

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción.

La realización del trabajo de tesis se basa en el ámbito de las comunicaciones ópticas. Específicamente, se tratará de la caracterización de dispositivos electro-ópticos basados en tecnología de óptica integrada. Para poder explicar con mayor claridad la importancia y el desarrollo de esta tesis, primero se hace una pequeña introducción de las comunicaciones usando guías de ondas ópticas y los alcances que ha tenido. ^[1]

Hoy en día la fibra óptica es un medio para transportar luz con diferentes fines, por ejemplo: como lentes flexibles para cámaras en operaciones quirúrgicas ó para espionaje, iluminar lugares de difícil acceso y como función decorativa. Pero la aplicación de mayor interés se ubica en las comunicaciones de alta velocidad y gran ancho de banda. Para darse una idea de la importancia del uso de la fibra óptica en comunicaciones cabe mencionar que en los 30 años desde el descubrimiento de la fibra con bajas-pérdidas, más de 300 millones de Km. de fibra óptica se han desplegado a nivel mundial. Estas fibras pueden manejar más información que todo los miles de millones de kilómetros de cables de cobre instalados durante el último siglo; sería necesario 2 toneladas métricas de alambre de cobre para transmitir la información que se puede con un poco más de 1 Kg. de fibra. “En laboratorio hoy, una sola fibra puede transmitir el equivalente de 60 millones de llamadas telefónicas simultáneas.”...(Dr Donald Keck...1999.)^[1]. A continuación se explica brevemente el proceso de evolución que ha tenido la fibra óptica para llegar a las aplicaciones en comunicación que hoy se disfrutan y la tendencia de estas comunicaciones con tecnología de óptica integrada.

1.2 Breve historia de la fibra óptica.

Un grupo de investigadores de *Standard Telecommunications Laboratorios* (STL), inicialmente encabezados y en especial un ingeniero nacido en Shanghai, Charles K. Kao investigó la atenuación en la fibra. Su investigación lo convenció que la alta pérdida de las primeras fibras se debía a las impurezas, y no al silicio del vidrio. En medio de esta investigación, en 1964, Kao trabajó en una propuesta de comunicaciones de larga distancia con fibras monomodos. Convencido que las pérdidas de la fibra podían ser reducidas por debajo de los 20 decibeles por kilómetro. El 1 de Abril de 1966 el Instituto de Ingeniería Electrónica IEE publicó la propuesta notable de Kao con estas palabras: "En el encuentro IEE en Londres el mes pasado, el Dr. C.K. Kao ha demostrado que las guías de ondas ópticas, desarrolladas por los *Laboratorios de la Standard Telecommunications* (STL), que tienen una capacidad de información de un gigahertz, equivalente de alrededor de 200 canales de televisión o más de 200,000 líneas telefónicas. Él describió el dispositivo de STL, como un núcleo de vidrio aproximadamente de tres o cuatro micras de diámetro, revestido con una capa coaxial de otro vidrio que tiene un índice refractivo aproximadamente de uno por ciento menor que el núcleo. El diámetro total de la guía de onda está entre 300 y 400 micras. Ondas ópticas superficiales se propagan a lo largo de la interfaz entre los dos tipos de vidrio. También, la superficie de la guía es protegida de influencias externas y para su protección. Según el Dr. Kao, la fibra es lo suficientemente fuerte, para poder manipularla sin romperla y puede manejarse fácilmente por su tamaño y menor peso al cable de cobre. La guía de onda al ser tan delgada, tiene un radio mecánico de curvatura máximo, que es la medida del radio máximo en el cual la fibra se puede curvar, sin que se quiebre, y llega a ser este radio lo suficiente para hacer a la fibra casi completamente flexible para curvarse. A pesar de la circunstancia, el material tiene una adecuada

disponibilidad y una baja pérdida, aproximadamente 1000 dB/Km. STL cree que en el futuro, se desarrollaran materiales que tendrán pérdidas de solo 10 decibelios por kilómetro. ^[1]

En 1977, fué probada la primera generación de fibras ópticas en el campo de la telefonía, se usaron fibras para transmitir luz a 850 nanómetros de los diodos laser de AlGaAs (Aluminio+Galio+Arsénico). Estas primeras generaciones de sistemas podían transmitir luz a varios kilómetros sin repetidor, pero estaban limitados por pérdidas de aproximadamente 2 dB/km. Una segunda generación pronto apareció, usando los nuevos lasers de InGaAsP (Indio+Galio+Arsénico+Fósforo) que emitieron a 1.3 micrómetros, donde la atenuación de la fibra era tan baja como 0.5 dB/km, y la dispersión del pulso reducida a 850 nm. ^[2]

En 1983 MCI, una de las grandes compañías de larga distancia en los Estados Unidos fué la primera en tender una Red Nacional de Fibra óptica en ese país ^[1].

Un salto significativo hacia adelante en las comunicaciones usando guías de ondas óptica, se espera con los dispositivos que buscan integrar componentes ópticos tales como conmutador, ruteador ó modulador, todos ópticos e integrados juntos o por separado en un circuito de guía de onda, dando lugar a la tecnología en óptica integrada. Lo cual será la chispa para una nueva revolución a nivel mundial de la fibra óptica, con lo cual se estaría aprovechando la capacidad de las comunicaciones de las fibras ópticas, convirtiéndose en el medio de comunicación a usarse. ^[3].

Lo que se está consiguiendo hoy en día en los laboratorios resultará en el desarrollo de dispositivos y sistemas ópticos informáticos y de comunicación súper-rápidos, súper-miniaturizados, súper-ligeros y más baratos. Y una muestra de estos circuitos de óptica integrada se ve en las figuras 1.1 y 1.2. ^[4]

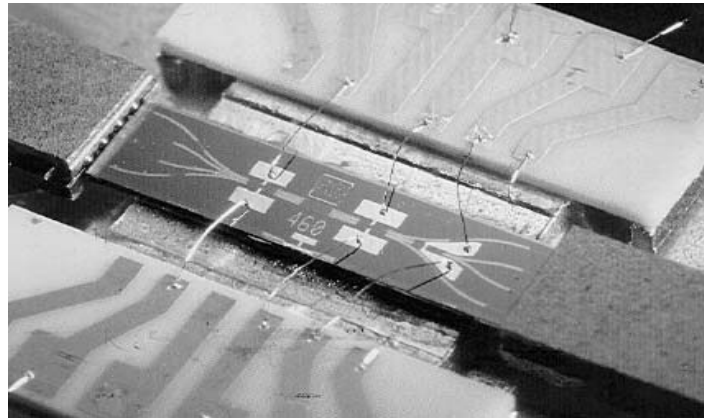


Figura 1.1 Foto de circuito de óptica integrada [4].

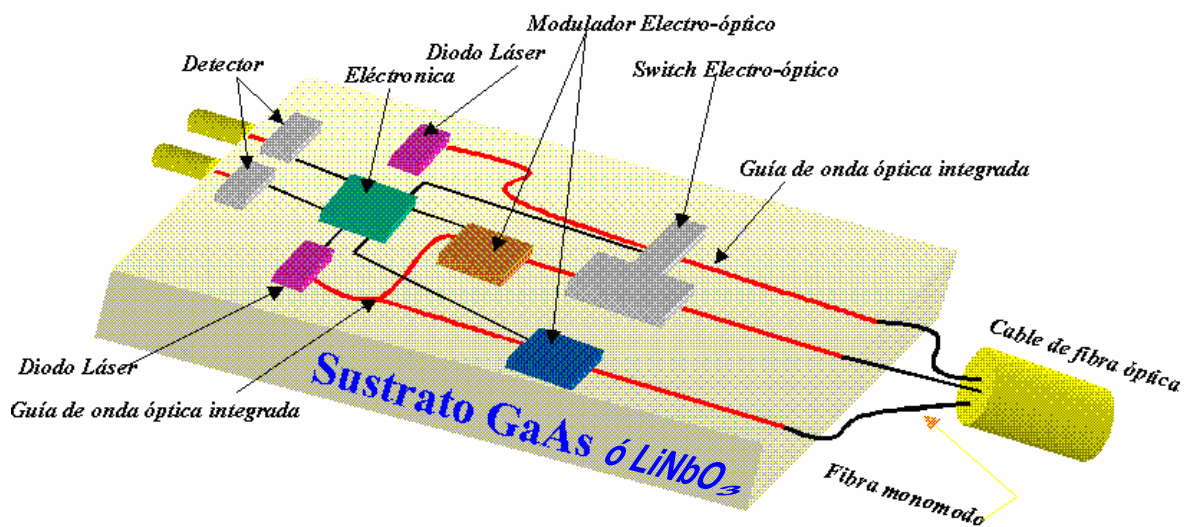


Figura 1.2 Esquema de circuitos de óptica integrada [5]

1.3 Actividad de la tesis.

La anterior reseña permitió explicar brevemente el desarrollo de la fibra óptica y que las recientes evoluciones mencionadas ya son un hecho. Una muestra palpable en tecnología de óptica integrada es la técnica de modular un haz luminoso sin variar la intensidad de la fuente, a lo cual se le llama modulación externa, pero al hacerlo mediante una guía de onda luminosa con características optoelectrónicas, es gracias a la tecnología en óptica integrada la cual hace que el modulador quede en la guía de onda y se puedan integrar otros componentes si fuera necesario. En esta tesis se tiene la

oportunidad de caracterizar un modulador externo en tecnología en óptica integrada, midiendo su respuesta en frecuencia de 0 a 20Ghz, su sensibilidad para variar la intensidad luminosa al aplicar un voltaje entre 0 y 6V a los electrodos del modulador y realizar la aplicación del modulador con la transmisión de una señal analógica.

Como parte fundamental del trabajo se realizará la caracterización de un modulador electro-óptico en tecnología en óptica integrada. Este dispositivo se utiliza en el desarrollo del proyecto J40574-Y que el Dr. Jorge Rodríguez Asomoza está dirigiendo. El modulador está compuesto de un cristal de niobato de litio (LiNbO_3), el cual gracias a sus propiedades electro-ópticas permite la construcción de guías de onda ópticas. Además con electrodos integrados permitirán modular la intensidad de la luz en forma externa al aplicar un campo eléctrico externo generado por una señal de voltaje. Esto ha permitido anchos de banda en el dominio de los Ghz y eliminar el efecto que se produce por la modulación directa de intensidad de la fuente luminosa, el cual consiste en que la luz tienda a cambiar su longitud de onda fundamental al ser más rápido el tiempo de la modulación que el requerido por la fuente para generar el haz de luz en la longitud de onda para el que fue creado, de manera que la luz que se recibe es menos clara y es más difícil de detectar de manera precisa, a este efecto se le llama *chirp*. Esto hace al modulador que se caracteriza muy útil para su uso en sistemas de comunicaciones vía fibra óptica a velocidades de transmisión extremadamente altas.

1.4 Objetivo

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar el modulador de intensidad electro-óptico de tecnología en óptica integrada antes mencionado, midiendo y analizando su respuesta en frecuencia, rango de operación y funcionamiento en una pruebas de transmisión de una señal de video compuesto con una portadora de 2 Gz. Para lograr

este objetivo se tiene que caracterizar el modulador, pero antes de poder llegar a la caracterización es necesario entender el funcionamiento del modulador electro-óptico con tecnología de óptica integrada, basada en cristales de niobato de litio (LiNbO_3), que es la base de la guía de onda que hace posible el modulador, por lo cual también se estudiará al LiNbO_3 .

1.5 Trabajos Relacionados

Una muestra de trabajos relacionados con óptica integrada, son los esfuerzos y trabajos realizados por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y más a detalle en el área de óptica, la cual está formada por 34 investigadores, los cuales constituyen el grupo de óptica más grande del País; del total de investigadores, el 95% pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI)^[6]. El INAOE en el ámbito de la investigación básica, se estudian esencialmente los mecanismos de generación, propagación y detección de señales ópticas. Por otra parte, como *investigación aplicada* se orienta a la descripción de sistemas ópticos así como al desarrollo de ingeniería óptica.

En el INAOE se sabe que las tendencias mundiales en el área de la óptica evolucionan hacia la investigación en espectroscopía, particularmente el atrapamiento de átomos y iones, lo cual ofrece grandes posibilidades de aplicaciones tecnológicas; por ejemplo, la determinación de la vida media de iones permitiría la creación de estándares así como la transferencia de información. Esfuerzos significativos de investigación se realizan en el área de instrumentación óptica, en especial el desarrollo de sistemas ópticos compactos, microlentes y fibras ópticas para aplicaciones médicas así como en el desarrollo de componentes optoelectrónicos que son fundamentales para el desarrollo de interconectores en circuitos ópticos.

Las líneas de investigación en la rama de la optoelectrónica están dirigidas al desarrollo de elementos y dispositivos optoelectrónicos, Diseño de moduladores y sensores ópticos y Sistemas basados en fibra óptica.^[6]

Algunos trabajos de tesis son "Estudio de un sistema de comunicación óptico para el filtrado y sintonizado de señales microondas, utilizando el efecto de la dispersión cromática y fuentes multimodo." Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Concluida en diciembre de 2003, el cual es un estudio teórico del efecto de la dispersión cromática presente en las fibras ópticas a fin de mostrar su influencia en la respuesta en frecuencia de un sistema de comunicaciones óptico operando bajo el esquema de modulación externa. El análisis permite establecer un modelo que muestra la posibilidad de realizar el filtrado de señales del tipo pasa-banda situadas en el rango de la microondas así como su sintonización^[7].

También se realizan trabajos de fabricación de moduladores electro-ópticos y sus valores obtenidos como resultado final, con lo cual se pueden diseñar las mismas guías de onda para generar dispositivos de óptica integrada.^[6]

Como otro ejemplo de trabajos relacionados en México, son los que se hacen en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Enseñanza (CICESE), donde por ejemplo, el Dr. Heriberto Márquez B. y el Dr. David Salazar M. trabajan para desarrollar una metodología de fabricación de guías de onda de índice de gradiente por medio de difusión de iones metálicos. Se determinan las propiedades ópticas y estructurales de las guías fabricadas y se estudian maneras de modificarlas para aplicarlas al desarrollo de dispositivos pasivos de óptica integrada. Se trabaja sobre el diseño de elementos estáticos de óptica integrada utilizando únicamente guías de onda.

En particular, líneas de transmisión, uniones y multivisores. Los diseños se realizan utilizando programas de simulación que permiten predecir el comportamiento de las guías en función de sus parámetros estructurales. En la actualidad el trabajo está enfocado al desarrollo de guías de onda óptica de baja birrefringencia. Este tipo de guías son la base para el desarrollo de dispositivos pasivos de óptica integrada utilizados en las áreas de óptica integrada planar, sensores y comunicaciones ópticas. [8]

Otro ejemplo de trabajo relacionado es el mostrado en la Universidad Autónoma de México (UNAM), donde la Dra. Celia Sánchez Pérez, del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, creó un modulador de señales para su utilización en un sistema de comunicación óptico. La principal ventaja de estos sistemas es la transmisión de grandes volúmenes de información de manera ultra-rápida. Caracteriza a este nuevo dispositivo su forma híbrida, pues está conformado por dos tecnologías: las guías de onda en vidrio y un polímero electro-óptico en capa delgada. “Existen ya moduladores ópticos, pero no con esta propiedad”. Sánchez Pérez explicó que los sistemas de comunicación ópticos integraban en un principio elementos electrónicos para realizar funciones de modulación y amplificación, entre otras. No existían componentes ópticos para reemplazarlos. Esto reducía la velocidad de transmisión pues hacía lentos los sistemas. Por lo anterior, muchos investigadores se han dedicado a desarrollar dispositivos que permiten tener sistemas de comunicación completamente ópticos, dada la creciente demanda de usuarios de Internet y telefonía móvil.

El vidrio es un material que se utiliza para fabricar guías de onda pasivas, las cuales son utilizadas para la transmisión de señales ópticas sin cambio alguno en sus propiedades. En cambio, los polímeros electro-ópticos son materiales activos que permiten modificar ciertas propiedades como la amplitud, fase o frecuencia del has

luminoso durante su propagación por guías de onda echas en estos materiales, realizándose estas modificaciones al aplicar una campo eléctrico externo. Así, mediante una señal de voltaje aplicado a los electrodos que se colocan a los costados de la Guía, se genera un campo eléctrico que permite modular al haz luminoso.

Al referirse a las ventajas del sistema, la especialista indicó que en los utilizados hoy día se hace, por un lado, la modulación y, por otro, las funciones pasivas de separación de las señales, recombinación y demás. Por tanto, se tienen dos dispositivos separados, los cuales hay que conectar mediante fibras ópticas y añadir algunos elementos de interconexión, lo cual complica y eleva su precio. En cambio, gracias a la hibridación, se tienen las dos funciones mencionadas en un mismo dispositivo, con lo que se eliminan así los elementos de interconexión y la alineación. De este modo, se logran sistemas más compactos, de tamaño reducido, lo que repercute en una disminución del costo de fabricación. Además de las telecomunicaciones, aseveró que el impulso de la tecnología de la óptica integrada también es de utilidad para el desarrollo de sensores y en el campo de la astronomía. Destacó que es posible desarrollar sistemas de gran precisión para medir, por ejemplo, la rugosidad de la piel, el desplazamiento de partículas, la presión y temperatura de los pozos petroleros, sin riesgos de cortocircuitos, y posibles explosiones generadas por los sensores electrónicos.

Cabe resaltar también que las bases de este trabajo, resultado de la tesis de doctorado de Celia Sánchez Pérez, podrían usarse para realizar novedosos dispositivos multifuncionales con la hibridación de una amplia gama de materiales activos. ^[9].

Una muestra de la importancia de la óptica integrada a nivel mundial lo da la Agencia Espacial Europea (ESA). La cual se propone desarrollar una nueva tecnología que podría conseguir que la conexión a Internet fuera hasta 1,000 veces más rápida que

la que se disfruta en la actualidad. Esta tecnología se trata de la óptica integrada, la cual es una tecnología aún en fase de desarrollo. Las redes mundiales de telecomunicaciones como Internet utilizan haces de luz para transferir datos a través de cables de fibra óptica. Actualmente estos cables son capaces de transmitir datos a más de la mitad de la velocidad de la luz, pero ocurren "atascos" cuando esos haces de luz llegan a un servidor o computadora y tienen que convertirse en corrientes eléctricas que viajan mil veces más lento que la luz.

La óptica integrada haría posible que los paquetes de datos perduraran como haces de luz todo el tiempo, posibilitando así que pudieran transmitirse simplemente a través del chip hasta su destino final 1,000 veces más rápido. Este logro tecnológico aumentaría la velocidad de Internet hasta 1,000 veces y los resultados serían significativos para los usuarios de la red. Los electrones se mueven a la velocidad de unos kilómetros por segundo, mientras que la luz viaja a casi 300,000 kilómetros por segundo.

La ESA estudia la posibilidad de emplear la óptica integrada en dos futuros proyectos con el fin de encontrar planetas parecidos a la Tierra.

El sistema GENIE (*Ground-based European Nulling Interferometer Experiment*) y el proyecto Darwin utilizarán telescopios múltiples para combinar la luz emitida desde planetas como el nuestro y analizar sus atmósferas para obtener señales de vida químicas.

En la actualidad, las observaciones astronómicas se basan en haces de luz que se combinan y redirigen usando espejos y lentes en movimiento. Sin embargo, las piezas en movimiento tienen tendencia a estropearse, lo cual suele crear problemas si los telescopios giran alrededor de la Tierra, como lo harán con el sistema Darwin. Una solución alternativa es la óptica integrada, que utiliza sistemas ópticos en miniatura que

se acoplan a un microchip para redireccionar los haces de luz. Si esta tecnología se desarrolla para la observación espacial, derivará inmediatamente para otros usos como para perfeccionar las habilidades de las telecomunicaciones avanzadas

La ESA ha lanzado una convocatoria dirigida a empresas que trabajen en el sector de la óptica integrada con el fin de desarrollar la tecnología para el sistema GENIE. Después se decidirá si usar la óptica integrada o las técnicas tradicionales el próximo año. Si la ESA finalmente aplica la óptica integrada a la búsqueda de planetas similares a la Tierra, se espera que esta tecnología no tarde en aplicarse a otras ramas, particularmente a la mejora de las telecomunicaciones y a las velocidades de transmisión de datos, que aumentarían entre 100 y mil veces las velocidades actuales. Los atascos de Internet serían, en este supuesto, sólo un recuerdo del pasado^[10].

Otro trabajo de índole internacional es el realizado por Intel®, esto por ser esta compañía una de las fabricantes de microprocesadores más importantes, la cual ha declarado que creó un modulación de intensidad de alta velocidad con sustrato de silicio.

Haciendo una explicación general de los se puede mencionar que los moduladores, ya que este tema se tratara más a detalle en otro capítulo, se puede decir lo siguiente: Desde los primeros días de las comunicaciones por fibra óptica, se han intentado distintos enfoques de modulación con distintos grados de éxito. La forma más simple es la modulación directa, la cual es encender y apagar el láser rápidamente. Aunque es efectivo, este enfoque tiene graves desventajas, pues, conforme el láser se enciende y se apaga, la luz tiende a presentar el efecto de chirp. Este efecto, hizo que los proveedores principales utilizaran un modulador externo; un dispositivo que es independiente del láser.

El tipo de modulador externo más sencillo utiliza un obturador para interrumpir la luz. Sin embargo, el uso de partes móviles como el mecanismo del obturador hace que el modulador sea demasiado lento para la comunicación de datos. Históricamente, la fotónica de silicio ha confiado en la inyección de corriente al interior de las guías de ondas para codificar los datos en la luz que atraviesa las guías de ondas. Aunque este enfoque es más efectivo y elimina la necesidad de partes móviles, sigue estando limitado por una velocidad máxima de aproximadamente 20 MHz. A esta velocidad, la transferencia de datos está por debajo de la capacidad de la mayoría de las redes residenciales de hoy; muy lejos de la velocidad que se espera de la fibra óptica.

Durante mucho tiempo, este límite de 20 MHz hizo que la fotónica de silicio no fuera apta para las aplicaciones comerciales. Sin embargo, el anuncio de Intel acerca de un modulador de silicio capaz de alcanzar velocidades de 1 GHz parece asegurar que se realmente se romperá esta barrera y que levantará la fotónica de silicio a un nivel de mayor relevancia en la computación comercial.

El tipo de modulación externa es muy parecido al que se estudia en el capítulo 5, donde se explican las Técnicas de Modulación Óptica con Dispositivos Electro-Ópticos. Básicamente la modulación es a través de un interferómetro y la superposición de ondas desplazando las fases para anular o complementar el haz de luz.

Sin embargo, la importancia de este avance específico, es el modulador de fase de Intel® el cual puede llevar a cabo esta modulación a velocidades mayores a 1 GHz. Al hacer esto, Intel ha elevado el límite anterior de rendimiento 50 veces la marca anterior. Esperan lograr mayor ancho de banda mediante la multiplexación de estos flujos de datos. Este enfoque podría llevar la fotónica de silicio a una era de velocidades de 40 Gbps o más. A tales capacidades, la fotónica de silicio podría representar una alternativa obligada y a costo razonable para las aplicaciones comerciales, en especial

como ejes troncales y cableado de instalaciones corporativas. Además, es posible que gracias a la disponibilidad de bloques de construcción de silicio de bajo costo y alto rendimiento, los dispositivos conectados; ya sean servidores, PC de escritorio, portátiles o dispositivos de mano. Puedan contar con puertos ópticos para hacer posible la conexión fácil y rápida a redes de gran ancho de banda. Si esto ocurre, dichos dispositivos verán en la fotónica de silicio la tecnología que hace posible la demanda de ancho de banda a un costo razonable. ^[11].

1.6 Organización de la Tesis.

En el capítulo 1 se da una introducción al tema de la tesis que son las comunicaciones así como una breve historia de la fibra óptica, también se menciona que el desarrollo de la tesis está enfocado a la caracterización de un modulador electro-óptico y de su implementación en una transmisión de información. También se describen algunos ejemplos de trabajos relacionados, con el fin de saber que es lo que se está haciendo en otras partes y cual es la tendencia de la tecnología en óptica integrada.

En el capítulo 2, “TOPOLOGÍAS, NIVEL FÍSICO Y REDES DE FIBRA ÓPTICA.”. Se explicarán las diferentes redes de telecomunicaciones, sus alcances geográficos y los diferentes medios físicos de comunicación que forman el nivel físico de la red. Por último se explica una forma de red y su nivel físico que la compone, para satisfacer las necesidades de un creciente número de usuarios de las comunicaciones, que requieren compartir más datos y en menos tiempo.

En el capítulo 3 “EL NIOBATO DE LITIO (LiNbO_3)” Se explica la característica isotrópica del cristal de niobato de litio, la cual permite cambiar sus índices de refracción en relación a un campo eléctrico externo. Al variar los índices

de refracción la trayectoria del haz luminoso se modifica y ésta es la base para la construcción del modulador de intensidad que se caracteriza y se le da una aplicación en esta tesis.

En el capítulo 4 “TÉCNICAS DE MODULACIÓN ÓPTICA CON DISPOSITIVOS ELETRO-ÓPTICOS”. Se explican las diferentes técnicas de modulación externa realizando una comparación entre la modulación directa en la fuente luminosa y la modulación externa en tecnología de óptica integrada que es la forma como opera el modulador utilizado en esta tesis.

En el capítulo 5 “ARREGLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS”. Se reportan mediciones realizadas con el modulador, tales como su respuesta en frecuencia y su rango operacional en relación al voltaje, a lo cual se le llama $V\pi$, así como la explicación de los resultados en base a la teoría de los capítulos que le preceden. También como última prueba se reporta la transmisión de una señal de video compuesto transmitida con una sub-portadora 2 Ghz, a través de un enlace de 28 Km de fibra óptica.

En el capítulo 6 “CONCLUSIONES DE LA TESIS”. Se describen la aportaciones que da esta tesis con los resultados obtenidos a través de todo su desarrollo, dando como resultado la realización experimental de la modulación a alta frecuencia, así como también se menciona sus alcances, pudiendo desarrollar, actividades de investigación con transmisiones a más alta frecuencia y con otro tipo de modulación.