

Capítulo 1

Introducción

1.1. Sistemas de comunicaciones ópticos

El comunicarse ha sido para el ser humano una necesidad básica en su desarrollo. A lo largo de la historia ha existido el interés del hombre por compartir información con otras personas y la forma en que nos comunicamos ha cambiado de modo acelerado en los últimos siglos. Si damos una mirada en retrospectiva a la manera en que hemos logrado satisfacer esas necesidades, podemos encontrar que se han utilizado técnicas novedosas; y que en su mayoría empleaban señales sonoras u ópticas para comunicarse. En el caso de éstas últimas, el primer intento que se puede considerar funcional fue el uso de señales de humo donde personas de la misma comunidad enviaban mensajes a distancia con el humo producido en una hoguera. Las fogatas, espejos y banderas también fueron utilizados durante muchos años, pero un avance muy significativo sin duda, lo ocupó el establecimiento de un sistema estándar de comunicaciones basado en señales ópticas y propuesto por Claude Chappe en el año de 1792, tal sistema es conocido como semáforo óptico. Este dispositivo consiste en un conjunto de artefactos colocados encima de torres diseñadas para ser visto a gran distancia y que pueden configurarse para representar diferentes símbolos. Dichos aparatos se colocaban en cadena haciendo que cada torre repitiera el símbolo de la torre anterior para así; propagar el mensaje de una forma más rápida que mediante un típico mensajero a caballo. Se podían abarcar distancias de 350 [km] en 10 minutos lo que le otorgó un gran éxito [37]. El mencionado sistema se implantó en países como Francia, España, Alemania e Inglaterra reduciendo los tiempos de propagación de la información dentro de su territorio. La imagen 1.1 muestra un semáforo óptico diseñado por Claude Chappe y las diferentes rutas que se implantaron en Francia al utilizarlo.

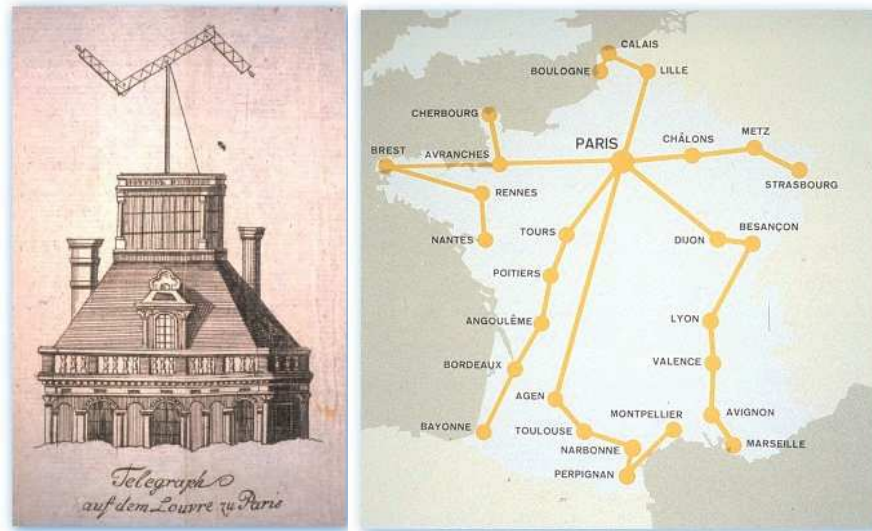


Figura 1.1: Semáforo óptico (izquierda) y las rutas que se crearon en Francia para este sistema de comunicaciones (derecha). 1795 Librería del Instituto Smithsonian [19]

Posterior a los métodos antes descritos. Un invento que cimentó las bases del desarrollo de las comunicaciones ópticas modernas lo proporcionó Alexander Graham Bell en 1880, al patentar el fonógrafo; un aparato cuyo funcionamiento consistía en un arreglo de espejos que modulaba la luz solar para transmitir voz. El experimento de Bell no logró tener éxito comercial, pero quedó plasmado como uno de los inventos ícono en el desarrollo de las comunicaciones ópticas.

La idea de utilizar señales ópticas como forma de comunicación se convirtió en una necesidad a desarrollar cuando la gran demanda de velocidad de transmisión se incrementó tanto que las otras tecnologías no eran capaces de satisfacerla. La razón para usar luz en lugar de electricidad se debe a que la cantidad de información que puede ser modulada sobre una portadora, es proporcional a la frecuencia de ésta; y el espectro óptico contiene frecuencias muy altas comparadas a las portadoras utilizadas en otros medios de comunicación (frecuencia del infrarrojo $\approx 360[THz]$). Para hacer una comparación de las prestaciones de diferentes medios usamos el concepto de la tasa de transmisión (B) y la distancia máxima de transmisión (L), así que la multiplicación de $B \times L$ resulta un parámetro muy sencillo de visualizar para medir la capacidad de transmisión de información de un sistema. Por ejemplo, para el caso del semáforo óptico del siglo XVIII, la B estimada era mucho menor a un bit por segundo ($B \ll 1[b/s]$) y una distancia común era de aproximadamente $100[km]$ por lo que el producto $B \times L \ll 100[bits/s \cdot km]$ [3] siendo un valor

muy pequeño; esta tasa de transmisión podía funcionar para solicitar ayuda o enviar mensajes cortos, pero no para las aplicaciones cotidianas actuales. Para el caso del telégrafo, éste tenía una magnitud de $B \times L \approx 100[\text{bits}/\text{s} \cdot \text{km}]$, aunque ya es una cantidad grande, teniendo en cuenta que una persona era la que operaba el equipo, la cantidad se queda insignificante para nuestras aplicaciones si consideramos que tan sólo para transmitir una llamada telefónica es necesaria una velocidad de transmisión de $64[\text{Kb}/\text{s}]$. Ya en el siglo veinte, el mejor cable coaxial podía transmitir $200[\text{Mb}/\text{s} \cdot \text{km}]$. Aunque el cable coaxial tiene una gran capacidad de transmisión, ésta resulta aún insuficiente para las necesidades de comunicación de nuestros tiempos.

A mediados del siglo XX se sabía que las comunicaciones ópticas tenían las capacidades físicas para elevar la velocidad de transmisión a valores nunca antes alcanzados, el problema consistía en que no se tenían los dispositivos para construir un sistema de comunicaciones óptico, es por eso que la comunidad científica se dedicó a desarrollar estos dispositivos.

Para la construcción de los sistemas ópticos fue necesario partir de tres condiciones:

- El establecimiento de la forma de conducir la luz. La fibra óptica se consideró la mejor opción debido a que ésta podía guiar la luz como los electrones por un cable de cobre. Partiendo de dicha idea se construyeron las primeras fibras ópticas cuyo principal problema consistió en la gran atenuación que presentaban. En 1966 la atenuación de las fibras fabricadas excedían los $1000[\text{dB}/\text{km}]$ lo que resultaba impráctico, pero la investigación en este ámbito logró que en menos de tres décadas el nivel de atenuación se redujera hasta $0,2[\text{dB}/\text{km}]$ que es el valor mínimo presente en las fibras ópticas de hoy en día.
- La creación de los fotorreceptores. Los cuales surgieron en forma paralela a las fuentes ópticas. Debido a que los fotorreceptores se construyen del mismo material que las fuentes ópticas, por lo tanto éstos trabajan en la misma longitud de onda.
- Las fuentes ópticas. En 1960 surge un invento hito en el desarrollo de las comunicaciones ópticas, la creación del láser. Este invento suscitó un gran interés en la comunidad científica a causa de que el láser cumplía las propiedades ópticas que los científicos consideraban, debía tener una fuente óptica para el desarrollo de las comunicaciones ópticas. El siguiente paso que siguió a la invención de esta fuente óptica, era encontrar los materiales para reducir sus dimensiones a tamaños micrométricos.

El desarrollo de estos dispositivos originó la creación de tres generaciones de sistemas correspondientes a las tres ventanas de transmisión en la fibras ópticas. La figura 1.2 muestra la gráfica de la atenuación en la fibra óptica respecto a la longitud de onda y la ubicación de las tres ventanas de transmisión. Aparte también se puede ver tres líneas que representan diferentes fenómenos que atenúan la señal: Dispersión de Rayleigh, absorción infrarroja y absorción

ultravioleta. La primera ventana se ubica en los 800-900 [nm], la segunda en 1200-1300 [nm] y la tercera que se ubica en 1500-1600 [nm].

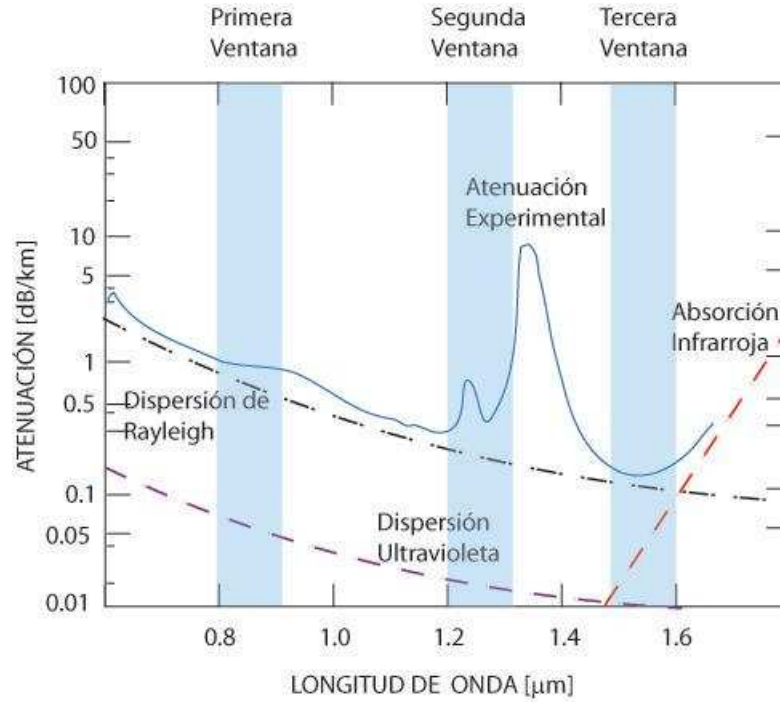


Figura 1.2: Atenuación en la fibra óptica vs longitud de onda y la ubicación de las ventanas de transmisión

Las características principales de las tres generaciones de sistemas ópticos se describen a continuación:

1.1.1. Primera generación

La primera generación se desarrolló en la segunda mitad de los años 70s. La ventana de transmisión usada se situó a los 0,8 μm en función de que el primer láser de semiconductor que se logró construir y que operaba a temperatura ambiente fue hecho de GaAs (construido por Hayashi en 1970) y funcionaba en esta longitud de onda. El fotorreceptor para esta ventana se desarrolló en forma paralela al láser. La atenuación que se tenía en las fibras de ese entonces oscilaba alrededor de los 5 dB/km , la tasa de bits llegaba a los 50 Mb/s y las distancias más larga eran de aproximadamente 10 km , por lo tanto el valor $B \times L \approx 500 \text{ [Mb/s} \cdot \text{km]}$ [18], superando al mejor sistema basado en cable coaxial. Las fibras de este periodo trabajaban en régimen multimodal.

1.1.2. Segunda generación

La segunda generación de comunicaciones ópticas se comenzó a definir cuando los científicos se esforzaron por desarrollar los dispositivos capaces de trabajar en la ventana de los $1,3[\mu m]$, el láser desarrollado fue de InGaAsP. Esta segunda generación se consideró disponible comercialmente en los primeros años de los 80s. Para aumentar la tasa de bits se tuvo que migrar de usar fibras en régimen multi-modal al mono-modal con el fin de evitar los problemas que la dispersión traía consigo. Las tasas de transmisión demostradas eran de alrededor de los $2[Gb/s]$ y se alcanzó una distancia de $44[km]$; el valor aproximado de $B \times L \approx 88[Gb/s \cdot km]$, un aumento enorme en las capacidades de estos sistemas. La atenuación para esta ventana se logró reducir a $0,5[dB/km]$. Un punto interesante de esta ventana de transmisión es que presenta el valor mínimo de dispersión para la fibra óptica convencional.

1.1.3. Tercera generación

La tercera generación comienza a finales de los 80s. La ventana de transmisión se ubica en los $1,55[\mu m]$. Aunque en esta ventana la atenuación es mínima y por tanto la distancia que se puede transmitir aumenta considerablemente; el valor de la dispersión es muy alto, ocasionando grandes problemas de interferencia intersimbólica en la señal después de propagarse por la fibra. Los métodos que se usaron para paliar el mencionado problema fue la utilización de fibras de cambio de dispersión (*dispersion shifted*), fibras compensadoras de dispersión o láseres diseñados para radiar en un espectro muy angosto entre otros métodos (en esta generación se desarrollan los *Distributed Feedback Lasers* que sólo radian un modo longitudinal). Una tasa de transmisión común es de $2,5[Gb/s]$ y las distancias usando amplificadores podían llegar a ser de varios miles de kilómetros.

1.1.4. Tecnología de multiplexado por división de longitud de onda

En algunos libros se maneja que existen cuatro generaciones de sistemas ópticos de comunicaciones [4], esto a raíz del surgimiento de los sistemas de multiplexado por división de longitud de onda (*Wavelength division multiplexing*). No es generalizado designar a los sistemas basados en esta tecnología como una nueva generación ya que no siguen la misma pauta que marcaron a las generaciones anteriores, la cual fue el uso de una ventana diferente de transmisión en la fibra óptica para cada generación. Esta tecnología permite el envío de diferentes señales, una en cada longitud de onda, por una misma fibra óptica. Dicha tecnología revolucionó a los sistemas ópticos ocasionando que apartir de 1992 sus capacidades llegaran a duplicarse cada seis meses durante esa década. Las velocidades que se llegaron a alcanzar fueron hasta $10[Tb/s]$ en una sola fibra utilizando 300 canales, cifra que rebasa por mucho las prestaciones de los mejores sistemas de las generaciones pasadas [4]. El desarrollo de esta nueva

tecnología exigió el mejoramiento de todos los dispositivos ópticos que componen un sistema de comunicaciones. En el caso específico de las fuentes ópticas, la necesidad que surge corresponde a reducir el ancho espectral de radiación del láser para así poder colocar los canales lo más junto posible y con esto incrementar la capacidad del sistema. Para solucionar este problema se utilizan láseres DFB (*Distributed Feedback*) que fueron desarrollándose desde la tercera generación, pero es en la aplicación a sistemas WDM que encuentran su máximo desarrollo.

Actualmente el desarrollo tecnológico va en busca de nuevos dispositivos que permitan un mejor aprovechamiento de los equipos ya existentes y que permitan exprimir más las capacidades que los sistemas ópticos aún nos ofrecen. Aunado a esto, se sigue en la búsqueda de la aplicación de las comunicaciones ópticas en las redes metro y de acceso, lo que lleva al desarrollo de dispositivos más baratos, pero tratando de no reducir sus prestaciones. En la siguiente sección se expondrán las razones que motivaron el trabajo de esta tesis.

1.2. Justificación del tema de tesis

Las redes de comunicaciones hoy en día han optado por incluir a las comunicaciones ópticas en redes cada vez más cercanas a los usuarios finales. El principal desarrollo se encuentra en las redes metropolitanas, pero también en segundo plano en las redes de acceso. Dicho fenómeno cambia el uso tradicional de la fibra óptica que comúnmente se utilizaba en aplicaciones de redes troncales. El origen de este nuevo esquema se debe a dos razones principales: la alta demanda de velocidad de transmisión que otras tecnologías no pueden ofrecer, y la disminución del costo de los dispositivos ópticos.

El costo de los equipos es el factor que más afecta para que una tecnología tenga éxito o no. En esta tesis se tiene como objetivo principal el demostrar el desempeño de la modulación directa de un láser como fuente óptica en un sistema de comunicaciones. Esta configuración resulta ser más económica que el uso de un modulador externo debido a que se prescinde de un elemento óptico para su funcionamiento.

Otro de los motivos que impulsa el estudiar esta configuración de modulación, es que actualmente se busca realizar circuitos ópticos integrados donde el principal objetivo es el de reducir el espacio de cada dispositivo óptico para ocupar el menor espacio posible. Es por ello que las fuentes ópticas preferenciales corresponden a los láseres que ocupen menos espacio y por ende, se prefiere la configuración de modulación directa. Por dicha razón es que se hace necesario conocer los efectos producidos al usar esta configuración para tomarlos en cuenta en el desempeño de los nuevos circuitos ópticos y en ciertas circunstancias, aprovecharlos como es el caso de estudio de este trabajo de tesis.

Las características de funcionamiento de las dos configuraciones de modulación se describen en la siguiente sección.

1.2.1. Métodos de modulación de un láser

La forma en que se transmite la información por una fibra óptica resulta muy simple de entender: la presencia de potencia óptica significa un bit en '1' y la ausencia de esta representa un bit en '0'. Para lograr una secuencia de bits, es necesario modular la fuente óptica. Los dos métodos de modulación se ilustran en la figura 1.3 y se explican a continuación:

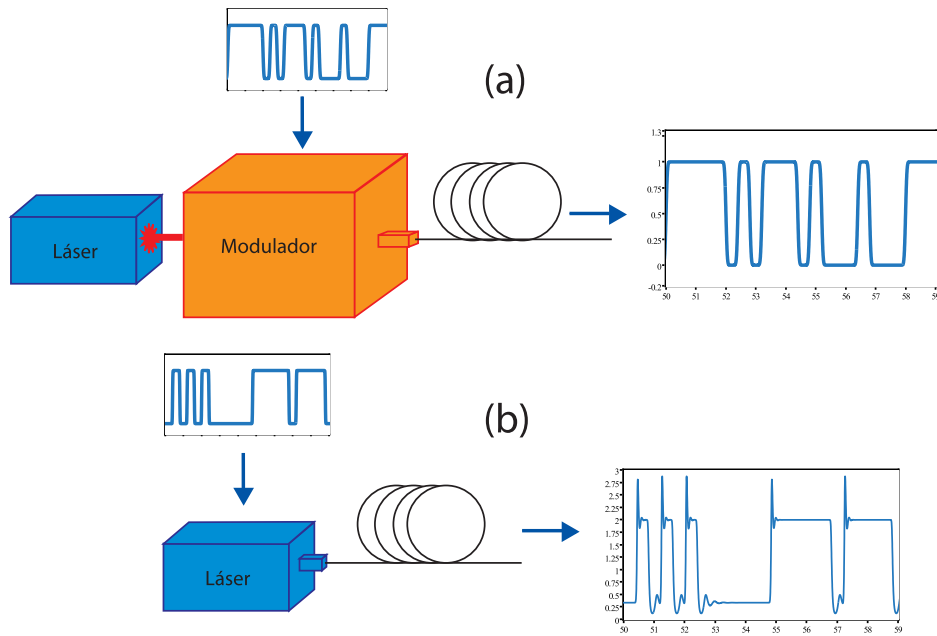


Figura 1.3: Configuraciones de modulación de la señal óptica. (a) Usando un modulador externo y (b) utilizando la modulación directa

En la figura 1.3 (a) se observa el esquema de un modulador externo. Esta configuración consiste en tener un láser trabajando en forma continua (*Continuous wave*) y poniendo un dispositivo a la salida del láser que permita el paso de la radiación cuando el bit esté en '1' y bloqueandola cuando el bit se encuentre en '0', este dispositivo es llamado modulador externo. Generalmente los moduladores externos consisten en un interferómetro Mach-Zender y hacen uso del efecto piezoeléctrico. La señal obtenida mediante este método de modulación tiene un desempeño muy bueno debido a que conserva la forma de la señal de salida prácticamente igual a la señal moduladora y el *chirp* que se presenta es tan pequeño que puede ser despreciable. Esto se puede observar en la figura 1.3 (a), donde la gráfica arriba del modulador es la señal moduladora y la que se encuentra a la derecha del dispositivo es la señal de salida siendo prácticamente

iguales las dos gráficas.

La figura 1.3 (b) muestra el otro método de modulación que corresponde a la estudiada en esta tesis y que se denomina modulación directa de un láser. En esta técnica, la señal moduladora en forma de corriente se ingresa de forma directa al láser provocando la emisión de una potencia óptica proporcional al valor de la corriente de inyección. Para representar un bit en '0' se aplica una corriente pequeña al láser lo que ocasiona una potencia óptica pequeña, mientras que para representar un '1' se inyecta un valor de corriente mucho mayor para que se pueda diferenciar entre la potencia de un bit en '0' y un bit en '1'. La gran ventaja de usar este método de modulación consiste en prescindir de otro elemento óptico como es el modulador externo, reduciendo los costos del transmisor óptico. La desventaja es que la señal que se produce no es una réplica de la señal moduladora (como se muestra en la gráfica a la derecha de la figura 1.3 (b)) y la frecuencia de la señal sufre cambios importantes. Dichos efectos afectan la calidad de la señal y reducen el desempeño final del sistema óptico en el que operan.

El modelo a estudiar en esta tesis es la configuración de modulación directa del láser. Para lograr el buen desarrollo de este trabajo se determinaron objetivos a cumplir que se citan en la sección siguiente.

1.2.2. Antecedentes del uso de la modulación directa en un diodo láser

Como se ha mencionado en secciones anteriores, la utilización de la modulación directa de un láser surge por la reciente incursión que han tenido las comunicaciones ópticas redes más cercanas a los usuarios finales. Dicho cambio ha llevado a una necesidad en la reducción de los costos de los dispositivos ópticos y en el caso de las fuentes ópticas, a la utilización de esta técnica de modulación. Sobre dicha técnica, existen numerosos artículos que buscan caracterizar el fenómeno del *chirp* y tratan de identificar los principales factores que lo originan, aunado a la búsqueda de un conjunto de parámetros que sean fáciles de medir en los dispositivos reales. Trabajos en esta dirección se encuentran los artículo de Cartledge et al. [16] que se uso para validar algunos de nuestros resultados y el de José A. P. Morgado et al. [29]. Trabajos posteriores ya no buscaban nuevos conjuntos de parámetros, sino que se enfocan en estudiar el comportamiento de la señal con *chirp* para aplicaciones en las comunicaciones ópticas dando como resultados estudios sobre la evolución de señal con *chirp* al propagarse por una fibra óptica convencional (dispersión positiva) obteniendo como resultado que la señal se degradaba de forma muy rápida limitando la máxima distancia de transmisión a unas decenas de kilómetros [5]. A partir de estos análisis, varios grupos de investigadores realizaron diversos estudios donde comprueban que la presencia de un cierto tipo de *chirp* (transitorio) al interactuar con una fibra óptica de dispersión negativa presenta un comportamiento que mejora varias de las características de la señal, principalmente el hecho de comprimir los pulsos ópticos. Dicho fenómeno tiene la capacidad de incrementar la distancia de transmisión a varios centenares de kilómetros sin tener que

regenerar la señal. Este nuevo esquema se podría considerar como una técnica de gestión de la dispersión. Algunos resultados de estos trabajos se pueden consultar en los artículos de Ioannis Tomkos et al. [44, 43].

Todos los trabajos enumerados anteriormente parten del modelo matemático de un láser de semiconductor que consiste en un sistema de ecuaciones de estado. Dicho modelo ha sido corroborado en numerosas ocasiones [44].

Tomando en cuenta los resultados de los trabajos anteriores, en esta tesis se busca caracterizar el desempeño de un sistema óptico a partir de un parámetro muy usado para medir la calidad de la señal en los sistemas de comunicaciones, el factor de calidad. Este parámetro es capaz de indicar un aproximado de la tasa de bits erróneos en la transmisión. Dicha caracterización se realiza teniendo como objetivo el proporcionar información sobre el desempeño de sistemas ópticos al usar este tipo de dispositivos, esto con el fin de proponer pautas de diseño para los láseres de semiconductor y además, poder realizar simulaciones de redes ópticas antes de implementarlas.

Es importante mencionar que este trabajo de tesis se realizó bajo la supervisión del doctor Ramón Gutiérrez Castrejón quien durante su realización me apoyó mediante la resolución de dudas, proporcionándome material de consulta, realizando las correcciones necesarias al trabajo escrito y alentándome a llevar a buen término este trabajo. Los módulos correspondientes al diagrama de ojos y la fibra óptica los facilitó él, siendo este último un módulo desarrollado por otro compañero que también participó en el grupo de trabajo que dirige el doctor Ramón[15].

1.3. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es el de analizar el desempeño de un láser de semiconductor modulado directamente al interactuar con una fibra óptica, dicha investigación tiene como meta la obtención del conjunto de parámetros de estos dos dispositivos que permitan obtener un sistema con las mejores prestaciones posibles. Para lograr este objetivo es necesario cumplir los siguientes submetas:

- Analizar el modelo matemático basado en un sistema de ecuaciones de estado que describe el comportamiento de un diodo láser y que ha sido validado por diferentes estudios previos.
- Encontrar un método numérico que permita resolver el modelo matemático citado anteriormente tratando de tener el mejor desempeño en términos de tiempo de ejecución y exactitud en los resultados.
- Implementar un simulador que obtenga la solución al modelo matemático de un diodo láser y que sirva como módulo para el proyecto que se lleva a cabo en el Instituto de Ingeniería sobre el estudio de sistemas ópticos.
- Validar el simulador comparando los resultados obtenidos con resultados publicados en la literatura especializada.

- Usar el simulador para analizar la interacción del *chirp* con la dispersión presente en una fibra óptica.
- Estudiar el efecto del *chirp* en la señal producida por un láser modulado directamente.
- Realizar evaluaciones de la calidad de la señal al transmitirse señales con diferente tipo de *chirp* a través de fibras con diferente valor de dispersión.
- Analizar los resultados y destacar el conjunto de parámetros del láser y la fibra óptica que presentaron mejores resultados y explicar la razón.