 1550 nm es más sensible a los dobleces en la fibra que 1310 nm, conocido como macro flexión, tal como se muestra en la figura 3.2.

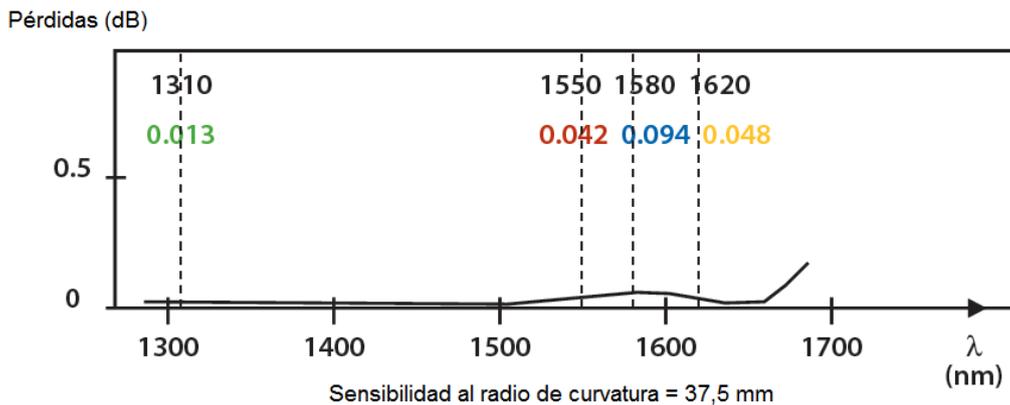


Figura 3. 2: Efectos de la macro flexión sobre una fibra.

Fuente: <http://www.jdsu.com/>.

- b. 1310 nm generalmente medirá empalme y pérdidas en los conectores superiores a 1550 nm. Estos resultados provienen de un estudio de más de 250 empalmes donde se muestran los valores de 1310 nm para ser normalmente superior en 0.02 dB sobre los valores de 1550 nm para la dispersión desplazada de fibra, tal como se muestra en la figura 3.3.

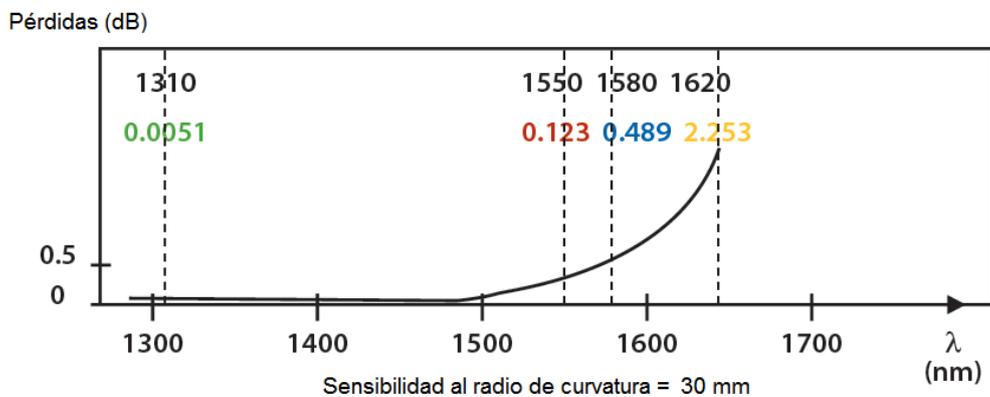


Figura 3. 3: Efectos de la dispersión desplazada.

Fuente: <http://www.jdsu.com/>.

3.2.3. Ancho de Pulso.

La duración de la anchura del pulso del OTDR controla la cantidad de luz que se inyecta en una fibra. Cuanto más tiempo la anchura de impulso, mayor será la cantidad de energía de la luz inyectada. La energía más ligera inyectada, mayor es la cantidad de luz, que se retro dispersa o reflejada por la fibra hasta el del OTDR.

Anchos de pulso largos se utilizan para poder ver a grandes distancias por un cable de fibra. Anchos de pulso largos también producen zonas más largas en la onda del trazado del OTDR donde las mediciones no son posibles, conocido como la zona muerta del OTDR. Por otro lado, los anchos de pulsos cortos se inyectan los niveles más bajos de luz, sino que también reducen la zona muerta del OTDR.

En la figura 3.4 se muestras varias mediciones realizadas en un OTDR con diferentes anchos de pulso.

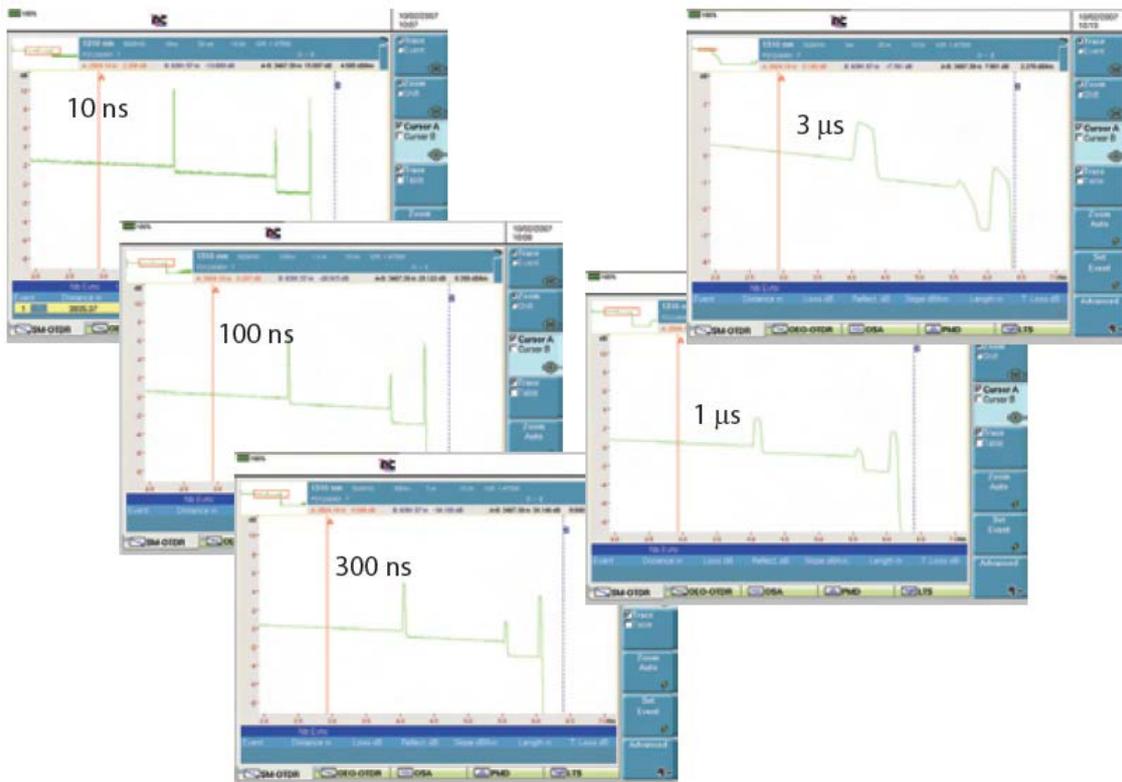


Figura 3. 4: Medición de la fibra utilizando diferentes anchos de pulso.

Fuente: <http://www.idsu.com/>.

La duración de la anchura de impulso se da generalmente en nanosegundos, pero también puede ser estimada en metros de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{cT}{2n}$$

Dónde:

c : es la velocidad de la luz en el vacío (2.99792458×10^8 m/s),

T : es la duración del pulso en ns, y

n : es el índice de refracción.

3.2.4. Alcance.

El rango de un OTDR se refiere a la distancia máxima desde el cual el OTDR puede adquirir muestras de datos. Cuanto más largo sea el rango, aún más la OTDR disparará pulsos por la fibra. El rango se ajusta generalmente al doble de la distancia hasta el extremo de la fibra. Si el rango se establece correctamente, la onda de la traza puede contener artefactos de medición, como fantasmas.

3.2.5. Promediando.

El detector OTDR funciona en los niveles de potencia óptica extremadamente bajas (tan bajas como 100 fotones por metro de la fibra). Promediar, es el proceso por el cual cada punto de adquisición se muestrea repetidamente, y se promedian los resultados a fin de mejorar la relación señal/ruido (SNR).

Seleccionando el tiempo de adquisición o número de promedios dados, los técnicos de control sabrán el proceso de promediar en el OTDR. Mientras más largo sea el tiempo o cuanto mayor sea el número de promedios, la señal de la onda se mostrará en condiciones de ruido aleatorio.

La relación entre el tiempo de adquisición (número de promedios) y la cantidad de mejora de la SNR se expresa por la siguiente ecuación:

$$\Delta SNR = 5 \log \sqrt{N}$$

Donde N es la relación de las dos medias.

Por ejemplo, con una adquisición promedio de 3 minutos mejorará el rango dinámico en 1.2 dB en comparación si utilizamos una adquisición promedio de 1 minuto.

El promedio mejorará la relación de señal ruido (SNR) al aumentar el número de adquisiciones, pero también aumenta el tiempo que se necesita para un promedio del trazado. Sin embargo, de acuerdo con la ecuación, más allá de cierto tiempo de adquisición, ninguna ventaja se obtiene debido a que la señal permanece sola. En teoría, multiplicando el tiempo medio de adquisición por 4 proporcionará un aumento de 1.5 dB en la gama dinámica.

3.3. Mediciones del OTDR.

La mayoría de los OTDR modernos realizan mediciones automáticas, con muy poca participación de los técnicos.

3.3.1. Interpretación de eventos

En general existen dos tipos de eventos: reflexivo y no reflexivo.

a. Eventos reflectantes

Los eventos reflectantes ocurren donde surge discontinuidad en la fibra, causando un cambio brusco en el índice de refracción. Los eventos reflectantes pueden ocurrir en las pausas, las uniones de conectores (véase la figura 3.5), empalmes mecánicos, o el final indeterminado de fibra.

Para eventos reflectantes, la pérdida en los conectores es típicamente alrededor de 0.5 dB. Para los empalmes mecánicos, sin embargo, la pérdida varía típicamente 0.1 dB a 0,2 dB.

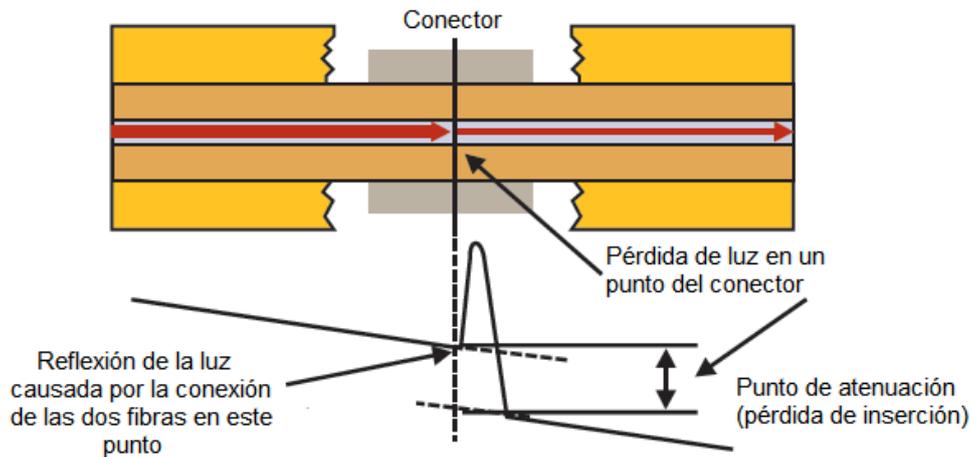


Figura 3. 5: Evento reflectante debido a un cruce del conector.

Fuente: <http://www.idsu.com/>.

Si se producen dos eventos reflectantes muy juntos, el OTDR puede tener problemas de la medición de la pérdida de cada evento. En este caso, muestra la pérdida de las pruebas combinadas, que normalmente se produce cuando se mide una longitud de fibra corta, como un puente de fibra.

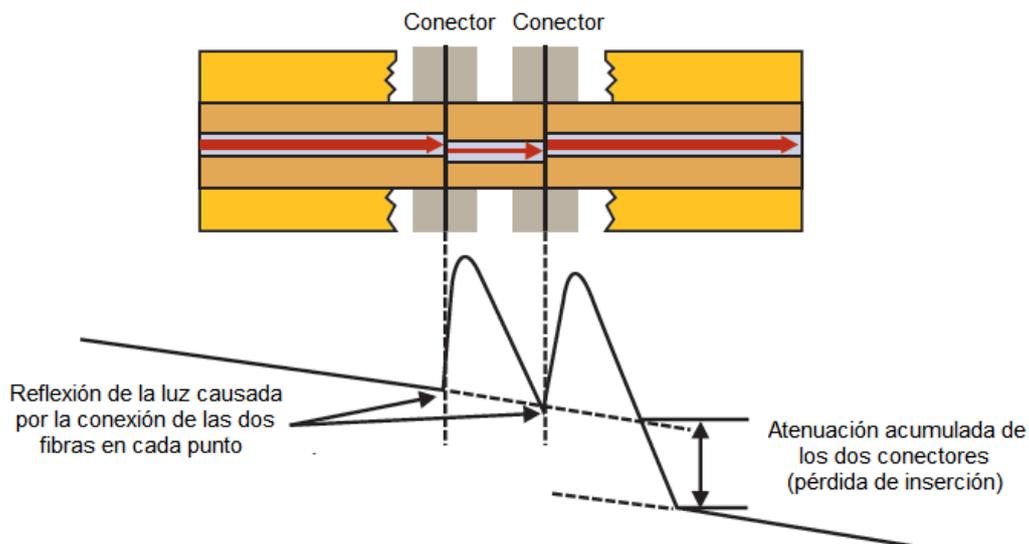


Figura 3. 6: Evento de reflexión en dos uniones de conectores muy cercanos.

Fuente: <http://www.idsu.com/>.

En el caso de un extremo de la fibra, el evento de reflexión (véase la figura 3.7) caerá en el ruido y evita tomar la medición de la atenuación.

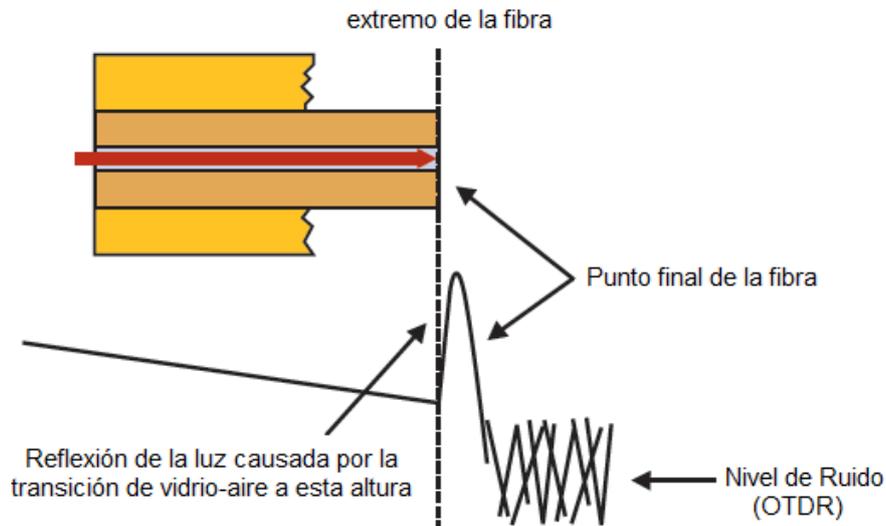


Figura 3. 7: Evento de reflexión en un extremo de la fibra.

Fuente: <http://www.jdsu.com/>.

b. Eventos no reflectantes

Los eventos no reflectantes producen discontinuidades en donde está ausente la fibra y se producen generalmente mediante empalmes de fusión o pérdidas por flexión, tales como macro curvaturas. Valores típicos de pérdida están en el intervalo de 0.02 a 0.1 dB, y dependerá del equipo de corte y empalme y del técnico/operador.

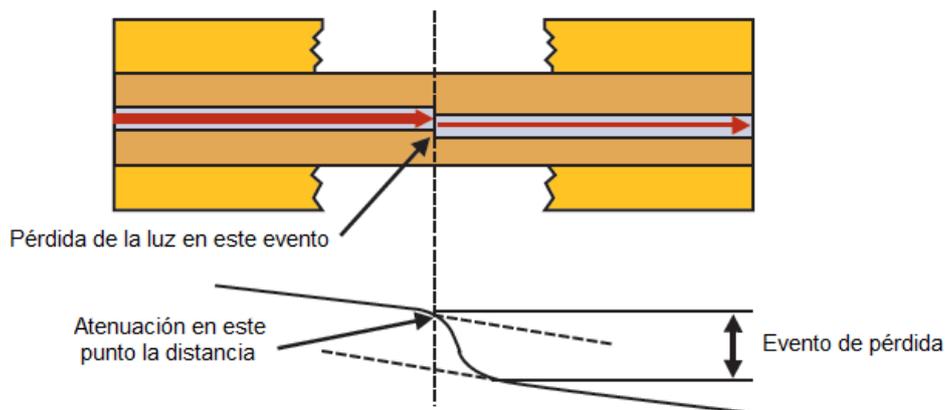


Figura 3. 8: Evento de no reflexión.

Fuente: <http://www.jdsu.com/>.

Para los eventos no reflectantes, la pérdida de evento puede aparecer como un aumento de eventos, que muestra un paso más en el trazado del OTDR.

3.3.2. Mediciones en el OTDR.

Un OTDR puede realizar las siguientes mediciones:

- a. Para cada evento: Distancia de ubicación, la pérdida y reflectancia.
- b. Para cada sección de la fibra: Longitud de sección, la pérdida de sección (en dB), la tasa de pérdida de sección (en dB/km), y la pérdida de retorno óptico (ORL) de la sección.
- c. Para el sistema completo terminado: longitud del enlace, pérdida de enlace total (en dB) y ORL del enlace

3.3.3. Métodos de medición

El OTDR permite a los técnicos realizar mediciones en el tramo de fibra de varias maneras: funciones de medición automático (completo), semiautomáticas y manuales. Los técnicos también pueden usar una combinación de estos métodos.

a. Función de medición full automática.

Usando la función totalmente automático, el OTDR detecta y mide todos los eventos, secciones y final de la fibra automáticamente, utilizando un algoritmo de detección interna.

b. Función de medición semiautomática

La selección de la función semiautomática, las medidas del OTDR comunica un evento en cada ubicación (distancia) con un marcador. Los marcadores pueden ser colocados ya sea de forma automática o manualmente. La función semiautomática, es de gran interés durante el período de aceptación (después del empalme), los técnicos deben

caracterizar completamente todos los eventos a lo largo del período con el fin de establecer datos de referencia. Dado que la detección automática no detecta e informa un evento no reflexivo con pérdida cero, se coloca un marcador en esa posición por lo que el análisis semiautomático informará la pérdida cero.

c. Función de medición manual

Para el análisis aún más detallado o por condiciones especiales, los técnicos controlan por completo la función de medición de forma manual. En este caso, los técnicos deben colocar dos o más cursores en la fibra con el fin de controlar la forma en que el OTDR mide el evento.

Dependiendo del parámetro que se mide, los técnicos pueden necesitar para posicionar hasta cinco cursores para realizar una medición manual. Aunque este es el método más lento y más engorroso de medición, es importante tener esta capacidad disponible para la fibra se extiende con diseños inusuales y la construcción que son difíciles de analizar con precisión utilizando algoritmos automatizados.

CAPÍTULO 4: APLICACIONES PRÁCTICAS DEL OTDR EMULADOR

4.1. Práctica #1: Introducción a la Operación del OTDR Emulador.

A través de esta práctica cubriremos los fundamentos de lo que es un OTDR, cómo funciona un OTDR y los bloques básicos de construcción y operación de un OTDR. Esta práctica comprenderemos la atenuación (dB) óptica, los tipos fibra a unirse y se requiere ciertos conocimientos fundamentales.

El OTDR Emulador es un paquete de software diseñado específicamente para formación de mediciones con el reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR). En la figura 4.1 se muestra la ventana de inicio de la plataforma OTDR Emulador. Permite al usuario ajustar los parámetros de OTDR comunes, tales como la longitud de onda, ancho de pulso, duración e IOR luego tomar una trazado virtual en tiempo real, todo esto desde el escritorio del ordenador.

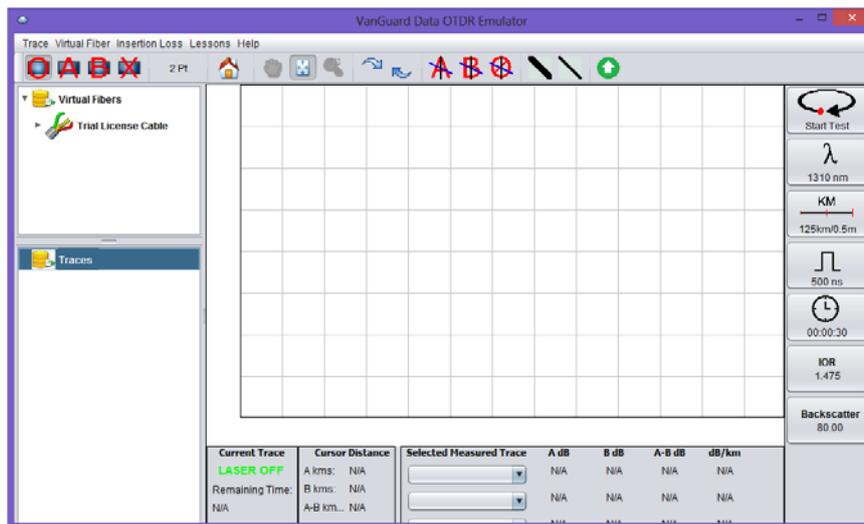


Figura 4. 1: Ventana de inicio de OTDR Emulador.

Elaborado: El Autor.

El trazado se calcula para proporcionar la simulación OTDR real, sin la necesidad de hardware costoso, tal como se muestra en la figura 4.2. Los componentes prácticos de esta formación se llevarán a cabo en el emulador de OTDR:

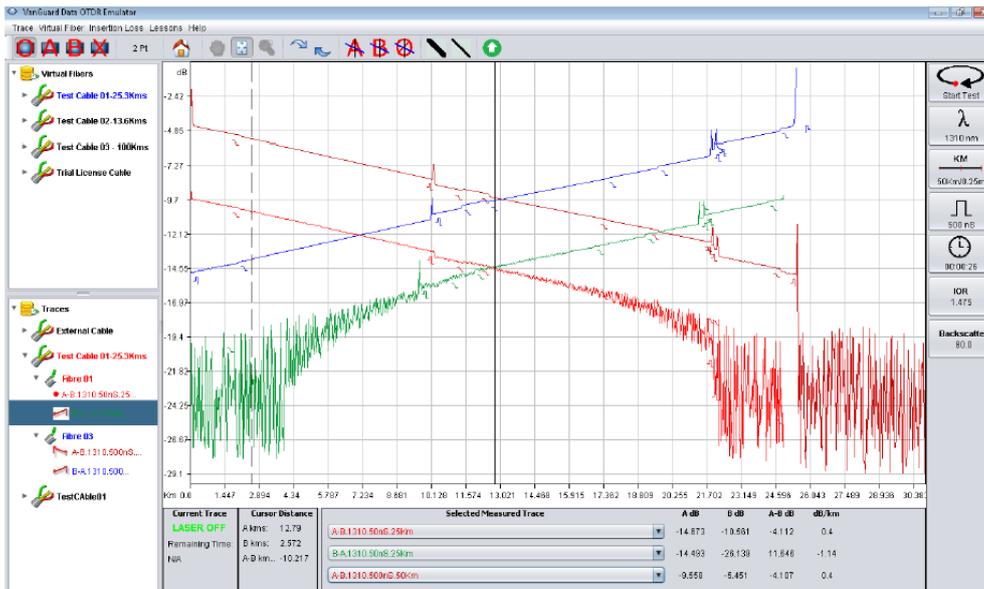


Figura 4. 2: Funcionamiento del OTDR Emulador en tiempo real.
Elaborado: El Autor.

Empezaremos con lo más básico, procederemos a tomar nuestro primer rastreo mediante OTDR Emulador.

1. Abrir el software OTDR Emulador desde el escritorio del computador.



2. Desde el icono *Virtual Fibers*, seleccionar la fibra tal como se muestra en la figura 4.3.

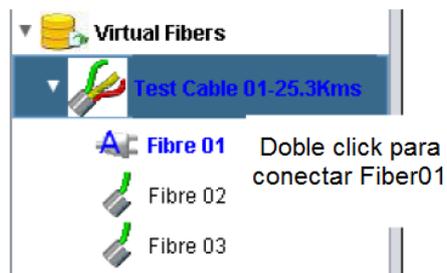
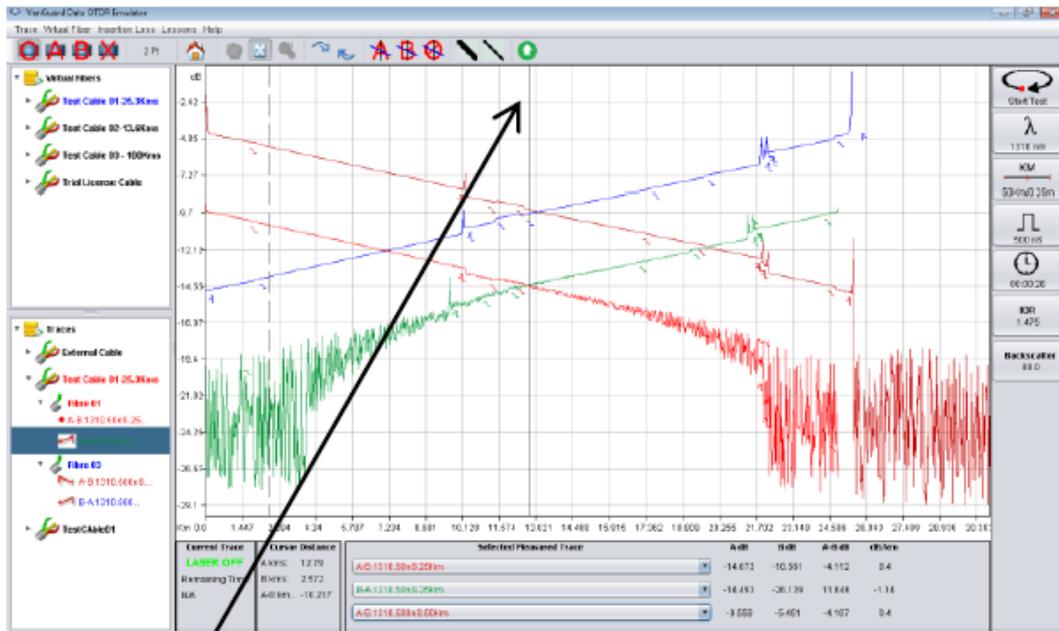


Figura 4. 3: Selección de la fibra desde *Virtual Fibers*.
Elaborado: El Autor.

3. Dar click en *Auto Set Trace Parameters* tal como se muestra en la figura 4.4.



Click Auto Set Trace Parameters

Figura 4. 4: Selección de *Auto Set Trace Parameters*.

Elaborado: El Autor.

- Después dar click en *Start Test*.



- Posteriormente manda un mensaje en inglés que traducido al español dice “Esperar a que el trazado se complete” y al finalizar se muestra el trazado en la figura 4.5.

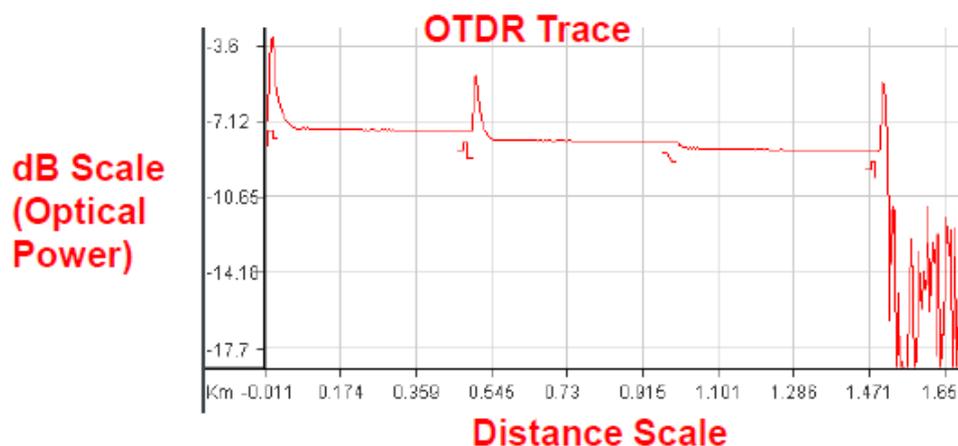


Figura 4. 5: Código para los estados *mode* y *parameter*.

Elaborado: El Autor.

En hora buena, se podrán dar cuenta que obtuvimos nuestro primer trazado del OTDR Emulador, posteriormente se tomará un rastro en una fibra diferente y con diferentes parámetros.

4.2. Práctica #2: Anchura de pulso del OTDR Emulador.

Recordemos que en la sección anterior (4.1) vimos los principios del funcionamiento del OTDR Emulador, el mismo envía pulsos cortos de luz por la fibra y espera a que la luz sea reflejada. La longitud de este pulso es conocida como el ancho de pulso.

OTDR Emulador transmite un pulso corto de luz del láser en la fibra después de escuchar el receptor cualquier luz reflejada o devuelve de nuevo al receptor en el mismo extremo, tal como se muestra en la figura 4.6. El ancho de pulso se mide en nanosegundos o microsegundos.

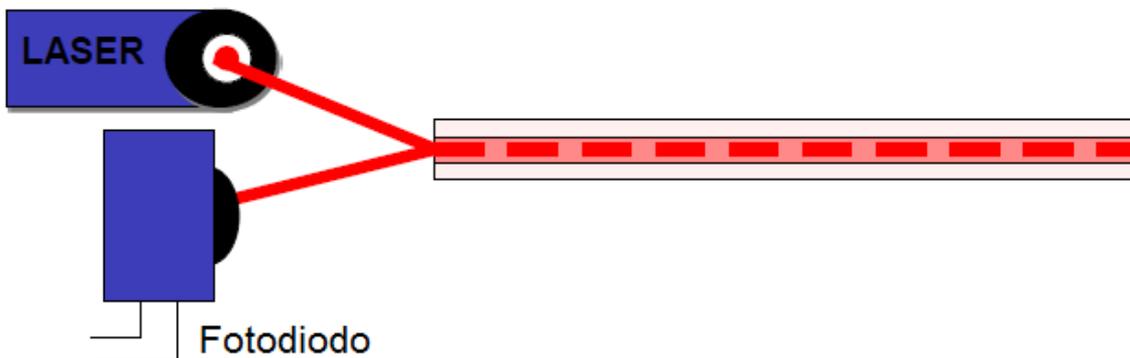


Figura 4. 6: Pulso corto de luz del láser en la fibra.
Elaborado: El Autor.

1. En el software OTDR Emulador realizaremos la simulación para medición del ancho de pulso, para lo cual se procederá de manera similar a la sección 4.1 desde el paso 2 hasta 4.
2. Cambiamos el ancho de pulso en 50 ns y tomar el trazado nuevamente.



3. Seleccionar el inicio de la simulación.



4. Posteriormente podemos observar que hay un segundo trazado con relación a la sección 4.1. En la figura 4.7 se muestra el ancho de pulso inferior pero muy ruidoso, debido a que no tiene suficiente potencia óptica para ver al final de la fibra.

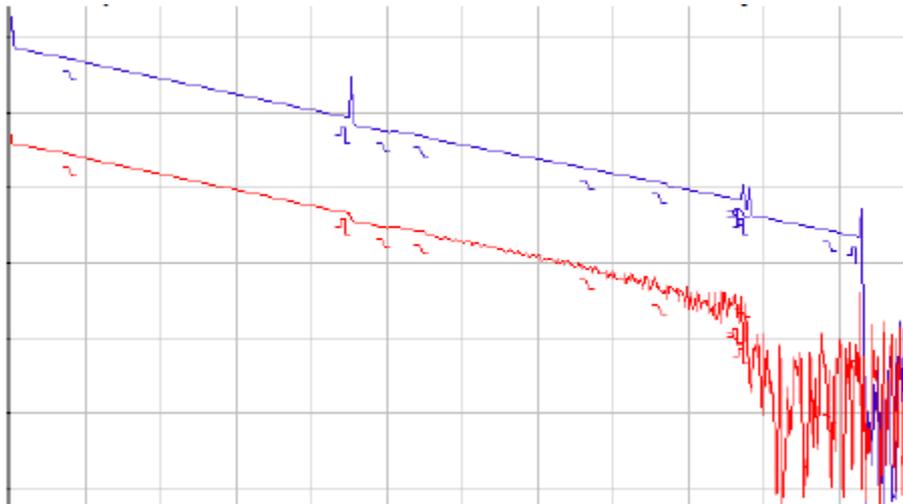


Figura 4. 7: Pulso corto de luz del láser en la fibra.
Elaborado: El Autor.

A partir de esta práctica realizada, un ajuste de la anchura del pulso puede afectar la calidad del trazado. Probando algunos ajustes de ancho de pulso y ver por qué un ancho de pulso alto tampoco sería una buena selección.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones

- Mediante la revisión del estado del arte de los sistemas de comunicaciones ópticos, se describieron las necesidades de las comunicaciones por fibra óptica, los avances de esta tecnología alrededor de los últimos 30 años.

- Mediante la plataforma de OTDR Emulator, nos permitió entender y aprender la utilidad de esta herramienta al momento de realizar simulaciones de enlaces entre nodos ópticos y obtener las medidas que un OTDR real lo puede hacer, siendo muy útil para realizar diseños de redes ópticas.

- La plataforma OTDR Emulator fue validada por el Msc Edwin F. Palacios Meléndez, docente a cargo de la asignatura Sistemas de Fibra Óptica, en la que se realizaron pruebas acerca de las mediciones realizadas en determinados enlaces que el docente en mención ha realizado para comprobar la efectividad de este programa.

5.2. Recomendaciones

- Investigar detalladamente las posibles investigaciones que se pueden realizar en los sistemas de comunicaciones ópticas, tales como la GPON que es la tendencia a llevar fibra óptica directamente al abonado, dándoles de un servicio de alta velocidad nacional e internacional.

- Aplicar el uso de esta plataforma OTDR Emulator en la asignatura de Sistemas de Fibra Óptica, y de que se analicen otras plataformas para el aprendizaje de los estudiantes de la Carrera de Ingeniería de Telecomunicaciones.

- Adquirir la licencia profesional de la plataforma OTDR Emulador para que sean manipulados por estudiantes de pregrado, posgrado y futuros trabajos en la línea de investigación que tiene la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo en la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfonse J., C. (2002). *Estudio de Limitaciones en Sistemas WDM*. Proyecto Fin de Carrera publicada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Álvarez G., E., Hernández A., C. G., & Quiroz U., G. A. (2007). *Transmisiones Ópticas mediante el uso de Solitones*. Tesis de Grado publicada en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional, México.

Basch, E. E., & Brown, T. G. (1985). *Introduction to Coherent Optical Fiber Transmission*. Communications Magazine, IEEE, Volume 23, ISSN: 0163-6804. DOI: [10.1109/MCOM.1985.1092572](https://doi.org/10.1109/MCOM.1985.1092572)

Celis B., I., & Rosas M., H. E. (2008). *Optimización del Proceso de Empalme por Fusión de Fibras Ópticas Multimodo de Índice Gradual para Reducir Pérdidas*. Tesis de Grado publicada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, México.

Chitode, J. S., (2009). *Analog and Digital Communication*. 1era. Edición. Technical Publications. Pune, India. ISBN: 978-818-43-1663-6

Coimbra G., E., (2014). *Curso Sistemas Electrónicos de Comunicaciones. Apuntes de clases y ejercicios*. Disponible en la página web: <http://www.coimbraweb.com/linkcursos.html>

Couch, W. L., II (2008). *Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos*. 7ma Edición. Pearson Educación, México. ISBN: 978-970-26-1216-2.

Einarrson, G., (2000). *Principles of Lightwave Communication Systems*. Wiley, New York.

Grosz, D. F., (2004). *Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad*. Departamento de Física y Matemática. CIS, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Guauxochitl M., A. (2009). *Diseño e Implementación de tarjetas de pruebas para dispositivos ópticos*. Tesis de Grado publicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Gutiérrez L., V. & Hernández G., L. (2013). *Predicción de pérdidas en tiempo real en empalme de Fibra Óptica Multimodo de Índice Gradual a través de captura de video en MatLab*. Tesis de Grado publicada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, México.

Infante R., A. (2009). *Apuntes de Sistemas de Transmisión Óptica de la Maestría en Telecomunicaciones*. Publicación entre la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y el Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

Montero H., D. A. (2004). *Ventajas de la nueva Tecnología de Comunicaciones UDWDMK*. Tesis de Grado publicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica

Mynbaev, D. K. & Scheiner, L. (2001). *Tecnología de las Comunicaciones de Fibra Óptica*. Prentice Hall, Estados Unidos.

Ocón G., J. (2012). *Estudio de la inserción de regeneradores 1R en un enlace Óptico WDM punto a punto mediante herramientas CAD*. Proyecto Fin

de Carrera publicada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Roden, M. S. (2006). *Sistemas de Comunicaciones Analógicos y Digitales*. 6ta Edición. Prentice Hall, Barcelona. ISBN: 978-013-03-2722-2.

Señalin A., G. M. (2012). *Simulación de un Sistema de Transmisión OOK bajo Fibra Óptica*. Tesina de Seminario publicada por la Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

Sklar, B., (2009). *Comunicaciones Digitales: Principios y Aplicaciones*. 2da. Edición. Pearson Educación. México.