



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TÍTULO:

**SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS UTILIZADOS EN
COMUNICACIONES ÓPTICAS A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA
OPTISYSTEM**

AUTOR:

ANDRÉS FERNANDO POSLIGUA COX

Previa la obtención del Título

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Edwin F. Palacios Meléndez

Guayaquil, Ecuador

2015



**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 el Sr.
Andrés Fernando Posligua Cox como requerimiento parcial para la
obtención del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES.

TUTOR

M. Sc. Edwin F. Palacios Meléndez

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Miguel A. Heras Sánchez.

Guayaquil, a los 05 del mes de Septiembre del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Andrés Fernando Posligua Cox**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA OPTISYSTEM” previa a la obtención del Título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado 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 nuestra autoría.

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

Guayaquil, a los 05 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR

ANDRÉS FERNANDO POSLIGUA COX



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Andrés Fernando Posligua Cox**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS UTILIZADOS EN COMUNICACIONES ÓPTICAS A TRAVÉS DE LA PLATAFORMA OPTISYSTEM”, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, a los 05 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR

ANDRÉS FERNANDO POSLIGUA COX

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación fue la última etapa de mi carrera y la más sacrificada por eso y por muchas cosas más este trabajo va dedicado a la mujer que ha dado todo por mí, a mi madre rosario de Fátima Cox a mis tías Rosy, Marina a mi nana y a toda mi familia que me ha apoyado en todo momento para poder salir adelante y con mucho esfuerzo llegar a donde estoy en la última etapa de mi carrera ya que sin ellos no hubiera logrado esta meta.

EL AUTOR

ANDRÉS FERNANDO POSLIGUA COX

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es en agradecimiento primeramente a Dios por darme la oportunidad de haber cumplido mi meta, ya que sin él no hubiera logrado mi sueño de haber obtenido mi título.

Agradezco también a la Universidad Católica por haberme dado la oportunidad de cumplir una meta en mi vida.

A mi tutor por haberme guiado paso a paso con su dedicación y experiencia pude lograr terminar mi trabajo de titulación y por siempre haberme dado el apoyo en toda mi carrera universitaria.

En agradecimiento a los profesores que me apoyaron en todo momento en mi etapa universitaria al Ing. Bayardo Bohórquez, al Ing. Washington Medina, al Ing. Manuel Romero y a mi tutor Ing. Edwin Palacios por apoyarme como profesional y guiarme paso a paso en mi trabajo de titulación ya que han sido excelentes maestros, más que maestros han sido amigos.

Agradezco a mi mama, tía a toda mi familia por haberme apoyado e incentivado para poder terminar esta etapa de mi vida universitaria.

Agradezco a las personas que me han apoyado ayudado y han confiado en mí para salir adelante amigos como Ronny Cevallos, Ronny Aleaga, Juan Carlos Holguín y en especial la mujer que siempre ha confiado en mí Katuska Barrios.

EL AUTOR

ANDRÉS FERNANDO POSLIGUA COX

Índice General

Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas.....	XII
Resumen	XIII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	14
1.1. Antecedentes.	14
1.2. Justificación del Problema.....	15
1.3. Definición del Problema.....	16
1.4. Objetivos del Problema de Investigación.....	16
1.4.1. Objetivo General.....	16
1.4.2. Objetivos Específicos.	16
1.5. Hipótesis.....	17
1.6. Metodología de Investigación.....	17
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACION TEORICA DE COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA	18
2.1. Desarrollo histórico de la Fibra Óptica.	18
2.2. El sistema general.....	21
2.3. Ventajas de Comunicaciones de Fibra Óptica.....	26
2.4. Teoría de la transmisión de Rayos.....	32
2.4.1. Reflexión total interna.	32
2.4.2. Ángulo de aceptación	36
2.4.3. Apertura numérica.	38
2.4.4. Rayos oblicuos.	42
2.5. Fibras monomodo	47

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES OPTICOS.....	54
3.1. Escenario de Simulación 1: Conceptos básicos EDFA.....	54
3.1.1. Ganancia de Espectro.....	59
3.1.2. Ganancia de Saturación.....	61
3.1.3. Amplificador de ruido.....	63
3.2. Escenario de Simulación 2: Amplificador Booster.....	64
3.3. Escenario de Simulación 3: Amplificado In-Line (en línea).....	68
3.4. Escenario de Simulación 3: Preamplificador.....	72
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
4.1. Conclusiones.....	74
4.2. Recomendaciones.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: El espectro electromagnético que muestra la región utiliza para las comunicaciones de fibra óptica	21
Figura 2. 2: (a) El sistema de comunicación en general. (b) El sistema de comunicación de fibra óptica	23
Figura 2. 3: Un enlace de fibra óptica digital utilizando una fuente de láser semiconductor y el fotodiodo de avalancha (APD).	25
Figura 2. 4: Los rayos de luz inciden sobre una interfaz de mayor a menor índice de refracción (por ejemplo, vidrio-aire): (a) la refracción; (b) el caso límite de la refracción que muestra el rayo crítico en un ángulo θ_c ; (c) la reflexión total interna, donde $\theta > \theta_c$	33
Figura 2. 5: La transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica perfecta..	35
Figura 2. 6: El θ_a ángulo de aceptación al lanzar la luz en una fibra óptica	37
Figura 2. 7: El trayecto de los rayos para un rayo meridional lanzado en una fibra óptica en el aire en un ángulo de entrada menor que el ángulo de aceptación de la fibra.....	39
Figura 2. 8: La trayectoria helicoidal tomada por un rayo de inclinación en una fibra óptica: (a) trayectoria del rayo de inclinación hacia abajo la fibra; (b) vista en sección transversal de la fibra	42
Figura 2. 9: La trayectoria de los rayos dentro del núcleo de la fibra para un rayo incidente en un ángulo de inclinación θ a la normal en la interfaz de núcleo de aire	44
Figura 2. 10: El perfil de índice de refracción para un W fibra monomodo ..	49
Figura 2. 11: Perfiles de salto de índice de fibra monomodo optimizados para funcionar a una longitud de onda de 1,3 micras: (a) diseño de revestimiento combinado convencional; (b) segmentado núcleo diseño revestimiento emparejado; (c) el diseño deprimida-revestimiento; especificaciones (d) del perfil de una fibra deprimida-revestimiento	51

Capítulo 3

Figura 3. 1: Tres versiones diferentes creadas en este archivo de proyecto	55
Figura 3. 2: Listado de los gráficos disponibles en docker view.	56
Figura 3. 3: Listado de gráficos adicionales que muestran los resultados. .	57
Figura 3. 4: Archivo de la sección transversal representada en gráficos de componentes de fibra dopada con erbio.....	58
Figura 3. 5: Primer escenario de simulación para amplificadores ópticos EDFA.	59
Figura 3. 6: Ganancia vs señal de onda dada en [nm] considerando la potencia de señal de entrada igual a $\approx 20 \text{ dBm}$	60
Figura 3. 7: Potencia de salida de la señal vs señal de onda dada en [nm] considerando la potencia de señal de entrada igual a $\approx 20 \text{ dBm}$	60
Figura 3. 8: Ganancia vs potencia de la señal de entrada.	61
Figura 3. 9: Señal amplificada vs potencia de la señal de entrada.	62
Figura 3. 10: Cifra de ruido vs potencia de la señal de entrada.....	62
Figura 3. 11: Caracterización ruido del amplificador presenta en vista divisor	63
Figura 3. 12: Espectro de ruido como función de la longitud de onda, cada curva en este gráfico es el resultado de las diferentes iteraciones.	64
Figura 3. 13: Simulación del amplificador Booster.	66
Figura 3. 14: Potencia de salida vs potencia de entrada.	66
Figura 3. 15: Ganancia vs potencia de la señal de entrada.	67
Figura 3. 16: Cifra de ruido (NS) vs potencia de la señal de entrada.....	67
Figura 3. 17: Gráficas que representan la configuración de rendimiento del amplificador In-Line en un esquema de co-propagación de bombeo.....	69
Figura 3. 18: Simulación del amplificador In-Line con esquema de bombeo de co-propagación.	70
Figura 3. 19: Simulación del amplificador In-Line con esquema de bombeo de contra-propagación.....	70
Figura 3. 20: Al comparar el rendimiento de ganancia de un EDFA estableció en un esquema de la bomba co- y contra-propagación	71

Figura 3. 21: Diseño: Preamplificador.....	73
Figura 3. 22: Ganancia en función de longitud de la fibra dopada con erbio considerando 980 nm y 1480 nm como longitud de onda de bombeo.....	73

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 3. 1: Propiedades de la fibra dopada de Erbio.....	58
--	----

Resumen

En este trabajo de titulación se realizó una investigación con enfoque cuantitativo para medir el rendimiento de diferentes amplificadores ópticos tratados a través de cuatro escenarios de simulación. Los amplificadores analizados fueron los EDFAs, Booster, In-Line y preamplificador a través del software OptiSystem. Esta plataforma de simulación es muy robusta pero solamente modelar redes de comunicaciones por fibra óptica.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

1.1. Antecedentes.

Los amplificadores ópticos son una tecnología clave para las redes de comunicación óptica. Junto con la tecnología de DWDM (WDM), que permite la transmisión de múltiples canales sobre la misma fibra, los amplificadores ópticos han hecho posible transmitir muchas terabits de datos a través de distancias de unos pocos cientos de kilómetros, y hasta distancias transoceánicas, proporcionando la capacidad de datos requerida para redes de comunicación actuales y futuras.

El propósito de este trabajo es proporcionar una visión general de los amplificadores ópticos. Para una discusión más detallada sobre la aplicación de los amplificadores ópticos utilizando amplificador de fibra dopada con erbio tecnología (EDFA), amplificador Booster y amplificador In-Line, que será tratado en el capítulo 3 como aporte del trabajo de titulación.

En los sistemas de fibra óptica la amplificación de la señal es necesaria, porque hay material de fibra absolutamente transparente. Esto hace que la luz infrarroja (por lo general alrededor de 1530 nm) transportado por una fibra, que se atenúa a medida que viaja a través del material. Debido a esta atenuación, las repetidoras deben utilizarse en tramos más largos de fibra óptica de aproximadamente 100 kilómetros.

1.2. Justificación del Problema.

Un amplificador de fibra óptica dopada con erbio, o EDFA, es un repetidor óptico que amplifica un haz de láser óptico directamente, sin pasar por la conversión opto-electrónica (*Opto-Electronic, O/E*) y electro-óptica (Electro-Optical, E/O). El amplificador EDFA utiliza una longitud corta de fibra óptica que ha sido tratada o "dopada" con el elemento erbio. Cuando el láser que transporta la señal hace que la misma pase a través de fibra, la energía se aplica para reforzar, o amplificar, el nivel de la señal.

Los amplificadores ópticos Booster (*Booster Optical Amplifiers, BOAs*), son amplificadores de un solo paso, de onda progresiva que funcionan bien con las dos señales monocromáticas y multi-longitud de onda. Para aplicaciones en las que se desconoce la polarización de entrada, se requiere un amplificador óptico semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier, SOA*). Sin embargo, la ganancia, el ruido, las especificaciones de ancho de banda y potencia de saturación de un BOA son superiores a la de un SOA debido a las características de diseño que hacen que la polarización SOA sea sin sensibilidad.

Por último, consideramos los amplificadores In-Line o conocidos como en línea, muy utilizados como repetidores para aumentar la potencia de la señal y ampliar la distancia de transmisión entre regeneradores digitales. Porque se utilizan los amplificadores In-Line, para ampliar la distancia de transmisión, se requiere alta potencia de salida. Sin embargo, las señales

que entran amplificadores en línea son débiles, por lo que el ruido añadido por cada amplificador en línea es importante.

Por lo tanto, también se requiere una baja cifra de ruido. En consecuencia, un amplificador en línea debe ser a la vez un buen preamplificador y un amplificador de potencia bueno.

1.3. Definición del Problema.

Necesidad de modelar y evaluar sistemas de amplificación óptica necesarios en comunicaciones ópticas de larga distancia a través de la plataforma de simulación OptiSystem.

1.4. Objetivos del Problema de Investigación.

1.4.1. Objetivo General.

Elaborar escenarios de simulación de amplificadores ópticos para comunicaciones ópticas a largas distancias sobre la plataforma OptiSystem.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Describir los fundamentos teóricos de comunicaciones por fibra óptica.
- Elaborar modelos de simulación de amplificadores ópticos para comunicaciones a larga distancia sobre fibra óptica.
- Evaluar los escenarios de simulación de amplificadores EDFA, Booster e In-Line.

1.5. Hipótesis.

Los amplificadores ópticos son de suma importancia en los nuevos sistemas de comunicación, para lo cual el desarrollo de escenarios de simulación de amplificadores permitirá al estudiante de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones mejorar su aprendizaje y conocimientos de plataformas de simulación que son muy interesantes.

1.6. Metodología de Investigación.

La metodología empleada en el desarrollo de modelos de simulación de amplificadores ópticos, se enmarca en el paradigma empírico-analítico, cuyo diseño es cuasi-experimental, ya que se van a manipular las variables o parámetros de configuración sobre Simulink.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACION TEORICA DE COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA

2.1. Desarrollo histórico de la Fibra Óptica.

El uso de la óptica visible de ondas portadoras o luz para la comunicación ha sido común durante muchos años. Los sistemas simples tales como señales de fuego, espejos que reflejan y, las lámparas de señalización han proporcionado éxito, aunque limitado, de transferencia de información. Por otra parte, tan pronto como Alexander Graham Bell en 1880 informó la transmisión de voz utilizando un haz de luz.

Para Senior, J. M. (2009), el fotófono propuesto por Bell sólo cuatro años después de la invención de la luz del sol modulada telefónicamente con un diafragma dando la transmisión de voz sobre una distancia de 200 m. Sin embargo, aunque algunas investigaciones de comunicaciones ópticas se desarrollaron en la primera parte del siglo XX y su uso se limitaba a los teléfonos y para enlaces de comunicación de baja capacidad.

Esto se debió tanto a la falta de fuentes de luz adecuadas y el problema de que la transmisión de la luz en la atmósfera estaba restringida a la línea de la vista y era muy afectado por perturbaciones tales como lluvia, nieve, niebla, polvo y la turbulencia atmosférica. Para Senior, J. M. (2009) dependiendo de sus longitudes de onda, estas portadores electromagnéticas se podían transmitir a distancias considerables, pero estaban limitados en la

cantidad de información que pueden transmitir por sus frecuencias (es decir, la capacidad de transporte de información está directamente relacionada con la medida del ancho de banda o la frecuencia de la portadora modulada, que generalmente se limita a una fracción fija de la frecuencia portadora).

En teoría, mayor es la frecuencia de la portadora, cuanto mayor sea el ancho de banda de transmisión disponible y por lo tanto la capacidad de transporte de información del sistema de comunicación. Por esta razón se ha desarrollado la comunicación por radio a las frecuencias más altas (es decir, VHF y UHF) que conduce a la introducción de la aún mayor frecuencia de microondas y, últimamente, la transmisión de ondas milimétricas.

Senior, J. M. (2009) indica que un beneficio adicional de la utilización de frecuencias portadoras altas es la capacidad general del sistema de comunicación para concentrar la energía disponible dentro de la onda electromagnética transmitida, dando así un rendimiento de sistema mejorado. Un interés renovado en comunicación óptica se estimuló en la década de 1960 con la invención del láser. Este dispositivo proporciona una poderosa fuente de luz coherente, junto con la posibilidad de modulación de alta frecuencia. Además la baja divergencia del haz del láser hizo mejorada transmisión óptica de espacio libre una posibilidad práctica. Sin embargo, las limitaciones antes mencionadas de transmisión de la luz en la atmósfera tienden a restringir estos sistemas a las aplicaciones de corta distancia.

Sin embargo, Senior, J. M. (2009) sostiene que a pesar de los problemas de espacio libre en algunos modestos enlaces de comunicaciones ópticas se han implementado para aplicaciones tales como la vinculación de una cámara de televisión a un vehículo y para los enlaces de datos de unos pocos cientos de metros entre edificios. También hay algo de interés en la comunicación óptica entre satélites en el espacio exterior usando técnicas similares.

Aunque el uso del láser para la comunicación óptica de espacio libre resultó ser algo limitada, la invención del láser promovió un tremendo esfuerzo de investigación en el estudio de los componentes ópticos para lograr la transferencia de información fiable que utiliza un portador de onda de luz. Para Dutta, N. K., & Wang, Q. (2013) sostiene que se propusieron comunicaciones ópticas a través de guías de ondas dieléctricas o fibras ópticas fabricadas a partir de vidrio que evitaron la degradación de la señal óptica.

Tales sistemas han sido vistos como un reemplazo para los sistemas de transmisión por cable o portadoras coaxiales. Inicialmente las fibras ópticas exhiben atenuación muy alta (es decir, 1,000 dB/km) y por lo tanto no eran comparables con los cables coaxiales que iban a sustituir (es decir, de 5 a 10 dB/km).

Para Miller, S. (2012) también hubieron graves problemas involucrados en formar parte de los cables de fibra de una manera satisfactoria para lograr una baja pérdida y permitir que el proceso que se lleva a cabo con relativa facilidad y en varias ocasiones para la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre, la longitud de onda λ es igual a la velocidad de la luz en un vacío c veces el recíproco de la frecuencia f en hercios o $\lambda = c/f$.

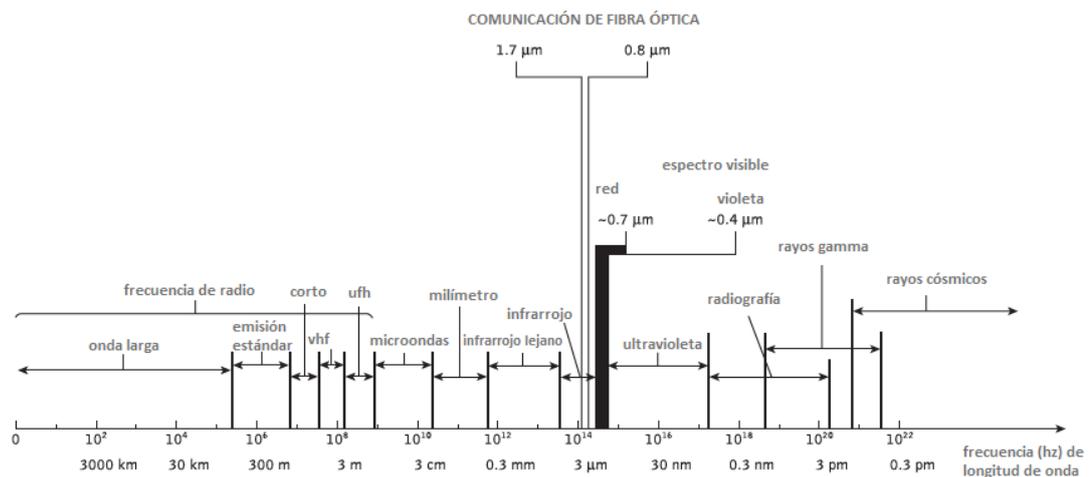


Figura 2. 1: El espectro electromagnético que muestra la región utiliza para las comunicaciones de fibra óptica
Fuente: Miller, S. (2012).

En el campo. Sin embargo, en el plazo de 10 años las pérdidas de fibra óptica se redujeron a menos de 5 dB técnicas kilómetros-1 y de unión de baja pérdida adecuada se perfeccionaron.

2.2. El sistema general.

Un sistema de comunicación de fibra óptica es similar en concepto básico a cualquier tipo de sistema de comunicación. Un diagrama

esquemático de bloques de un sistema de comunicación general se muestra en la Figura 1.2 (a), la función de los cuales es el de transmitir la señal desde la fuente de información sobre el medio de transmisión hacia el destino.

Por consiguiente, el sistema de comunicación consiste en un transmisor o modulador vinculado a la fuente de información, el medio de transmisión, y un receptor o demodulador en el punto de destino. En comunicaciones eléctricas la fuente de información proporciona una señal eléctrica, por lo general deriva de una señal de mensaje que no es eléctrico (por ejemplo, sonido), a un transmisor que comprende componentes eléctricos y electrónicos que convierte la señal en una forma adecuada para la propagación sobre el medio de transmisión.

Esto se logra a menudo mediante la modulación de un vehículo, que, como se mencionó anteriormente, puede ser una onda electromagnética. El medio de transmisión puede constar de un par de cables, un cable coaxial o un enlace de radio a través del espacio.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en cualquier medio de transmisión, la señal es atenuada, o sufre pérdida, y está sujeta a la degradación debida a la contaminación por señales y ruido aleatorio, así como las posibles distorsiones impuestas por mecanismos dentro del propio medio. Por lo tanto, en cualquier sistema de comunicación hay una distancia

máxima permitida entre el transmisor y el receptor más allá del cual el sistema cesa efectivamente para dar comunicación inteligible

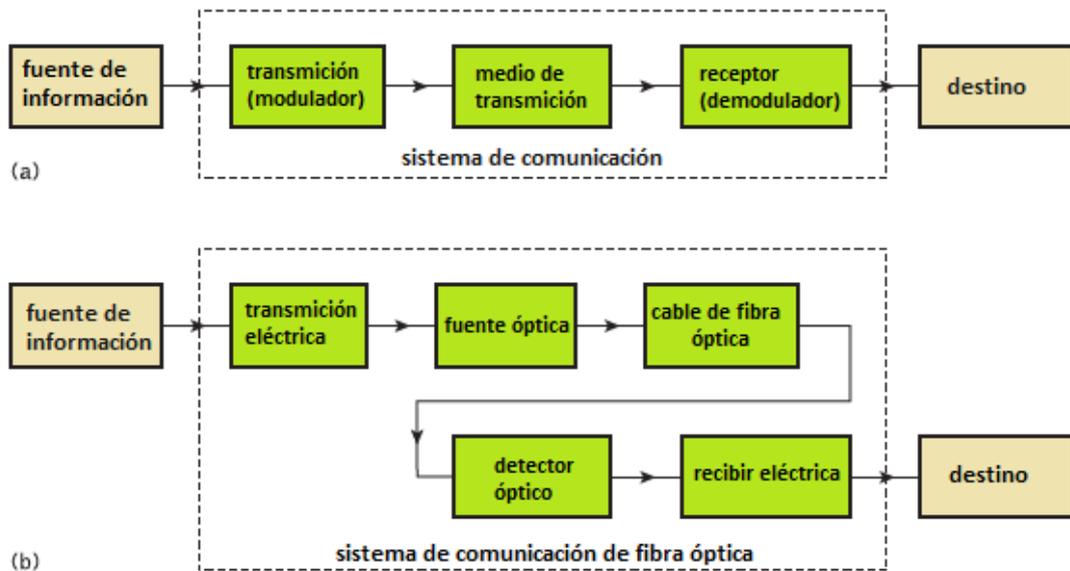


Figura 2. 2: (a) El sistema de comunicación en general. (b) El sistema de comunicación de fibra óptica
Fuente: Miller, S. (2012).

Para Ribeiro, L. B. (2012) las aplicaciones de larga distancia requerían de la instalación de repetidoras o amplificadoras de línea, tanto para eliminar la distorsión de la señal y para aumentar el nivel de la señal antes de que continúe la transmisión se continuó por el enlace.

En la figura 2.2 (a) se muestra el diagrama de bloques de un típico sistema de comunicaciones, mientras que la figura 2.2 (b) se muestra más en detalle un sistema de comunicaciones ópticas. En este caso la fuente de información proporciona una señal eléctrica a un transmisor que comprende una etapa eléctrica que acciona una fuente óptica para dar modulación de la portadora de onda de luz.

La fuente óptica proporciona la conversión eléctrica-óptica que bien puede ser un láser semiconductor o un diodo emisor de luz (LED). Por lo tanto hay un requisito para la conexión eléctrica en cada extremo del enlace óptico y en la actualidad los procesamientos de señales se realizan generalmente utilizando energía eléctrica.

La portadora óptica es modulada utilizando ya sea una señal de información analógica o digital. En el sistema mostrado por la figura 2.2 (b) la modulación analógica implica la variación de la luz emitida por la fuente óptica de una manera continua. Con la modulación digital, sin embargo, los cambios discretos en la intensidad de la luz se obtienen (es decir, los impulsos de encendido y apagado).

Aunque a menudo es más sencillo de implementar, la modulación analógica con un sistema de comunicación de fibra óptica es menos eficiente, requiriendo una relación señal-ruido mucho mayor en el receptor de modulación digital. Además, la linealidad necesaria para la modulación analógica no siempre es proporcionada por fuentes ópticas de semiconductores, especialmente a altas frecuencias de modulación. Por estas razones, los enlaces de comunicación de fibra óptica analógicos se limitan generalmente a distancias más cortas y con un funcionamiento de ancho de banda inferior a enlaces digitales.

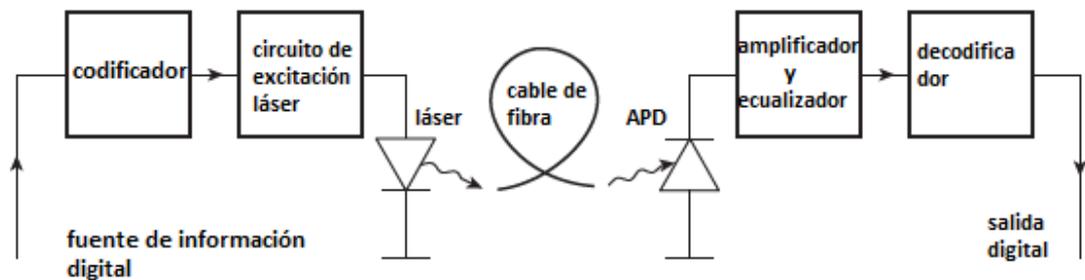


Figura 2. 3: Un enlace de fibra óptica digital utilizando una fuente de láser semiconductor y el fotodiodo de avalancha (APD).
Fuente: Miller, S. (2012).

La figura 2.3 muestra un esquema de bloques de un típico enlace de fibra óptica digital. Inicialmente, la señal digital de entrada de la fuente de información se codifica de forma adecuada para la transmisión óptica. El circuito de excitación de láser modula directamente la intensidad del láser semiconductor con la señal digital codificada. De ahí que una señal óptica digital se lanzó en el cable de fibra óptica.

El fotodiodo de avalancha (*Avalanche Photo-Diode, APD*), es seguido por un amplificador y ecualizador o un filtro para proporcionar ganancia, así como el procesamiento de señales lineales y reducción de ancho de banda de ruido. Por último, la señal obtenida se decodifica para dar la información digital original. Sin embargo, en esta etapa, es ilustrativo considerar las ventajas que ofrece la comunicación de onda de luz a través de fibras ópticas en comparación con otras formas de la línea y la radio de comunicación que han dado lugar a la amplia utilización de estos sistemas en muchas áreas en todo el mundo.

2.3. Ventajas de Comunicaciones de Fibra Óptica.

Comunicaciones utilizando una onda portadora óptica guiada a lo largo de una fibra de vidrio tiene una serie de características muy atractivas, varios de los cuales eran evidentes cuando la técnica se concibió originalmente. Por otra parte, los avances en la tecnología hasta la fecha han superado incluso las previsiones más optimistas, la creación de ventajas adicionales.

Por lo tanto, es útil tener en cuenta los méritos y características especiales que ofrecen las comunicaciones de fibra óptica sobre comunicaciones eléctricas más convencionales. En este contexto, comenzamos con las ventajas previstas inicialmente y luego consideramos las características adicionales que se han hecho evidentes a medida que la tecnología se ha desarrollado.

(a) Enorme potencia de ancho de banda:

La frecuencia de portadora óptica en el rango de 10^{13} a 10^{16} Hz (generalmente en el infrarrojo cercano alrededor de 10^{14} Hz o 10^5 GHz) se obtiene un ancho de banda de transmisión de potencial mucho mayor que los sistemas de cable metálico (es decir, ancho de banda de cable coaxial típicamente de 20 MHz a distancias de hasta un máximo de 10 km) o inclusive sistemas de radio de onda milimétricas (es decir, sistemas que actualmente operan con anchos de banda de modulación de 700 MHz más de unos pocos cientos de metros).

De hecho, para el año 2000 el típico ancho de banda multiplicada por producto de longitud de un enlace de fibra óptica que incorpora amplificadores de fibra era de 5000 GHz·km en comparación con el producto típico de ancho de banda de longitud de cable coaxial de alrededor de 100 MHz·km. Por lo tanto, en este tiempo la fibra óptica ya estaba demostrando un factor de 50000 de mejora del ancho de banda a través de cable coaxial, mientras que también proporcionaba mayor capacidad de transportar información a través de distancias de transmisión mucho más largas.

Aunque el ancho de banda de la fibra utilizable se extenderá más hacia la frecuencia de la portadora óptica, es claro que este parámetro está limitado por el uso de una señal portadora óptica individual. Por lo tanto, una utilización del ancho de banda mucho mayor para una fibra óptica se puede lograr mediante la transmisión de varias señales ópticas, cada una en diferentes longitudes de onda centrales, en paralelo en la misma fibra.

(b) Tamaño y peso reducidos.

Las fibras ópticas tienen diámetros muy pequeños, que a menudo no son mayores que el diámetro de un cabello humano. Por lo tanto, incluso cuando tales fibras están cubiertas con capas protectoras que son mucho más pequeños y mucho más ligeros que los cables de cobre correspondiente. Esta es una tremenda bendición para aliviar la congestión del conducto en las ciudades, así como permitir una expansión de

transmisión de la señal dentro de los móviles como aeronaves, satélites e incluso barcos.

(c) Aislamiento eléctrico.

Las fibras ópticas que se fabrican a partir de vidrio, o, a veces un polímero plástico, son aislantes eléctricos y, por lo tanto, a diferencia de sus homólogos metálicos, no exhiben bucle de tierra y problemas de interfaz. Además, esta propiedad hace que la transmisión por fibra óptica ideal para la comunicación en entornos eléctricamente peligrosos, ya que las fibras no crean ningún arco o chispa de peligro en abrasiones o cortocircuitos.

(d) Inmunidad a la interferencia y diafonía.

Las fibras ópticas forman una guía de onda dieléctrica y por lo tanto están libres de la interferencia electromagnética (EMI), la interferencia de radiofrecuencia (RFI), o transitorios de conmutación dando pulsos electromagnéticos (EMP). Por lo tanto la operación de un sistema de comunicación de fibra óptica no se ve afectada por la transmisión a través de un entorno con mucho ruido eléctrico y el cable de fibra no requiere apantallamiento de EMI.

También, el cable de fibra no es susceptible a la caída de rayos si se utiliza en lugar de sobrecarga subterráneo. Por otra parte, es bastante fácil para garantizar que no hay interferencia óptica entre las fibras y por lo tanto, a diferencia de la comunicación utilizando conductores eléctricos, la diafonía

es despreciable, incluso cuando muchas fibras están cableados en forma conjunta.

(e) Señal de seguridad.

La luz procedente de fibras ópticas no irradia de manera significativa y, por tanto, proporcionar un alto grado de seguridad de la señal. A diferencia de la situación con cables de cobre, una señal óptica transmitida no puede obtenerse a partir de una fibra de una manera no invasiva (es decir, sin llamar la potencia óptica de la fibra). Por lo tanto, en teoría, cualquier intento de adquirir una señal de mensaje transmitida se puede detectar ópticamente. Esta característica es obviamente atractivo para aplicaciones militares, la banca y la transmisión de datos en general (es decir, la red de ordenadores).

(f) Baja pérdida de transmisión.

El desarrollo de las fibras ópticas en los últimos 20 años ha dado como resultado en la producción de cables de fibra óptica que exhiben muy baja atenuación de la pérdida de transmisión en comparación con los mejores conductores de cobre. Las fibras se han fabricado con pérdidas tan bajas como 0.15 dB/km y esta característica se ha convertido en una importante ventaja de las comunicaciones de fibra óptica. Esto facilita la implementación de enlaces de comunicaciones con repetidores ópticos o amplificadores a distancias muy amplias, lo que reduce los costos y la complejidad del sistema.

Conjuntamente con la modulación, la capacidad de ancho de banda ya probado en cables de fibra, esta propiedad ha proporcionado un caso totalmente convincente para la adopción de las comunicaciones de fibra óptica en la mayoría de las aplicaciones de telecomunicaciones de larga distancia, en sustitución no sólo en cables de cobre, sino también las comunicaciones por satélite, como consecuencia de la demora muy notable que incurrió para la transmisión de voz cuando se utiliza este último enfoque.

(g) Robustez y flexibilidad.

Aunque los revestimientos protectores son esenciales, las fibras ópticas pueden ser fabricadas con muy elevadas fortalezas de tracción. Tal vez resulte sorprendente para una sustancia vítrea, las fibras también pueden ser dobladas para pequeños radios o trenzado sin dañar a la fibra. Además, las estructuras de cable que han sido desarrolladas, han demostrado ser flexibles, compactas y extremadamente resistente.

Tomando en cuenta el tamaño y la ventaja de peso, estos cables de fibra óptica son generalmente superiores en términos de almacenamiento, transporte, manejo e instalación de cables de cobre correspondientes, mientras que exhiben resistencia al menos compatible y durable.

(h) Fiabilidad del Sistema y facilidad de mantenimiento.

Estas características se deben principalmente a las propiedades del cable de fibra óptica de baja pérdida, que reduce la necesidad de repetidores

intermedios o amplificadores de línea para impulsar la intensidad de la señal transmitida. Por lo tanto con un menor número de repetidores o amplificadores ópticos, la fiabilidad del sistema se mejora, en general en comparación con los sistemas de conductores eléctricos convencionales. Además, la fiabilidad de los componentes ópticos ya no es un problema con tiempos de vida proyectados de 20 a 30 años. Estos factores también tienden a reducir el tiempo de mantenimiento y los costes.

(i) Potencial de bajo costo.

El vidrio que generalmente proporciona el medio de transmisión de fibra óptica está hecho de arena. Así, en comparación con conductores de cobre, las fibras ópticas ofrecen la posibilidad de comunicaciones por línea de bajo costo. Aunque en los últimos años este potencial en gran medida se ha realizado en los costos del medio de transmisión de fibra óptica que para las compras a granel se ha convertido en la competencia de cables de cobre (es decir, pares trenzados), todavía no se ha logrado en todas las demás áreas de componentes asociados con las comunicaciones de fibra óptica.

Por ejemplo, los costos de los láseres semiconductores de alto rendimiento y fotodiodos del detector son todavía relativamente altas, así como algunos de los interesados en la tecnología de conexión (conectores desmontables, acopladores, etc.). Los costes totales del sistema cuando utilizan la comunicación de fibra óptica en enlaces de larga distancia, sin embargo, son sustancialmente menores que las de los sistemas de línea

eléctrica equivalentes debido a la baja pérdida y las propiedades de banda ancha del medio de transmisión óptica. Como se indica en el inciso (f), el requisito de repetidores intermedios y la electrónica asociada se reduce, dando una ventaja sustancial de costes.

Aunque este costo beneficio da una ganancia neta para enlaces de larga distancia, que no siempre es el caso en aplicaciones de corta distancia, donde el costo adicional incurrido, debido a la conversión (y viceversa) eléctrica óptica, puede ser un factor decisivo.

Sin embargo, hay otras ventajas de coste posible en relación con el envío, manipulación, instalación y mantenimiento, así como las características indicadas en los incisos (c) y (d) pueden resultar importantes en la elección del sistema. Los costos de la reducción de las comunicaciones de fibra óptica han proporcionado una fuerte competencia no sólo con los sistemas eléctricos de transmisión de línea, sino también para los sistemas de transmisión de radio de microondas y ondas milimétricas.

2.4. Teoría de la transmisión de Rayos

2.4.1. Reflexión total interna.

Para considerar la propagación de la luz dentro de una fibra óptica utilizando el modelo de la teoría de rayos, es necesario tener en cuenta el índice de refracción del medio dieléctrico. El índice de refracción de un medio se define como la relación de la velocidad de la luz en el vacío a la

velocidad de la luz en el medio. Un rayo de luz viaja más lentamente en un medio ópticamente más denso que en uno que es menos denso, y el índice de refracción da una medida de este efecto.

Cuando un rayo incide sobre la interfaz entre dos dieléctricos de diferentes índices de refracción (por ejemplo, vidrio-aire), la refracción se produce tal como se muestra en la figura 2.4 (a). Se puede observar que el rayo se aproxima a la interfaz está propagando en un dieléctrico de índice de refracción n_1 y se encuentra en un ángulo ϕ_1 a la normal en la superficie de la interfaz.

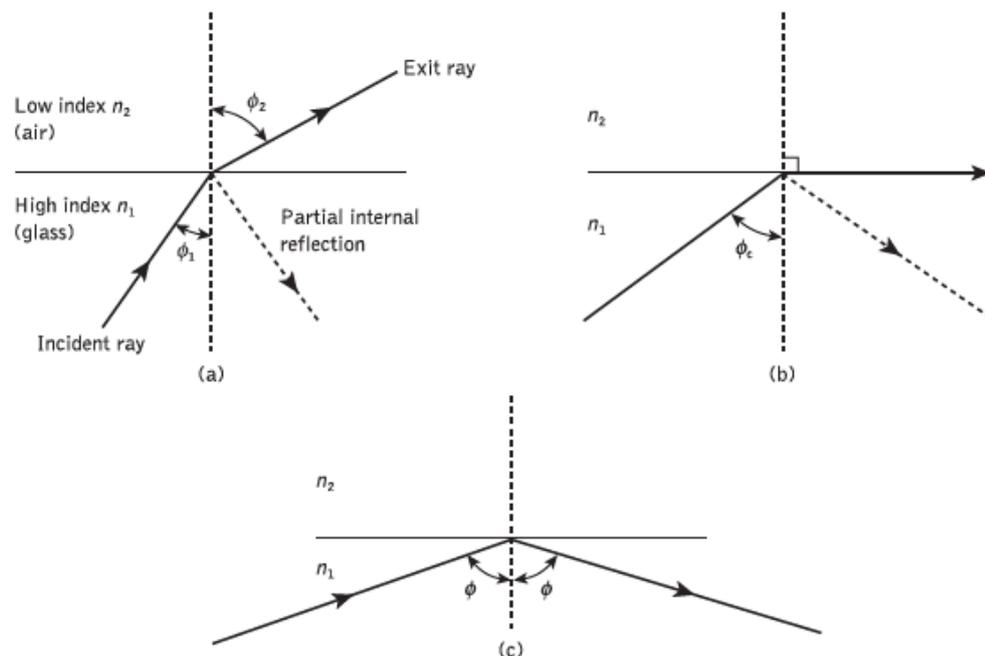


Figura 2. 4: Los rayos de luz inciden sobre una interfaz de mayor a menor índice de refracción (por ejemplo, vidrio-aire): (a) la refracción; (b) el caso límite de la refracción que muestra el rayo crítico en un ángulo ϕ_c ; (c) la reflexión total interna, donde $\phi > \phi_c$

Fuente: Barnoski, M. (2012).

Si el dieléctrico en el otro lado de la interfaz tiene un índice de refracción n_2 que es menor que n_1 , a continuación, la refracción es tal que la trayectoria del rayo en este medio índice es inferior al ángulo θ_2 con la normal, donde θ_2 es mayor que θ_1 . Los ángulos de incidencia θ_1 y refracción θ_2 están relacionados entre sí y a los índices de refracción de los dieléctricos por la ley de Snell de la refracción, que establece que:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

O:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

También se puede observar en la figura 2.4 (a) que una pequeña cantidad de luz se refleja de nuevo en el medio dieléctrico de origen (reflexión interna parcial). Como n_1 es mayor que n_2 , el ángulo de refracción es siempre mayor que el ángulo de incidencia. Así, cuando el ángulo de refracción es 90° y el rayo refractado emerge paralelo a la interfaz entre los dieléctricos, el ángulo de incidencia debe ser menor que 90° .

Este es el caso del límite de refracción y el ángulo de incidencia es ahora conocido como ángulo crítico θ_c tal como se muestra en la figura 2.4 (b). De la ecuación de Snell, el valor del ángulo crítico viene dada por:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

En los ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico de la luz se refleja de nuevo en el medio dieléctrico de origen (reflexión interna total) con

una alta eficiencia (en torno a 99,9%). Por lo tanto, se puede observar en la figura 2.4 (c) que la reflexión total interna se produce en la interfaz entre dos dieléctricos de diferentes índices de refracción, cuando la luz es incidente en el dieléctrico de índice más bajo desde el dieléctrico de alto índice, y el ángulo de incidencia.

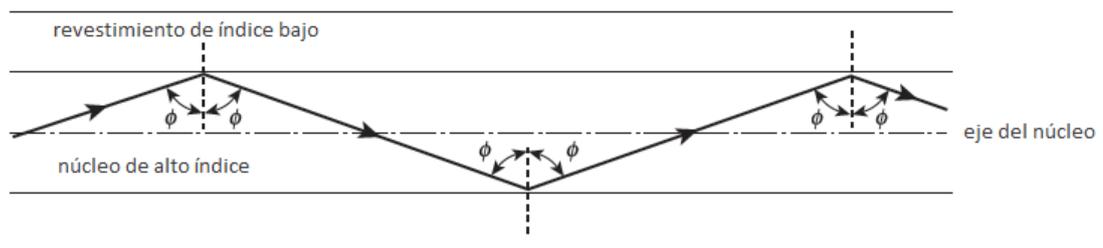


Figura 2. 5: La transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica perfecta
Fuente: Barnoski, M. (2012).

El rayo de luz excede el valor crítico, este es el mecanismo por el cual la luz en un ángulo suficientemente poco profunda (menos de $90^\circ - \phi_c$) puede considerarse para propagar hacia abajo en una fibra óptica con baja pérdida. La figura 2.6 ilustra la transmisión de un rayo de luz en una fibra óptica a través de una serie de reflexiones internas totales en la interfaz del núcleo de silicio y el revestimiento de la refracción de índice ligeramente inferior. El rayo tiene un ángulo de incidencia ϕ en la interfaz que es mayor que el ángulo crítico y se refleja con el mismo ángulo a la normal.

El rayo de luz mostrado por la figura 2.6 se conoce como un rayo meridional a medida que pasa a través del eje del núcleo de fibra. Este tipo de rayo es el más simple de describir y se utiliza generalmente cuando que ilustra las propiedades de transmisión fundamentales de fibras ópticas.

También se debe considerar que la transmisión de luz se ilustra en la figura 2.6 asumiendo una fibra perfecta, y que cualquier discontinuidad o imperfecciones en la interface núcleo-revestimiento probablemente resultarán en la refracción en lugar de la reflexión total interna, con la consiguiente pérdida del rayo de luz en el revestimiento.

2.4.2. Ángulo de aceptación

Habiendo examinado la propagación de la luz en una fibra óptica mediante la reflexión interna total en la interfaz núcleo-revestimiento, es útil para ampliar sobre el enfoque de la óptica geométrica, con referencia a los rayos de luz que entran en la fibra.

Dado que sólo los rayos con un ángulo de incidencia suficientemente poco profunda (es decir, con un ángulo mayor a la normal, que θ_c) en la interfase núcleo-revestimiento se transmite por reflexión interna total, es evidente que no todos los rayos que entran en el núcleo de la fibra seguirán siendo propagada en toda su longitud.

La geometría de que se trate con el lanzamiento de un rayo de luz en una fibra óptica se muestra en la figura 2.4, que ilustra unos rayos meridionales en el ángulo crítico θ_c dentro de la fibra en la interfase núcleo-revestimiento. Se puede observar que este rayo entra en el núcleo de la fibra a un ángulo θ_a con el eje de la fibra y se refracta en la interfaz de núcleo de

aire antes de la transmisión a la interfaz núcleo-revestimiento en el ángulo crítico.

Por lo tanto, cualquier rayo que es incidente en el núcleo de la fibra en un ángulo mayor que θ_a será transmitida a la interfaz de núcleo-revestimiento en un ángulo de menos de ϕ_c , y no será totalmente reflejada internamente. Esta situación también se ilustra en la figura 2.6, donde el rayo incidente B en un ángulo mayor que θ_a se refracta en el revestimiento y, finalmente, pierde por radiación.

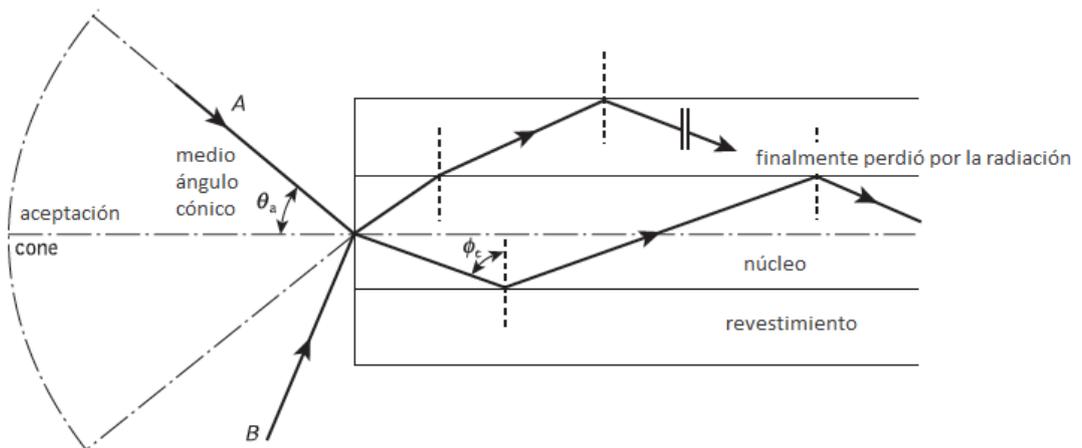


Figura 2. 6: El θ_a ángulo de aceptación al lanzar la luz en una fibra óptica
Fuente: Barnoski, M. (2012).

Así, para los rayos que han de transmitirse por reflexión interna total dentro del núcleo de la fibra deben ser incidente en el núcleo de la fibra dentro de un cono de aceptación definida por el ángulo medio θ_a cónico. Por lo tanto θ_a es el ángulo máximo al eje en el que la luz puede entrar en la fibra con el fin de ser propagado, y se refiere a menudo como el ángulo de

aceptación para la fibra. θ_a se refiere a veces como el ángulo máximo o total aceptación.

Si la fibra tiene una sección transversal regular (es decir, las interfaces de núcleo-revestimiento son paralelos y no hay discontinuidades) un rayo incidente en meridional mayor que el ángulo crítico seguirá siendo reflejada y será transmitida a través de la fibra.

A partir de consideraciones de simetría se puede observar que el ángulo de salida al eje será igual al ángulo de entrada para el rayo, suponiendo que el rayo emerge en un medio de la misma índice de refracción de la que era de entrada.

2.4.3. Apertura numérica.

El ángulo de aceptación para una fibra óptica se define en la sección anterior. Sin embargo, es posible continuar el análisis de la teoría de rayos para obtener una relación entre el ángulo de aceptación y los índices de refracción de los tres medios de comunicación que participan, es decir, el núcleo, el revestimiento y el aire. Esto conduce a la definición de un término más generalmente utilizado, la apertura numérica de la fibra.

Cabe señalar que dentro de este análisis, al igual que con la discusión anterior del ángulo de aceptación, estamos preocupados con los rayos

meridionales dentro de la fibra. La figura 2.5 muestra un incidente de rayos de luz sobre el núcleo de la fibra con un ángulo θ_1 al eje de la fibra, que es menor que el ángulo de aceptación de la θ_a fibra. El rayo entra en la fibra de una

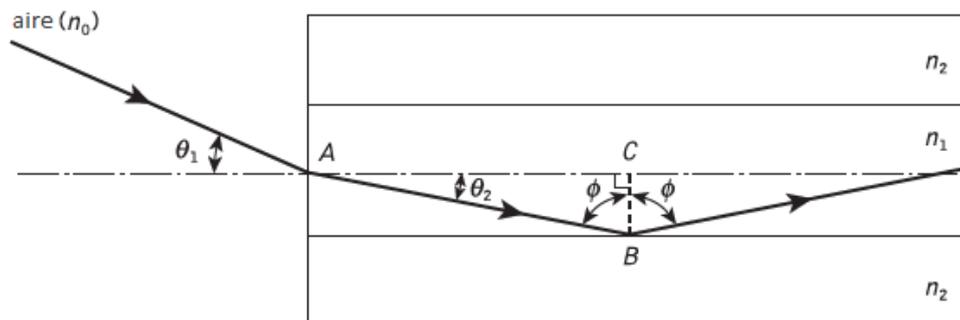


Figura 2. 7: El trayecto de los rayos para un rayo meridional lanzado en una fibra óptica en el aire en un ángulo de entrada menor que el ángulo de aceptación de la fibra

Fuente: Barnoski, M. (2012).

Medio (aire) de n_0 índice de refracción, y el núcleo de fibra tiene un índice de refracción n_1 , que es ligeramente mayor que el revestimiento de refracción n_2 índice. Suponiendo que la cara de entrada en el núcleo de la fibra a ser normal al eje, a continuación, teniendo en cuenta la refracción en la interfase aire-núcleo y usando la ley de Snell dada por la ecuación. (2.1):

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Considerando el triángulo rectángulo ABC indica en la figura 2.5, a continuación:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde ϕ es mayor que el ángulo crítico en la interfase núcleo-revestimiento. Por lo tanto la ecuación (2.3) se convierte en:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \cos \phi \quad \text{Ec. 2.3}$$

Utilizando la relación trigonométrica $\sin^2 \phi + \cos^2 \phi = 1$, la ecuación (2.5) se puede escribir en la forma:

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 (1 - \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Cuando se considera el caso límite para la reflexión interna total, ϕ se vuelve igual al ángulo crítico para la interfaz núcleo-revestimiento y viene dada por la ec. (2.2). También en este caso límite θ_1 se convierte en el ángulo de aceptación para el θ_a fibra. La combinación de estos casos límite en la Ec. (2.6) se obtiene:

$$n_0 \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Desde la AN se utiliza a menudo con la fibra en el aire, donde n_0 es la unidad, que es simplemente igual al ángulo θ_a . También cabe señalar que los incidentes rayos meridionales en el rango $0 \leq \theta_1 \leq \theta_a$ serán propagados dentro de la fibra. La NA también se puede administrar en términos de la relación de refracción Δ diferencia de índice entre el núcleo y el revestimiento que se define como:

$$\Delta = \frac{n^2 - n_2^2}{2 n_2^2} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$\simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{para } \Delta \ll 1 \quad \text{Ec. 2.9}$$

Por lo tanto la combinación de la ecuación. (2,8) con la ecuación. (2.9) se puede escribir:

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Las relaciones dadas en las ecuaciones (2.8) y (2.10) para la apertura numérica son una medida muy útil de la capacidad de recolección de luz de una fibra. Son independientes del diámetro del núcleo de la fibra y sostendrán para diámetros tan pequeños como de 8 micras. Sin embargo, para los diámetros más pequeños se descomponen como el enfoque de la óptica geométrica es válido. Esto es porque el modelo de la teoría de rayos es sólo una descripción parcial del carácter de la luz.

En él se describe la dirección un componente onda plana toma en la fibra, pero no tiene en cuenta la interferencia entre dichos componentes. Cuando se consideran fenómenos de interferencia se encuentra que sólo los rayos con ciertas características discretas se propagan en el núcleo de la fibra.

Así, la fibra sólo apoyará un número discreto de modos guiados. Esto se convierte en crítico en pequeñas fibras de diámetro sin núcleo que sólo

soportan uno o unos pocos modos. Por lo tanto la teoría de modo electromagnético debe ser aplicada en estos casos.

2.4.4. Rayos oblicuos.

En las secciones anteriores hemos considerado la propagación de los rayos meridionales en la guía de onda óptica. Sin embargo, otra categoría de rayos existe el cual se transmite sin pasar por el eje de la fibra. Estos rayos, que son mucho más numerosos que los rayos meridionales,

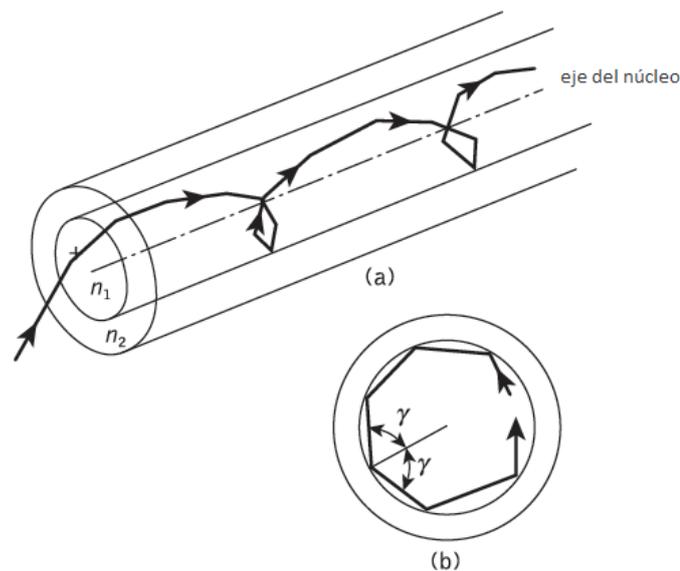


Figura 2. 8: La trayectoria helicoidal tomada por un rayo de inclinación en una fibra óptica: (a) trayectoria del rayo de inclinación hacia abajo la fibra; (b) vista en sección transversal de la fibra

Fuente:

Seguir una trayectoria helicoidal a través de la fibra, como se ilustra en la Figura 2.6, y se llaman rayos oblicuos. No es fácil de visualizar las trayectorias de los rayos oblicuos en dos dimensiones, pero se puede observar en la figura 2.6 (b) que la trayectoria helicoidal trazada a través de la fibra da un cambio en la dirección de 2γ en cada reflexión, donde γ es el

ángulo entre la proyección del rayo en dos dimensiones y el radio del núcleo de fibra en el punto de reflexión.

Por lo tanto, a diferencia de los rayos meridionales, el punto de emergencia de los rayos oblicuos de la fibra en el aire dependerá del número de reflexiones que se someten en lugar de las condiciones de entrada a la fibra. Cuando la entrada de luz a la fibra no es uniforme, sesgar los rayos por lo tanto, tienden a tener un efecto de suavizado de la distribución de la luz a medida que se transmite, dando una salida más uniforme.

La cantidad de suavizado es dependiente en el número de reflexiones encontradas por los rayos oblicuos.

Otra posible ventaja de la transmisión de los rayos oblicuos se hace evidente cuando se consideran sus condiciones de aceptación. Con el fin de calcular el ángulo de aceptación para un rayo de inclinación es necesario para definir la dirección del rayo en dos planos perpendiculares. La geometría de la situación se ilustra en la figura 2.7, donde se muestra un rayo sesgo incide sobre el núcleo de la fibra en el punto A, en un ángulo θ a lo normal en la superficie frontal de fibra.

El rayo se refracta en la interface núcleo de aire antes de viajar al punto B en el mismo plano. Los ángulos de incidencia y reflexión en el punto B son

ϕ , que es mayor que el ángulo crítico para la interfaz de revestimiento de núcleo.

Al considerar el rayo entre A y B es necesario para resolver la dirección de la trayectoria del rayo AB a la radio del núcleo en el punto B . A medida que el rayos incidente y reflejado en el punto B están en el mismo plano, esto es simplemente $\cos \phi$.

Sin embargo, si a través del cual se consideran la trayectoria del rayo AB atraviesa los dos planos perpendiculares, a continuación, γ es el ángulo entre el radio del núcleo y la proyección del rayo sobre un plano BRS normal al eje del núcleo, y θ es el ángulo entre el rayo y una línea de AT trazada paralelamente al eje central. Por lo tanto para resolver la trayectoria del rayo AB relativa a la BR radio en estos dos planos perpendiculares requiere la multiplicación por $\cos \gamma$ y θ pecado.

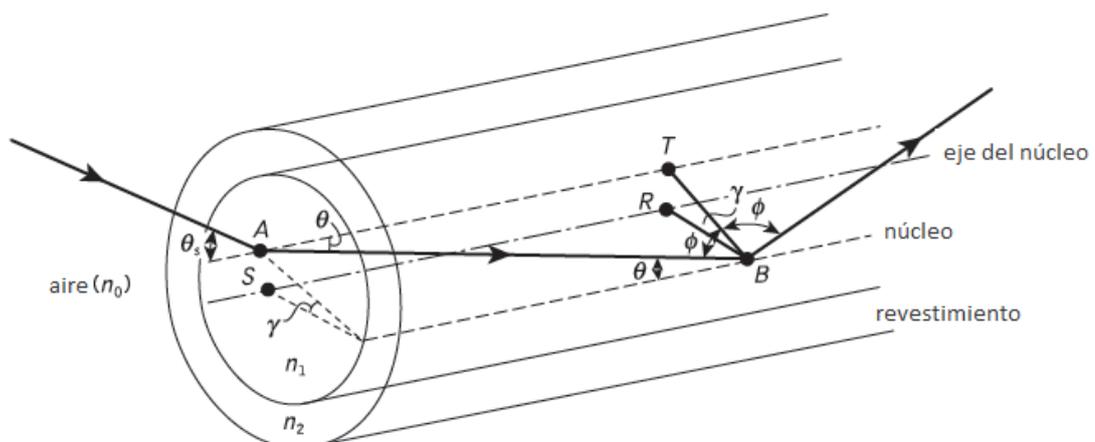


Figura 2. 9: La trayectoria de los rayos dentro del núcleo de la fibra para un rayo incidente en un ángulo de inclinación θ a la normal en la interfaz de núcleo de aire

Fuente: Barnoski, M. (2012).

Por lo tanto, la reflexión en el punto B en un ángulo φ puede ser dada por:

$$\cos \gamma \sin \theta = \cos \varphi \quad \text{Ec. 2.11}$$

Utilizando la relación trigonométrica $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, la ecuación. (2.11) se convierte en:

$$\cos \gamma \sin \theta = \cos \varphi = (1 - \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Si el caso límite para la reflexión interna total se considera ahora, a continuación, φ se hace igual al ángulo crítico φ_c para la interfaz núcleo-revestimiento y, a raíz de la ecuación. (2.2), viene dada por el pecado $\varphi_c = n_2/n_1$. Por lo tanto, la ecuación. (2.12) se puede escribir como:

$$\cos \gamma \sin \theta \leq \cos \varphi_c = \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Además, usando la ley de Snell en el punto A, la ecuación siguiente. (2.1) se puede escribir:

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde θ_a representa el ángulo axial de entrada máxima para los rayos meridionales, tal como se expresa, y θ es el ángulo axial interna. De ahí que la sustitución por el pecado θ de la ecuación. (2.13) en la ecuación. (2.14) se obtiene:

$$\sin \theta_{as} = \frac{n_1 \cos \varphi_c}{n_0 \cos \gamma} = \frac{n_1}{n_0 \cos \gamma} \left(1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde θ_{as} ahora representa el ángulo máximo ángulo de entrada o la aceptación de los rayos oblicuos. Cabe señalar que la desigualdad se muestra en la Ec. (2.13) ya no es necesario que todos los términos de la ecuación. (2.15) se especifican para el caso límite. Así, las condiciones de aceptación de los rayos oblicuos son:

$$n_0 \sin \theta_{as} \cos \gamma = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = NA \quad \text{Ec. 2.16}$$

Y en el caso de la fibra en el aire ($n_0 = 1$):

$$\sin \theta_{as} \cos \gamma = NA \quad \text{Ec. 2.17}$$

Por lo tanto, en comparación con la ecuación. (2.8) que se derivan de los rayos meridionales, cabe señalar que los rayos oblicuos son aceptadas en ángulos axiales más grandes en una fibra dada que los rayos meridionales, dependiendo del valor de $\cos \gamma$. De hecho, para los rayos meridionales $\cos \gamma$ es igual a la unidad y θ_{as} se hace igual a θ_a . Así, aunque θ_a es el ángulo máximo medio cónica para la aceptación de los rayos meridionales, define el ángulo de entrada mínima para los rayos oblicuos.

Por lo tanto, como se puede observar en la Figura 2.6, los rayos oblicuos tienden a propagar sólo en la región anular cerca de la superficie exterior del núcleo, y no utilizan plenamente el núcleo como medio de

transmisión. Sin embargo, son complementarias a los rayos meridionales y aumentar la capacidad de recolección de luz de la fibra.

Este aumento de la capacidad de recolección de luz puede ser importante para las grandes fibras de NA , pero para la mayoría de los fines de diseño de comunicación las expresiones dadas en las ecuaciones (2.8) y (2.10) para los rayos meridionales se considera adecuado.

2.5. Fibras monomodo

La ventaja de la propagación de un solo modo dentro de una fibra óptica es que la dispersión de la señal causada por las diferencias de retardo entre los diferentes modos en una fibra multimodo puede ser evitado. Fibras de salto de índice multimodo no se prestan a la propagación de un solo modo debido a las dificultades de mantener el funcionamiento monomodo dentro de la fibra cuando la conversión de modo (es decir, acoplamiento) a otros modos guiados tiene lugar en ambos desajustes de entrada y las imperfecciones de la fibra.

Por lo tanto, para la transmisión de un único modo de la fibra debe estar diseñado para permitir la propagación de un solo modo, mientras que todos los otros modos son atenuados por la fuga o absorción. Siguiendo la discusión precedente de las fibras multimodo, esto puede conseguirse mediante la elección de una frecuencia normalizada adecuado para la fibra.

Para la operación de modo único, sólo puede existir el modo LP01 fundamental.

Por lo tanto el límite de operación de modo único depende del límite inferior de la propagación guiada para el modo LP11. La frecuencia normalizada de corte para el modo LP11 en las fibras de salto de índice se produce en $V_c = 2,405$. De este modo la propagación monomodo del modo LP01 en las fibras de índice de paso es posible en el rango:

$$0 \leq V < 2.405$$

Ya que no hay punto de corte para el modo fundamental. Debe tenerse en cuenta que de hecho hay dos modos con polarización ortogonal más de este rango, y el término de modo único se aplica a la propagación de la luz de una polarización particular.

Otro enfoque para el diseño de fibra de modo único que permite que el valor de V que se incrementa por encima de 2.405 sea la fibra W . El perfil de índice de refracción para esta fibra se ilustra en la figura 2.29 donde se pueden observar dos regiones de revestimiento.

El uso de tal revestimiento de dos etapas permite que el umbral de pérdidas entre los modos deseables y no deseables que se incrementa sustancialmente. El modo fundamental será completamente compatible con

pequeña pérdida revestimiento cuando su constante de propagación se encuentra en el rango $Kn_3 < \beta < kn_1$.

Si los modos de orden superior indeseables están entusiasmados o convertido a tener valores de β constante de propagación $< Kn_3$, se filtran a través de la capa de barrera entre a_1 y a_2 (véase la figura 2.10) en la región del revestimiento exterior n_3 . En consecuencia estos modos perderán poder por radiación en los alrededores con pérdidas.

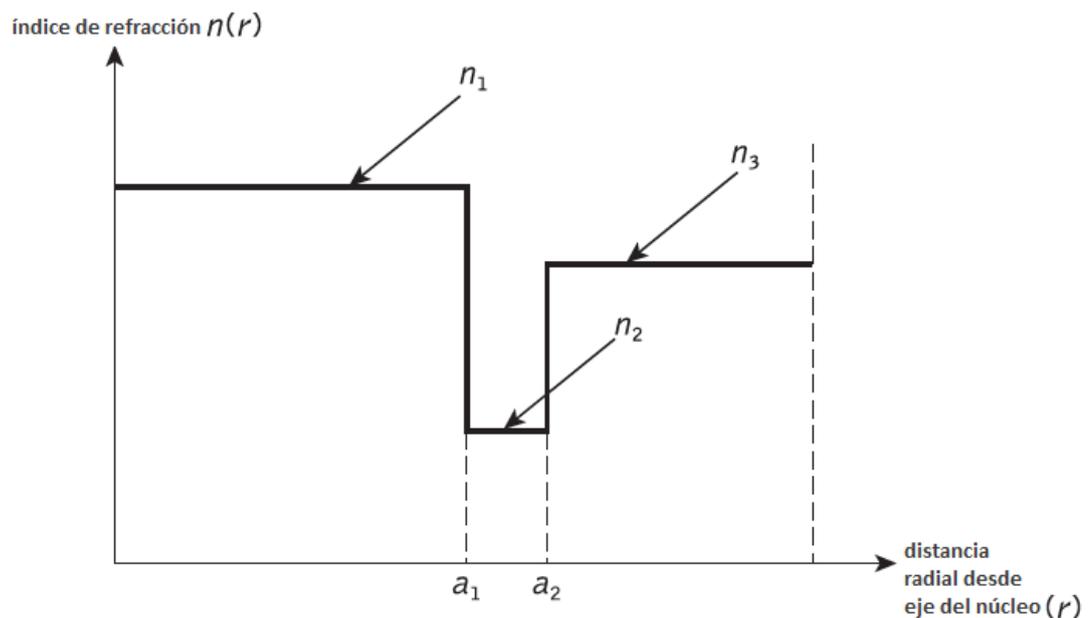


Figura 2. 10: El perfil de índice de refracción para un W fibra monomodo
Fuente: Barnoski, M. (Ed.). (2012).

Este diseño puede proporcionar fibras monomodo con grandes diámetros de núcleo que puede el enfoque de un solo revestimiento convencional que resulta útil para aliviar las dificultades de unión; Fibras W también tienden a dar pérdidas reducidas en los dobleces en comparación con las fibras monomodo convencionales.

A raíz de la aparición de las fibras monomodo como medio de comunicación viable en 1983, rápidamente se convirtió en la dominante y el tipo de fibra más utilizado dentro de las telecomunicaciones * Las principales razones de esta situación son las siguientes:

- A. Exhiben los mayores anchos de banda de transmisión y las pérdidas más bajas de los medios de transmisión de fibra.
- B. Tienen una calidad de transmisión superior sobre otros tipos de fibras, debido a la ausencia de ruido modal
- C. Ofrecen una capacidad de actualización sustancial (es decir, el futuro de pruebas) para futuros servicios de ancho de banda ancha utilizando cualquiera de los transmisores y receptores ópticos más rápido o técnicas de transmisión avanzadas (por ejemplo, la tecnología coherente).
- D. Son compatibles con la tecnología de óptica integrada en desarrollo.
- E. Las razones anteriores 1 a 4 proporcionan la confianza de que la instalación de fibra de modo único proporcionará un medio de transmisión que tendrá un rendimiento adecuado de tal manera que no requerirá el reemplazo lo largo de su vida útil esperada de más de 20 años.

Fibras monomodo ampliamente desplegadas emplean un índice de paso (o el índice de paso cerca) diseño de perfil y son dispersión optimizada (denominado fibras monomodo como estándar, para una operación en la región de 1,3 micras de longitud de onda.

Estas fibras son o bien diseñadas con revestimiento emparejado (MC) o revestimiento reprimido (DC), tal como se ilustra en la figura 2.11. En las fibras MC convencionales, la región externa para el núcleo tiene un índice de refracción uniforme constante que es ligeramente inferior a la región del núcleo, por lo general consiste en sílice pura.

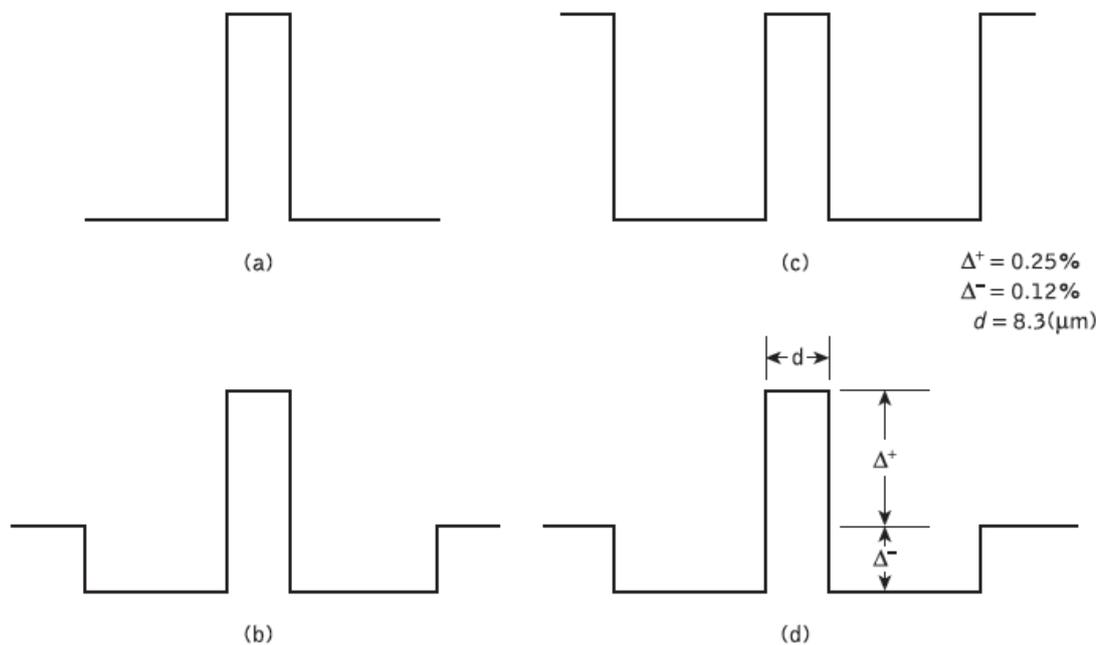


Figura 2. 11: Perfiles de salto de índice de fibra monomodo optimizados para funcionar a una longitud de onda de 1.3 micras: (a) diseño de revestimiento combinado convencional; (b) segmentado núcleo diseño revestimiento emparejado; (c) el diseño deprimida-revestimiento; especificaciones (d) del perfil de una fibra deprimida-revestimiento

Fuente: Senior, J. M. (2009).

Alternativamente, cuando la región del núcleo comprende sílice puro, entonces el revestimiento de índice más bajo se obtiene a través de dopado con flúor. Un diámetro modo de campo (MFD) de 10 micras es típico de fibras MC con diferencias de índice de refracción relativos de alrededor de 0.3%.

Sin embargo, la mejora del rendimiento de la pérdida de curvatura se ha logrado en la región de 1.55 micras de longitud de onda con la reducción de equipos multifuncionales de alrededor de 9.5 micras y relativas diferencias de índice de refracción de 0.37%.

Un diseño alternativo de fibra MC emplea un núcleo segmentado como se muestra en la figura 2.10 (b). Dicha estructura proporciona un rendimiento estándar dispersión optimizada de modo único a longitudes de onda alrededor de 1.3 micras pero es multimodo con unos pocos modos (dos o tres) en la región de longitud de onda más corta alrededor de 0.8 micras.

La región de operación multimodo está destinada para ayudar a relajar tanto las estrechas tolerancias que tienen lugar cuando el acoplamiento de LEDs para fibras monomodo tales y su conectorización.

Así fibra de núcleo segmentado de este tipo ofrece para aplicaciones que requieren una solución inicial barato pero la capacidad de actualización de rendimiento estándar de fibra de modo único en la longitud de onda de 1.3 micras en el futuro.

En las fibras de CC mostrados en la figura 2.11 la región de revestimiento inmediatamente adyacente al núcleo es de un índice de refracción menor que el de una región de revestimiento exterior. A MFD

típica de una fibra de DC es 9 m con diferencias de refracción relativos positivos y negativos de índice de 0,25% y 0,12% (véase la figura 2.11 (d)).

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES OPTICOS.

En el presente capítulo se realizan los escenarios de simulación de amplificadores ópticos cuya función es de suma importancia en las comunicaciones ópticas.

3.1. Escenario de Simulación 1: Conceptos básicos EDFA.

En esta sección se desarrolla la simulación básica de amplificadores EDFAs, cuya caracterización es la de un amplificador de fibra dopada con erbio. Se consideró tres versiones de diseño a saber, (a) de ancho de banda de ganancia del espectro (b) Ganancia de saturación y (c) Amplificador de ruido. Estos permiten la caracterización de la ganancia, la figura de ruido y potencia de salida bajo el régimen de entrada de señal no saturada y saturada. Estas versiones se refieren a los temas: (a) ganancia de espectro y ancho de banda, ganancia de saturación, y amplificador de ruido, respectivamente.

En estos ejemplos, el rendimiento del amplificador se caracteriza mediante el uso de barridos para los parámetros de entrada del amplificador. Las versiones de ganancia de espectro-ancho de banda y del amplificador de ruido, barren la longitud de onda de la señal, mientras que la versión de ganancia de saturación barre la potencia de entrada para los casos: potencia de la señal de entrada pequeña (-30 dBm) y la potencia de la señal de entrada saturada (0 dBm).

Las tres versiones creadas en este escenario de amplificadores EDFA se muestran en la figura 3.1. El diseño básico que se utiliza en cada versión considera disposición del escenario de fibra dopada con erbio en un esquema de co-propagación. El modelo EDFA fue utilizado en esta simulación. Una señal de entrada individual con señal de entrada pequeña y grande que operan en el rango de longitud de onda de banda C se encuentra en el láser.

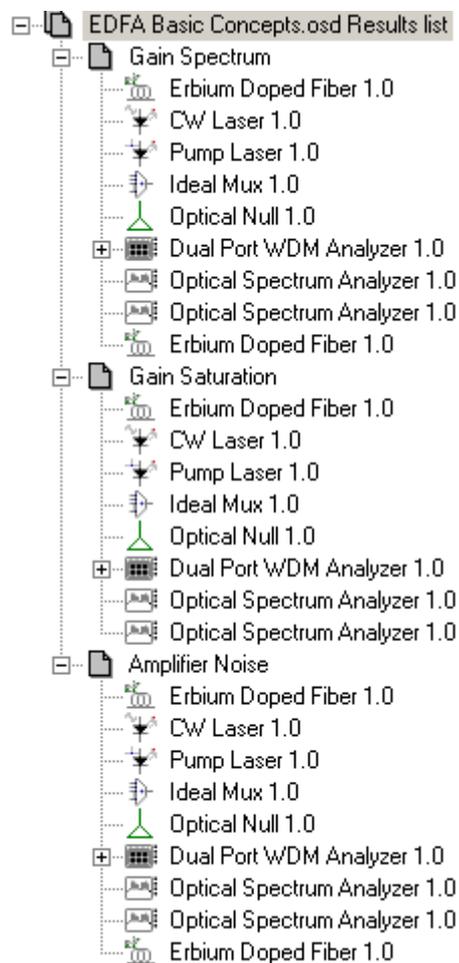


Figura 3. 1: Tres versiones diferentes creadas en este archivo de proyecto
Elaborada por: El Autor.

Para cada versión de diseño se ha trazado tres gráficos que muestran la señal de salida de potencia, ganancia y cifra de ruido (*Noise Figure*); como

una función del parámetro de barrido. En este escenario, la configuración de los componentes pueden ser modificados y las simulaciones se pueden repetir las veces que sean necesarias, con la finalidad de analizar el rendimiento del amplificador.

Los gráficos que caracterizan el rendimiento del amplificador, tales como ganancia, cifra de ruido y potencia de salida como una función de los diferentes parámetros de barrido se muestran en la figura 3.2.

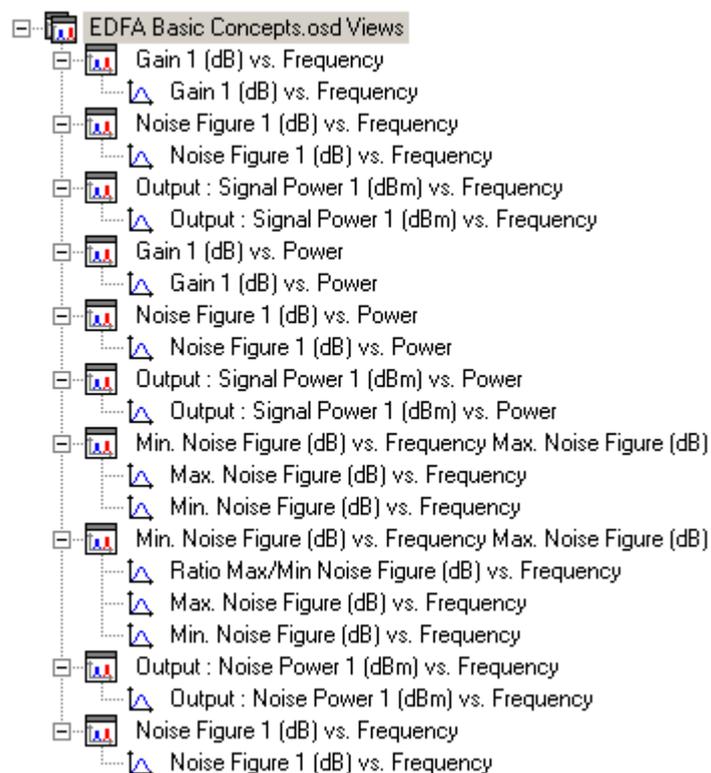


Figura 3. 2: Listado de los gráficos disponibles en docker view.
Elaborada por: Autor.

Los mismos gráficos visualizados en *view* también se enumeran en los gráficos docker junto con gráficos adicionales tal como se muestra en la figura 3.3.

La sección transversal de absorción y emisión, y los parámetros de entrada son fundamentales en la solución numérica de velocidad acoplada y ecuaciones de propagación, son mostradas en el componente de fibra dopada de Erblio. La ganancia y la cifra de ruido se calculan utilizando los resultados de potencia. La figura 3.4 muestra el archivo de sección transversal utilizada en este proyecto.

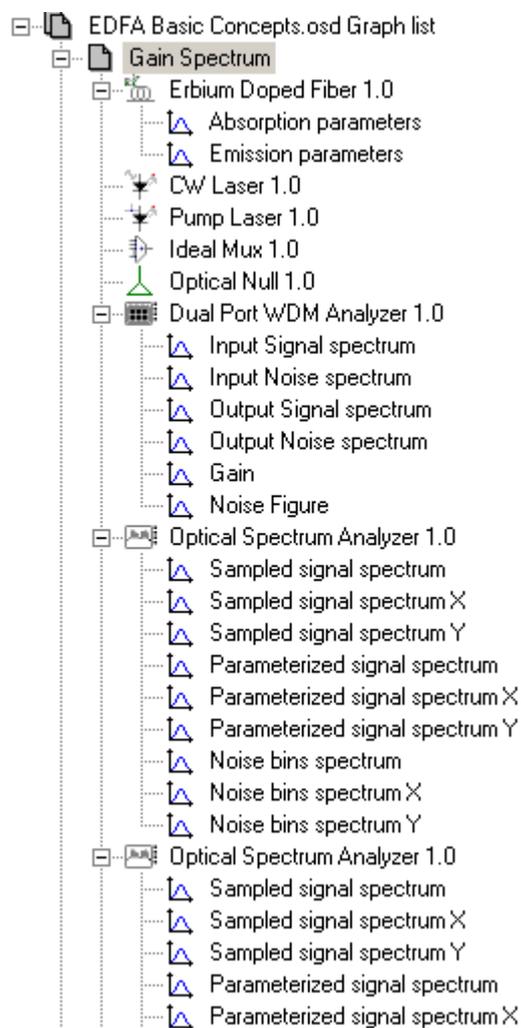


Figura 3. 3: Listado de gráficos adicionales que muestran los resultados.
Elaborada por: Autor.

Los archivos de entrada de secciones transversales son característicos para una fibra específica, así como las dimensiones de las fibras (véase la

tabla 3.1). Sin embargo, es interesante cambiar las propiedades de la fibra con el fin de evaluar las modificaciones en los resultados obtenidos.

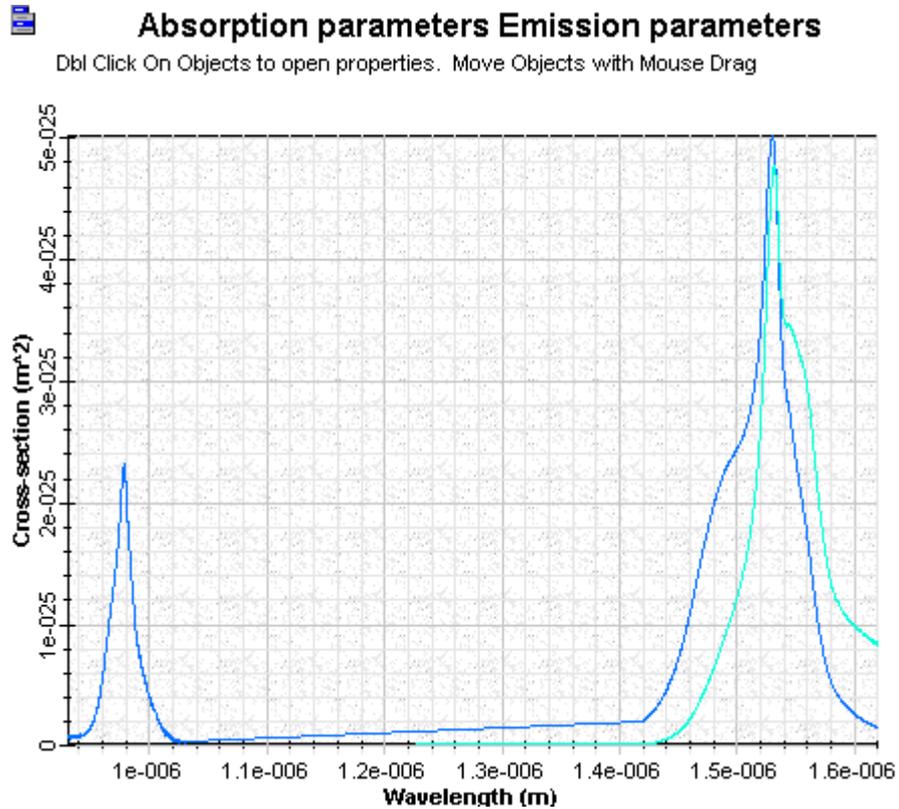


Figura 3. 4: Archivo de la sección transversal representada en gráficos de componentes de fibra dopada con erbio
Elaborada por: Autor.

Tabla 3. 1: Propiedades de la fibra dopada de Erbio.

Erbium Doped Fiber 1.0 Properties				
Label: Erbium Doped Fiber 1.0		Cost\$: 0.00	OK	
Main		Cross-sections	Numerical	Simulation
		Noise	Random numbers	
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Core radius	2.2	um	Normal
<input type="checkbox"/>	Er doping radius	2.2	um	Normal
<input type="checkbox"/>	Er metastable lifetime	10	ms	Normal
<input type="checkbox"/>	Numerical aperture	0.24		Normal
<input type="checkbox"/>	Er ion density	1e+025	m ⁻³	Normal
<input type="checkbox"/>	Loss at 1550 nm	0.1	dB/cm	Normal
<input type="checkbox"/>	Loss at 980 nm	0.15	dB/cm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	10	m	Normal

Cancel
Verify Scripts

Elaborada por: Autor.

El diseño básico utilizado en los cálculos para cada versión se muestra en la figura. 3.5.

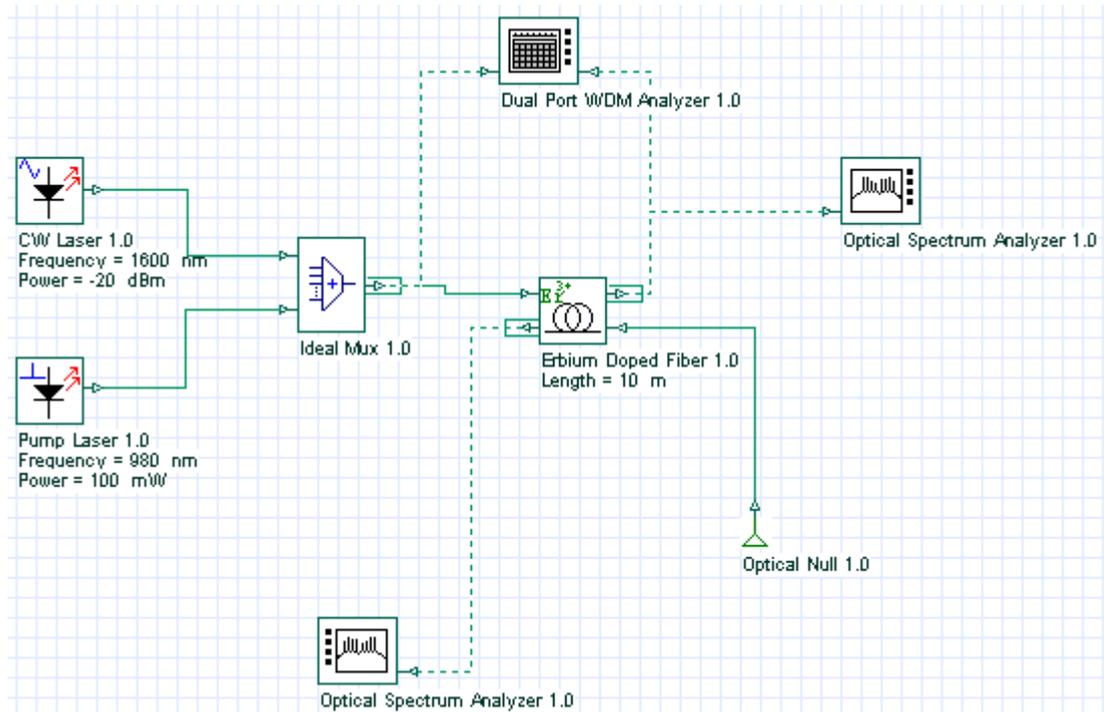


Figura 3. 5: Primer escenario de simulación para amplificadores ópticos EDFA.
Elaborada por: Autor.

3.1.1. Ganancia de Espectro.

En esta primera versión llamado *Gain Spectrum* la longitud de onda de señal de la señal de láser CW es barrido entre 1525 nm a 1600 nm, lo que permite la evaluación de la ganancia espectral y el ancho de banda del amplificador. La ganancia espectral se calcula para muestras de potencias de señales de entrada igual -20 dBm (véase la figura 3.6).

A través de una gráfica adicional se puede comprobar que la versión de ganancia de espectro, sería la potencia de salida frente a la longitud de onda de la señal tal como se muestra en la figura 3.7.



Gain 1 (dB) vs. Frequency

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

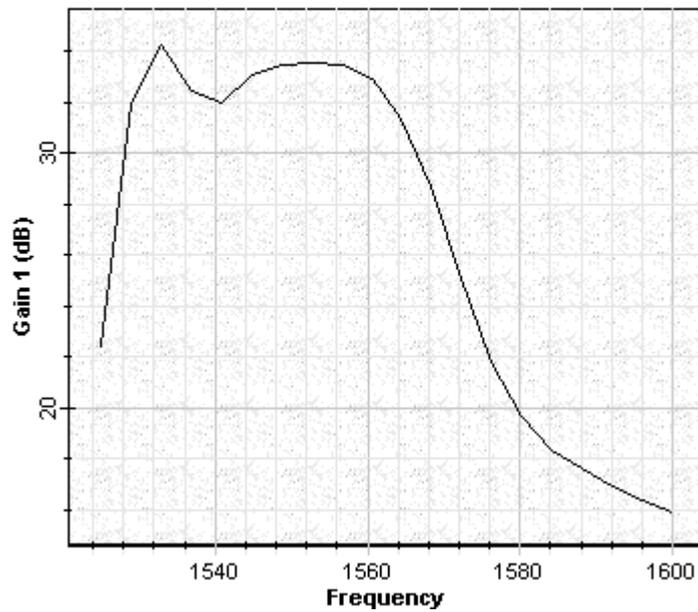


Figura 3. 6: Ganancia vs señal de onda dada en [nm] considerando la potencia de señal de entrada igual a $\approx 20 \text{ dBm}$
Elaborada por: Autor.



Output : Signal Power 1 (dBm) vs. Frequency

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

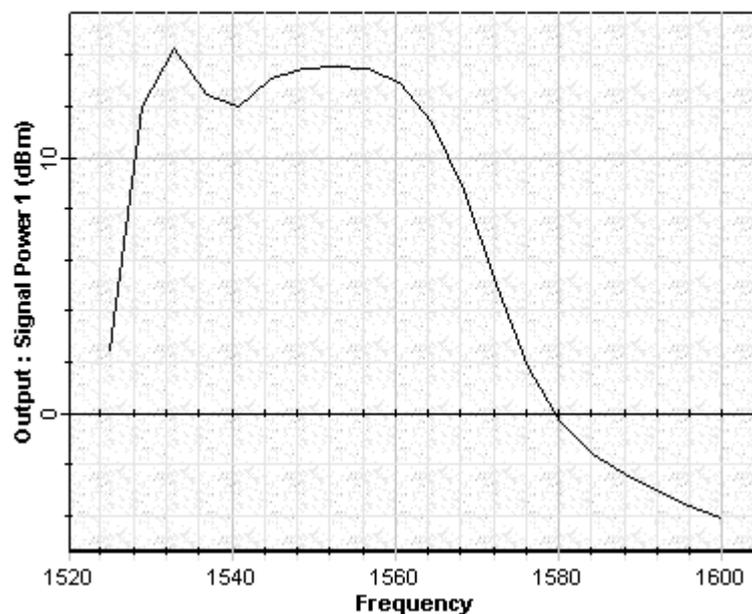


Figura 3. 7: Potencia de salida de la señal vs señal de onda dada en [nm] considerando la potencia de señal de entrada igual a $\approx 20 \text{ dBm}$
Elaborada por: Autor.

3.1.2. Ganancia de Saturación

La versión de ganancia saturación, permite evaluar el rendimiento del amplificador en función de la potencia de la señal de entrada. La potencia de la señal de entrada es barrido de pequeña señal para el régimen de gran señal, es decir, -40 dBm a 0 dBm . El rendimiento del amplificador en términos de ganancia, potencia de salida y cifra de ruido se muestran en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10, respectivamente.

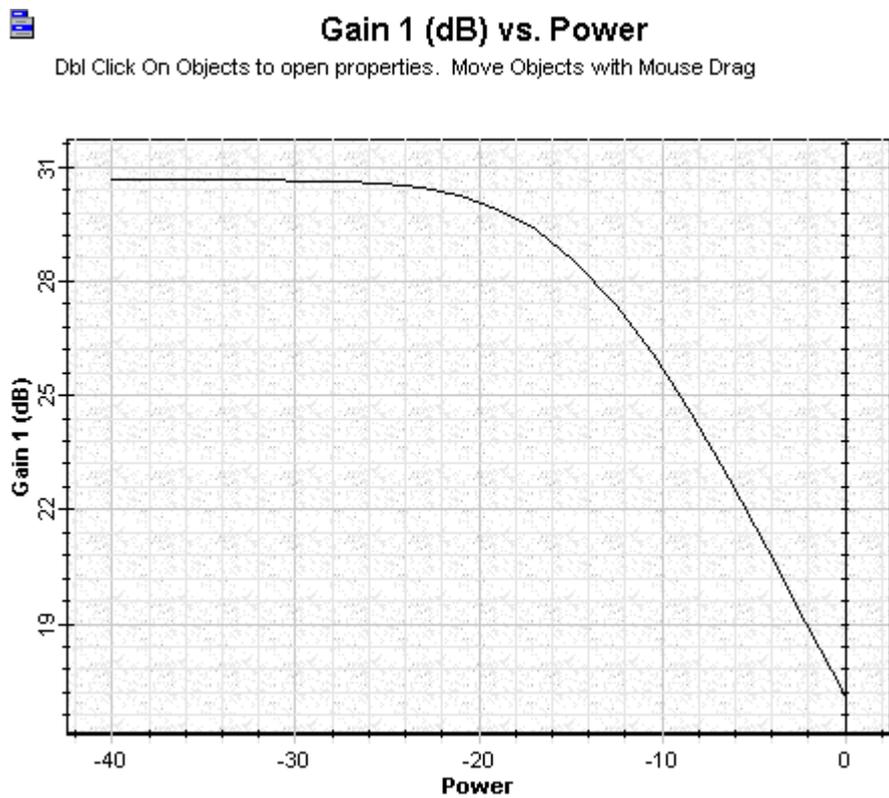


Figura 3. 8: Ganancia vs potencia de la señal de entrada.
Elaborada por: Autor.



Output : Signal Power 1 (dBm) vs. Power

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

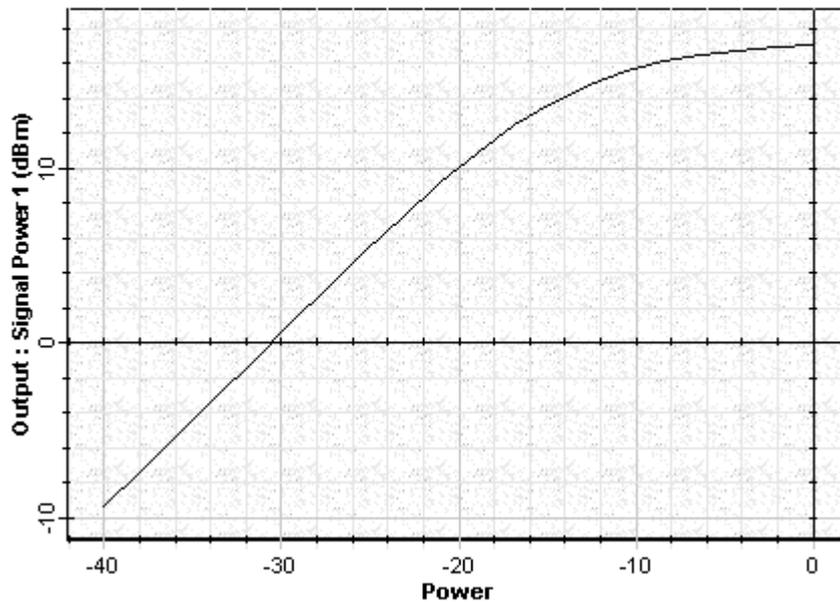


Figura 3. 9: Señal amplificada vs potencia de la señal de entrada.
Elaborada por: Autor.



Noise Figure 1 (dB) vs. Power

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

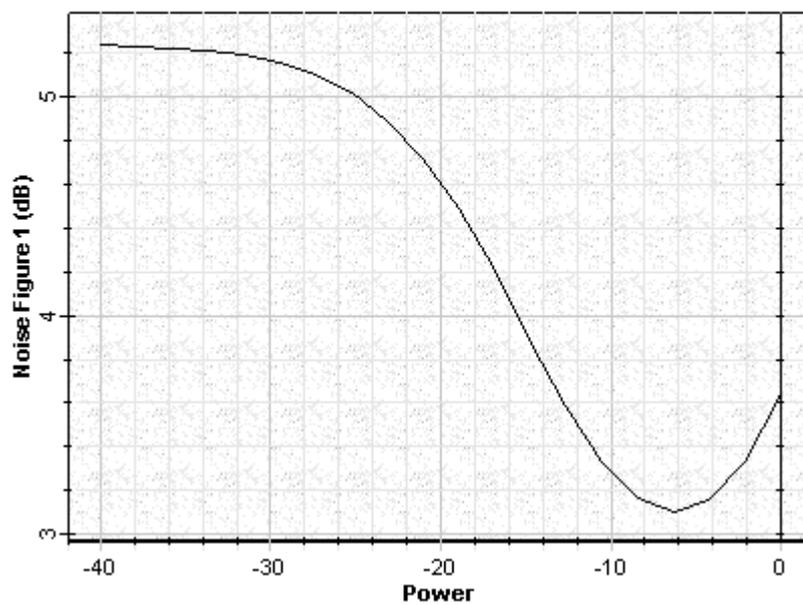


Figura 3. 10: Cifra de ruido vs potencia de la señal de entrada.
Elaborada por: Autor.

3.1.3. Amplificador de ruido

La longitud de onda de la señal, es el parámetro de barrido en esta versión, que permite calcular el ruido espectral del amplificador. La cifra de ruido en comparación con la longitud de onda de señales agrupadas en el divisor View se muestra en la figura 3.11. La longitud de onda de señal y de bombeo, así como los parámetros de la fibra se pueden cambiar para una evaluación adicional del rendimiento del amplificador.

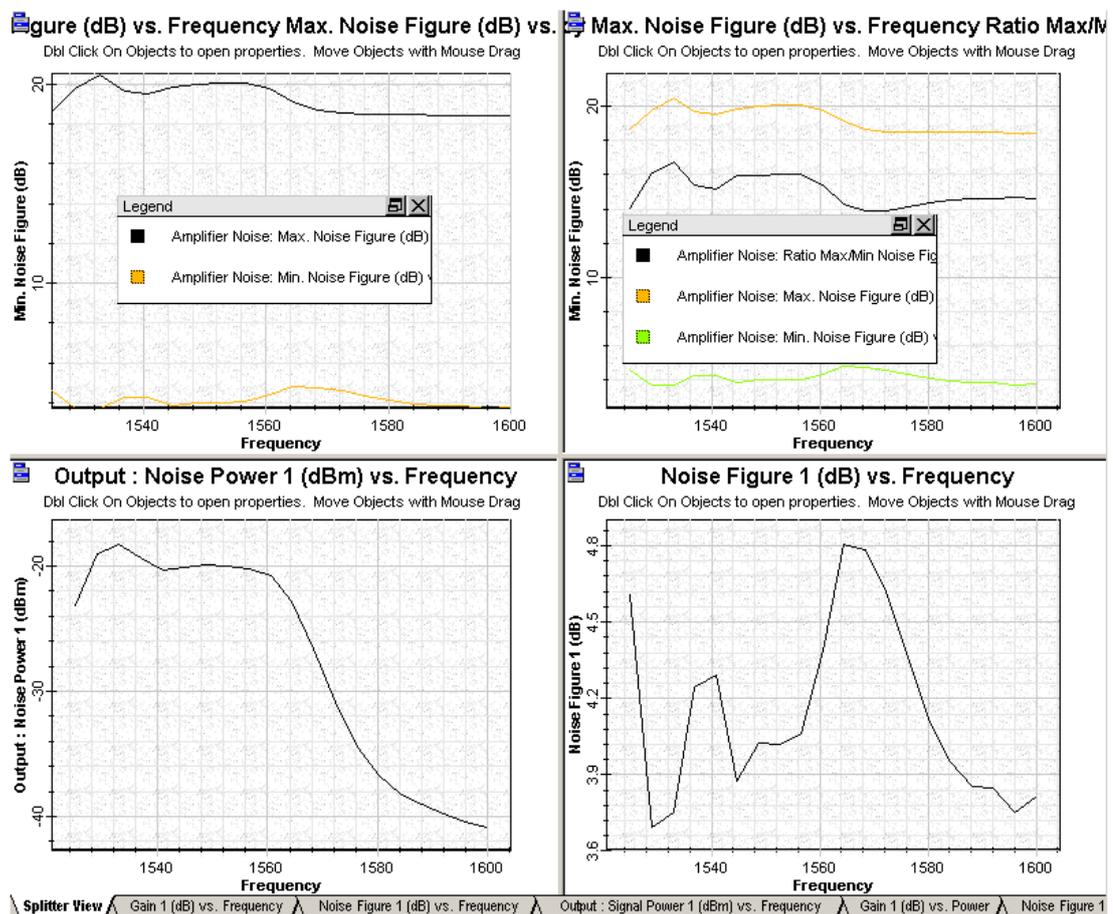


Figura 3. 11: Caracterización ruido del amplificador presenta en vista divisor
Elaborada por: Autor.

La figura 3.12 muestra el espectro de la emisión espontanea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission, ASE*) almacenado después de calcular cada iteración de la longitud de onda de la señal.



Noise bins spectrum

Dbl Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

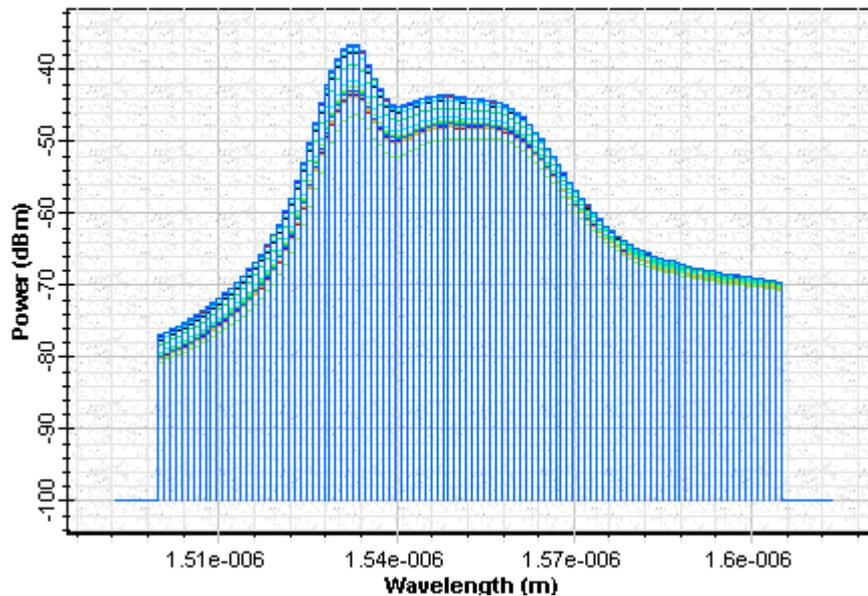


Figura 3. 12: Espectro de ruido como función de la longitud de onda, cada curva en este gráfico es el resultado de las diferentes iteraciones.

Elaborada por: El Autor.

3.2. Escenario de Simulación 2: Amplificador Booster

El archivo del segundo escenario "Amplificador_Booster.osd" muestra la caracterización de una configuración del amplificador Booster/Potencia en una sola fibra con erbio fuertemente dopada, bidireccionalmente bombeado por dos láseres de bombeo de 980 nm. En este caso, se considera la gran potencia de la señal de entrada debido a que la potencia de entrada de gran señal contribuye a obtener alta potencia de salida, que es un requisito para amplificadores Booster. Como consecuencia, se observó en este caso una ganancia moderada.

El requerimiento de la cifra de ruido (*Noise Figure, NF*) baja para EDFAs no es tan fuerte aquí, donde un aumento de NF se puede tolerar. Es importante mencionar que las configuraciones típicas de los amplificadores Booster incluyen múltiples etapas de fibra dopados con Erblio. La figura 3.13 muestra la disposición del amplificador Booster. El bombeo bidireccional se utiliza para producir el esquema típico de bombeo observado en los amplificadores Booster.

El analizador de espectro óptico conectado al puerto de salida 1, muestra la señal amplificada obtenida después de ejecutar este segundo escenario. El componente de doble puerto del analizador WDM proporciona los resultados calculados efectuados a todas las señales de propagación y de bombeo.

Las potencia de salida, la ganancia y la cifra de ruido son calculados como una función de la potencia de la señal de entrada se muestran en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16, respectivamente. Es posible observar la ganancia que se comprime como una función de la señal de entrada creciente, tal como se muestra en la figura 3.15.

La curva de la cifra de ruido se calcula mediante el barrido de la potencia de la señal de entrada al amplificador Booster asumiendo parámetros de entrada idénticos. Hay una región en la curva donde NF es minimizada como una función de la señal de entrada.

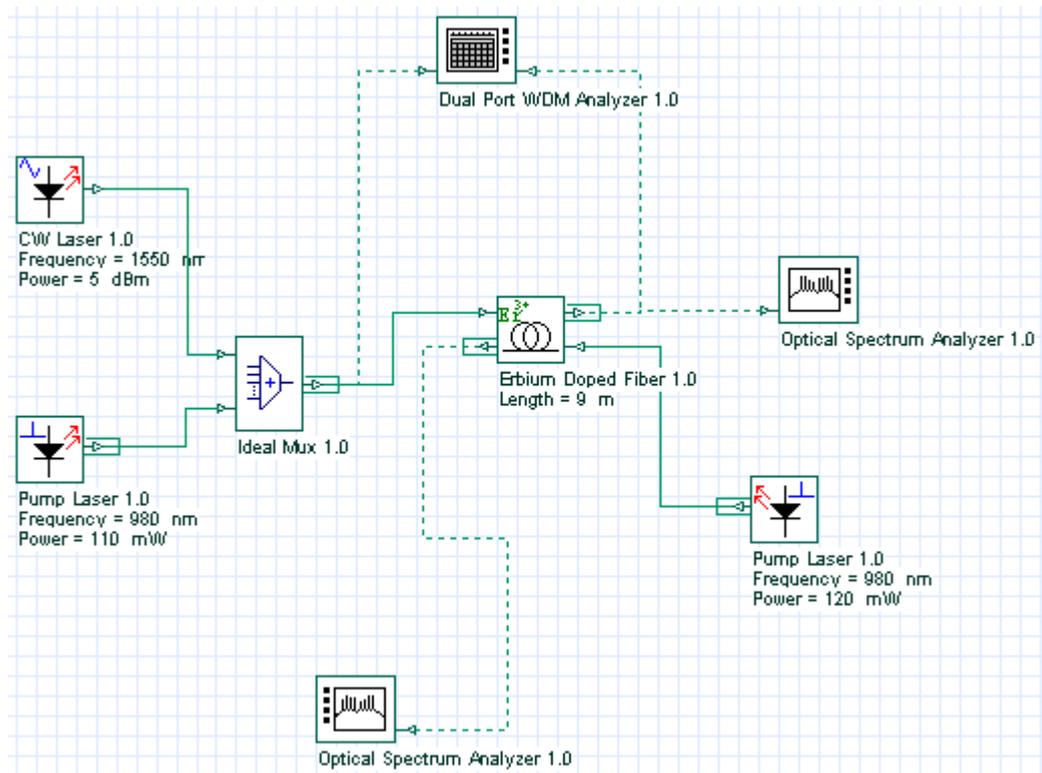


Figura 3. 13: Simulación del amplificador Booster.
Elaborada por: El Autor.



Output : Signal Power 1 (dBm) vs. Power

Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

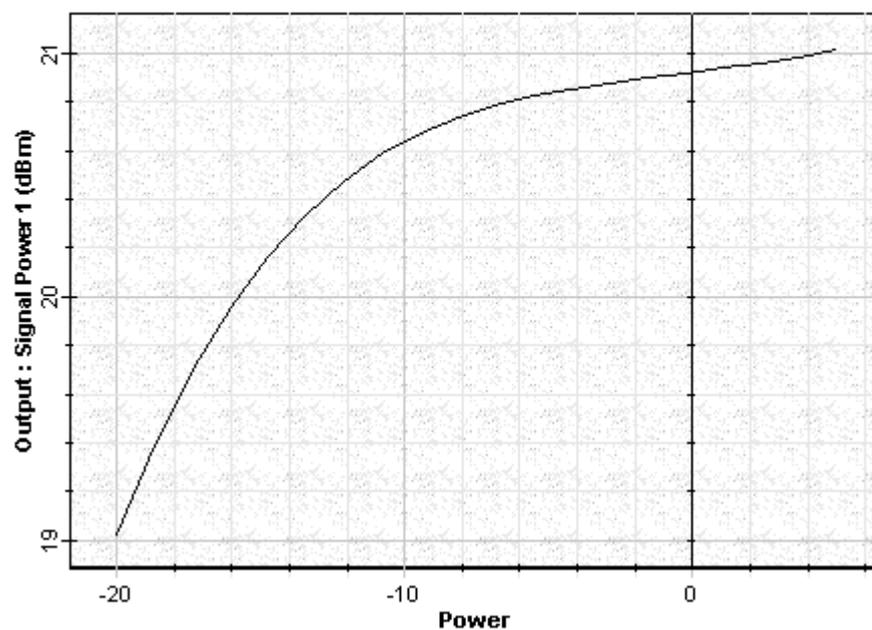


Figura 3. 14: Potencia de salida vs potencia de entrada.
Elaborada por: El Autor.



Gain 1 (dB) vs. Power

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

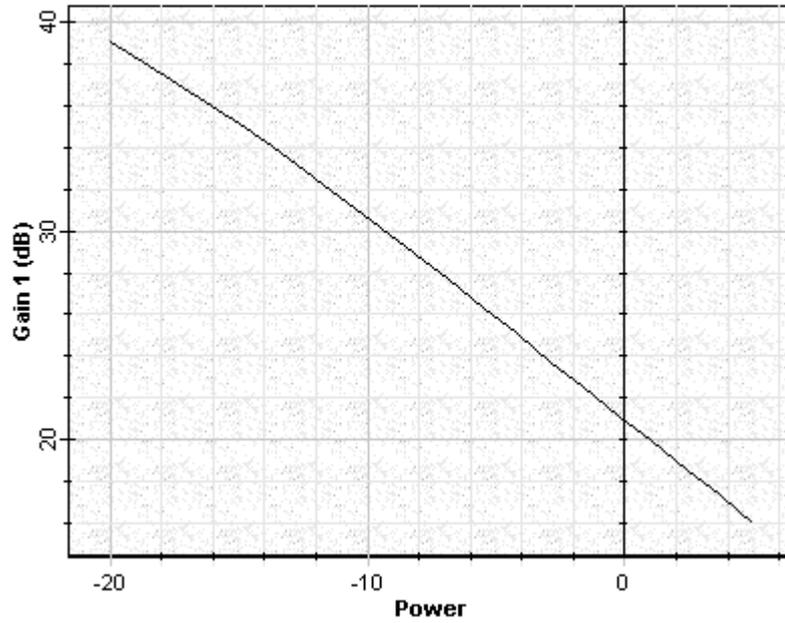


Figura 3. 15: Ganancia vs potencia de la señal de entrada.
Elaborada por: El Autor.



Noise Figure 1 (dB) vs. Power

Db1 Click On Objects to open properties. Move Objects with Mouse Drag

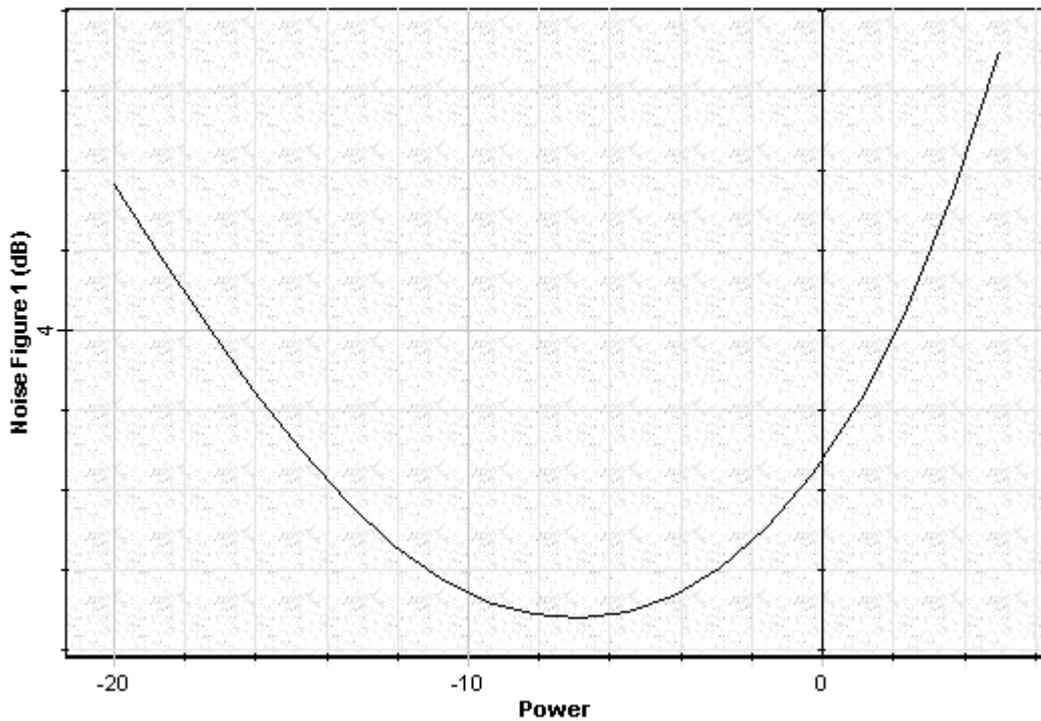


Figura 3. 16: Cifra de ruido (NS) vs potencia de la señal de entrada.
Elaborada por: El Autor.

El poder de los dos láseres de bombeo, co- y contra-propagación, así como la longitud de la fibra dopada con Erblio pueden ser modificados. Las especificaciones de la fibra también se pueden modificar y los resultados pueden ser comparados con el caso anterior.

3.3. Escenario de Simulación 3: Amplificado In-Line (en línea)

El archivo del tercer escenario "Amplificador_In-Line.osd" muestra la caracterización de una configuración de amplificador In-Line en una sola etapa de fibra dopada con erbio, bombeado por un láser de bombeo de 980 nm.

En este escenario, la pequeña potencia de entrada se considera para obtener una alta ganancia y valores pequeños de cifra de ruido. La potencia de la señal de entrada es barrida en - 40 dBm a -20 dBm, lo que permite el control de la ganancia, de cifra de ruido, de la potencia de salida y la relación señal/ruido ópticos (*Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR*) como una función de la potencia de la señal de entrada.

Después del barrido de iteraciones sobre la potencia de entrada, el rendimiento del amplificador puede comprobarse en los gráficos mostrados sobre View, tal como se ilustra en la figura 3.17.

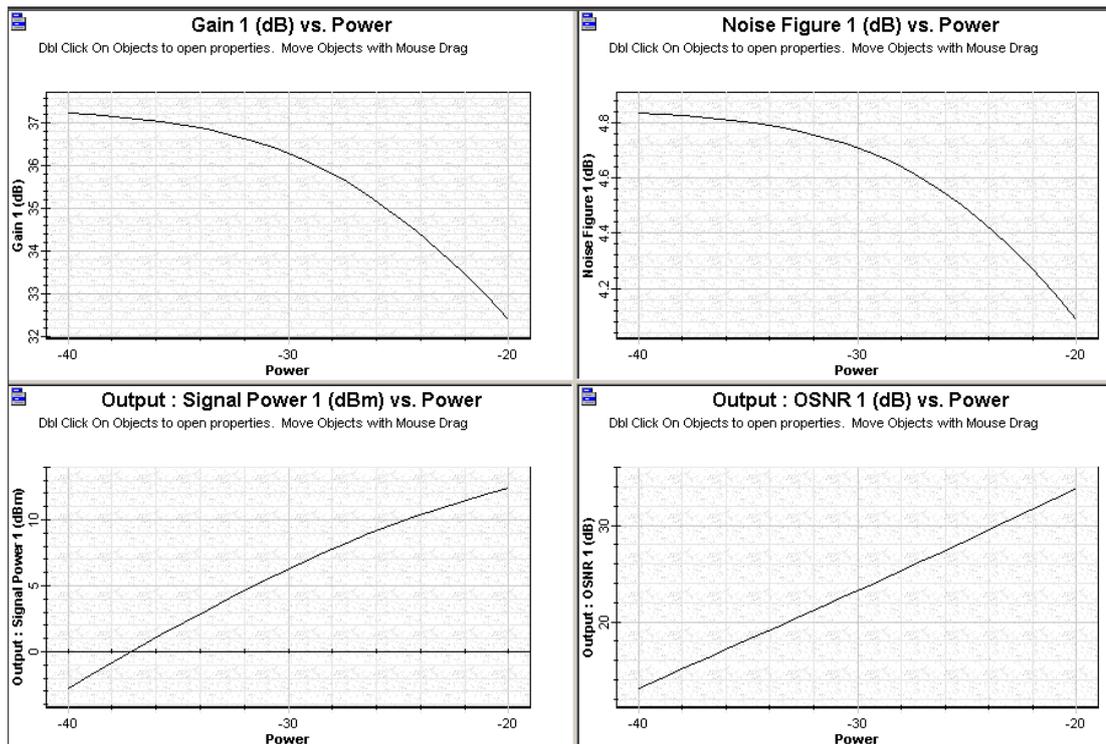


Figura 3. 17: Gráficas que representan la configuración de rendimiento del amplificador In-Line en un esquema de co-propagación de bombeo.
Elaborada por: El Autor.

Dos esquemas de bombeos diferentes, que consideran bombeos de co- y contra-propagación están disponibles en las versiones “*Co-pump power*” y “*Counter-pump power*” para las simulaciones que se muestran en las figuras 3.18 y 3.19, respectivamente.

El rendimiento del amplificador In-Line relacionada con los esquemas de bombeos de co- y contra-propagación se pueden ver en los gráficos de la ganancia, de cifra de ruido y potencia de salida que se muestra en "View".

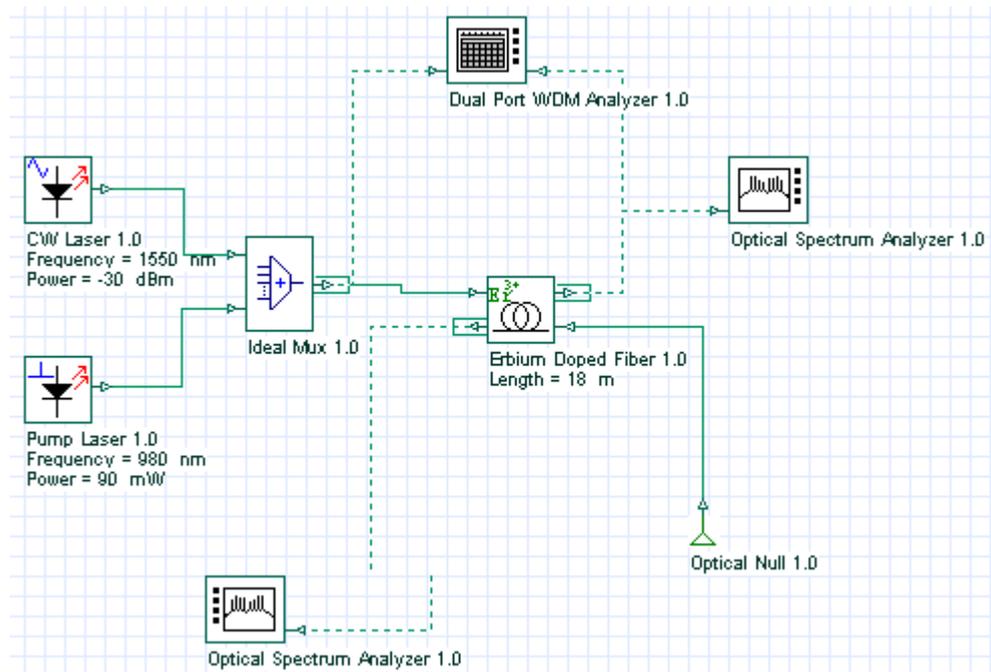


Figura 3. 18: Simulación del amplificador In-Line con esquema de bombeo de co-propagación.
Elaborada por: El Autor.

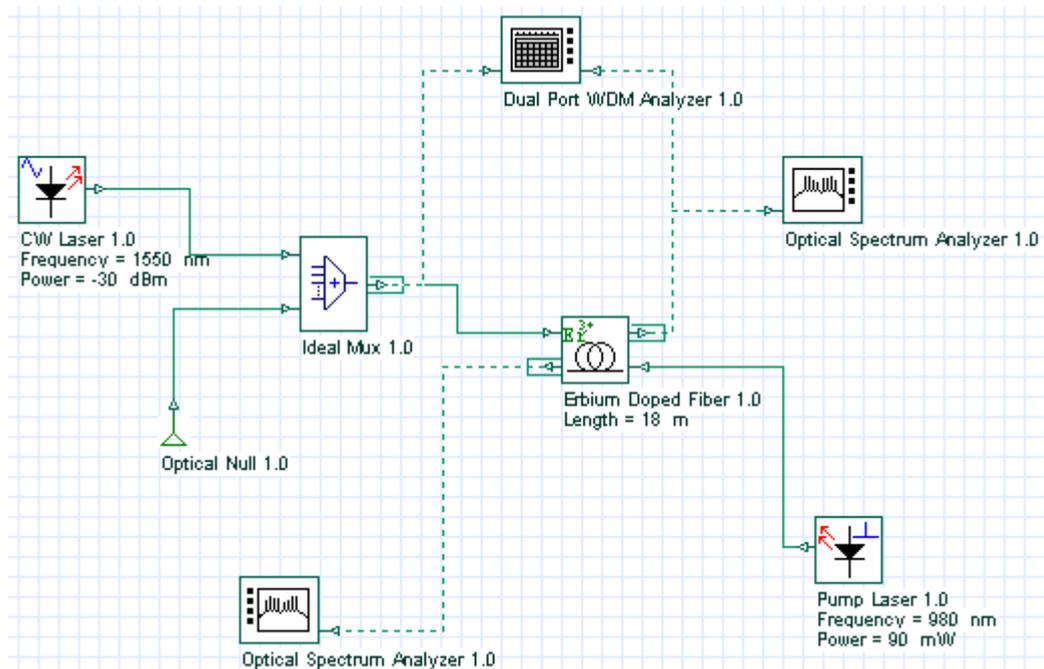


Figura 3. 19: Simulación del amplificador In-Line con esquema de bombeo de contra-propagación.
Elaborada por: El Autor.

El rendimiento del amplificador en el caso de los sistemas de bombeo de co-propagación y contra-propagación pueden ser comparados a través de gráficos disponibles en View, en la cual la longitud de onda de bombeo es igual a 980 nm la cual se considera en ambos casos. La ganancia en función de potencia de bombeo se muestra en la figura 3.20 teniendo en cuenta a los esquemas de bombeos de co-propagación y contra-propagación, que permiten evaluar los esquemas de bombeo más eficientes de la EDFAs.

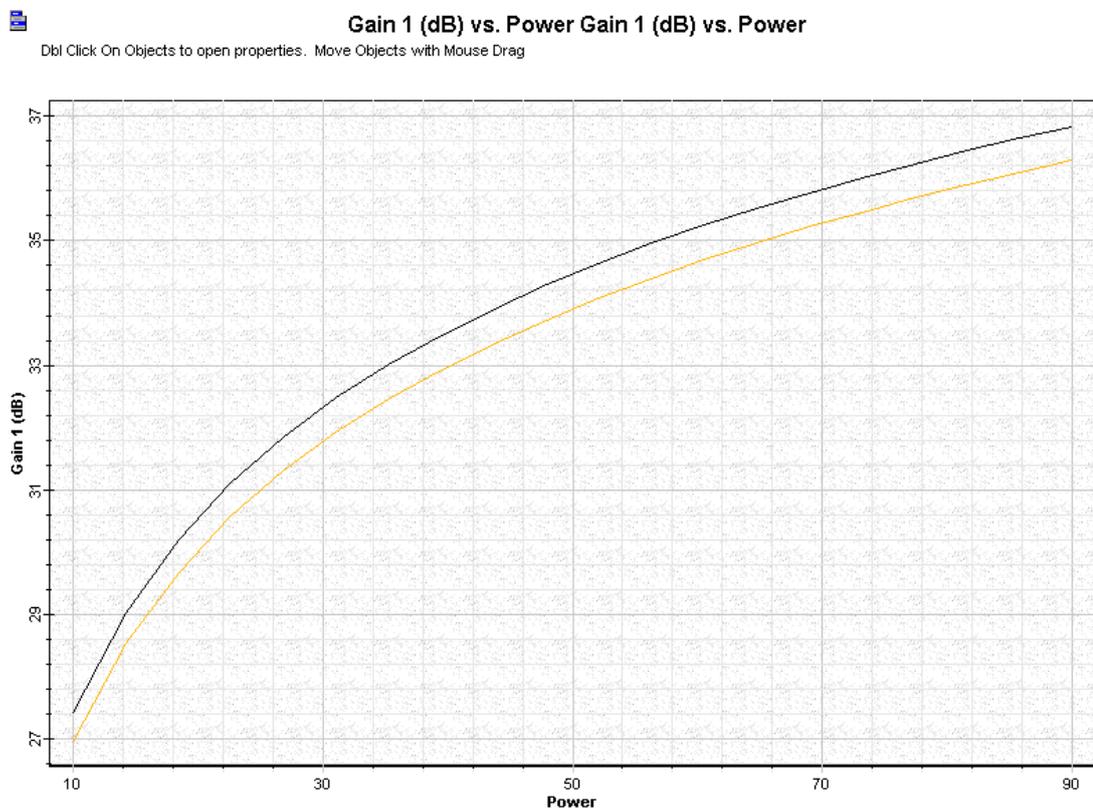


Figura 3. 20: Al comparar el rendimiento de ganancia de un EDFA estableció en un esquema de la bomba co- y contra-propagación
Elaborada por: El Autor.

La potencia de bombeo de la longitud de onda igual a 980 nm considerados en los tres diferentes versiones incluidas en este tercer escenario puede ser sustituido por una longitud de onda de bombeo de 1480 nm. Diferentes potencias de bombeo, de longitud de onda de la señal, y de

los parámetros de la fibra pueden ser considerados para llevar a cabo simulaciones adicionales.

3.4. Escenario de Simulación 3: Preamplificador

El archivo del cuarto escenario "Preamplificador.osd" muestra la caracterización de la configuración de un amplificador In-Line en una sola etapa de fibra dopada con erbio, bombeado por un láser de bombeo de 980 nm en un esquema de co-bombeo. En este caso, la pequeña potencia de entrada se considera para obtener una alta ganancia y pequeños valores de la cifra de ruido. La longitud de la fibra dopada con erbio es barrido en el intervalo de 6 m a 15 m que permite el control de la ganancia, de cifra de ruido, de potencia de salida y de OSNR como una función de la longitud de la fibra. La longitud de onda de bombeo considerada en las versiones "Pump 980 nm" y "Pump 1480 nm" es 980 nm y 1480 nm, respectivamente.

En las dos versiones diferentes, "Pump 980 nm" y "Pump 1480 nm", la potencia de entrada es -35 dBm a 1550 nm, respectivamente. El rendimiento del preamplificador para la longitud de onda de bombeo se puede ver en las gráficas de la ganancia, de cifra de ruido y potencia de salida que aparece en "View".

El diseño básico utilizado en este escenario del preamplificador se muestra en la figura 3.21, donde sólo la longitud de onda de bombeo se cambia de 980 nm a 1480 nm en el componente del láser de bombeo.

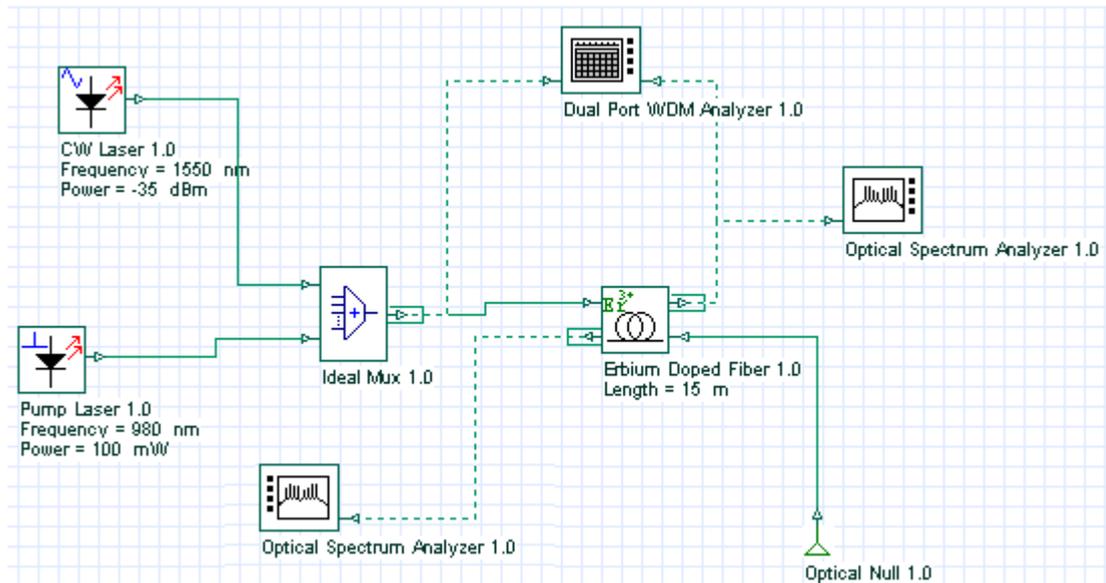


Figura 3. 21: Diseño: Preamplificador
Elaborada por: El Autor.

La ganancia para el preamplificador se muestra en la figura 3.22. Diferentes potencias de bombeo, de la señal de longitud de onda, y parámetros de la fibra pueden ser considerados para llevar a cabo simulaciones adicionales.

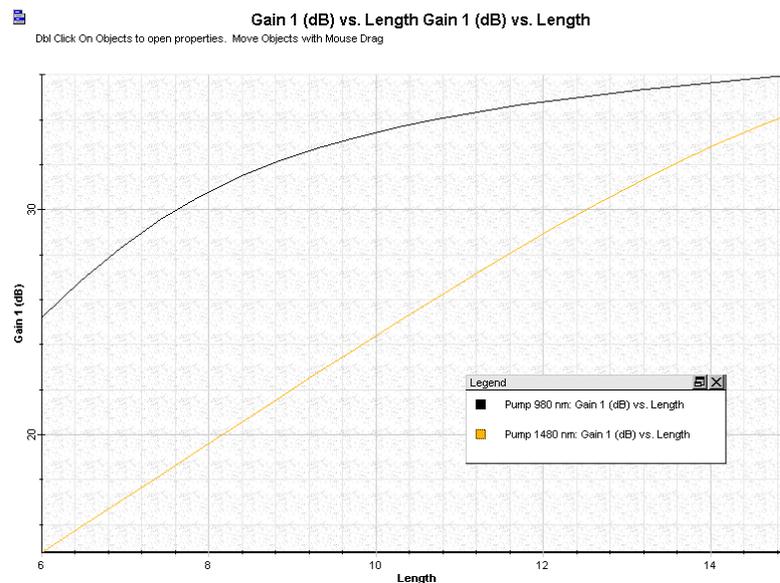


Figura 3. 22: Ganancia en función de longitud de la fibra dopada con erbio considerando 980 nm y 1480 nm como longitud de onda de bombeo.
Elaborada por: El Autor.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

- A través de los fundamentos teóricos se pudo describir los aspectos más relevantes de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica y que permitieron enfocarnos en el desarrollo del capítulo 3.
- La principal motivación de este trabajo de titulación fue proporcionar estudio en profundidad en la amplificación de la fibra óptica y su funcionamiento. Hemos presentado las características y las mediciones de cada tipo de amplificadores y hemos investigado el impulso que dieron los amplificadores ópticos en sistemas de multiplexación por división en longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing), con el fin de amplificar diferentes flujos ópticos en la misma fibra.
- También se han señalado las diferencias en la forma de construcción de estos amplificadores, las diferencias en el costo, en la eficiencia y en el ruido, que componen las mediciones cuantitativas para las comunicaciones ópticas.

4.2. Recomendaciones.

- Utilizar la herramienta de simulación OptiSystem en las asignaturas de Sistemas de Fibra Óptica y Redes de Nueva Generación para que los estudiantes de titulación puedan proponer nuevos temas de titulación a través de modelos de simulación.
- Existen diversas plataformas de simulación que permiten modelar en tiempo real un sistema de comunicación pero que requieren de licencia, para lo cual es necesario la inversión de parte de la UCSG para adquirir las licencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askarov, D., & Kahn, J. M. (2012). *Design of transmission fibers and doped fiber amplifiers for mode-division multiplexing*. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 24(21), 1945-1948.
- Barnoski, M. (Ed.). (2012). *Fundamentals of optical fiber communications*. Elsevier.
- Blanco Martín, R. (2012). *Desarrollo de una GUI para el estudio de Sistemas de Comunicaciones Ópticas*.
- Castillo Guzmán, A. A. (2011). *Láser de fibra óptica sintonizable*. Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Dutta, N. K., & Wang, Q. (2013). *Semiconductor optical amplifiers*. World scientific.
- Ferrín Z., J. C. (2014). *Estudio y diseño de una propuesta para el mejoramiento de la capacidad de la red fibra óptica de la UCSG utilizando tecnología DWDM*. Repositorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Ip, E., Li, M. J., Bennett, K., Bickham, S., Huang, Y. K., Tanaka, A., & Fukuchi, K. (2013). *Few-mode fiber transmission with in-line few-mode erbium-doped fiber amplifier*. International Society for Optics and Photonics.
- Krummrich, P. M. (2012, March). *Optical amplifiers for multi mode/multi core transmission*. Conference In Optical Fiber Communication - Optical Society of America.

- López Ruano, E. (2013). Estudio teórico y simulación de un OTDR para sistemas de comunicaciones por fibra óptica.
- Miller, S. (Ed.). (2012). Optical fiber telecommunications. Elsevier.
- Prieto Zapardiel, J. (2014). Diseño de una red de acceso mediante fibra óptica.
- Ribeiro, L. B. (2012). *Sistemas de Comunicação com Amplificação Óptica*. *Electrónica e Telecomunicações*, 2(1), 147-154.
- Senior, J. M. (2009). *Optical fiber communications: principles and practice*. Pearson.
- Torres, P. (2012). *Análisis por elementos finitos del amplificador de fibra óptica dopada con Erbío*. *MOMENTO-Revista de Física*, (11), 27-36.
- Umeki, T., Asobe, M., & Takenouchi, H. (2013). *In-line phase sensitive amplifier based on PPLN waveguides*. *Optics express*, 21(10), 12077-12084.