



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE APLICACIONES COMERCIALES CON FIBRA ÓPTICA

TESIS

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

Pablo Silvestre Solís López

Asesor de Tesis

Dr. Gilberto González Ávalos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Febrero del 2010

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por darme la oportunidad de realizarme como profesionista.

A mi Mama por haber contribuido con sus sacrificios y educación a desarrollarme como una persona de bien, por brindarme siempre su apoyo en todos los aspectos, aguantarme en los momentos difíciles y por estar conmigo en este gran paso.

A mi Father por darme todo su apoyo para que yo sea cada día una mejor persona y me haya ayudado a cumplir mis sueños. Por darme esa confianza y esas ganas de seguir adelante, y estar en esos momentos tan complicados de la vida y apoyarme.

A mis Papás por su nobleza, por su amor y cuidado durante mi infancia, por sus consejos bien fundamentados durante mi adolescencia, por su cariño y comprensión a lo largo de toda mi vida.

A mis queridos hermanos Tany, Xavi y Dani por su cariño y su buen humor.

A mi Asesor el Dr. Gilberto González Ávalos por aceptar participar como pieza fundamental y soporte en este trabajo de tesis, por sus horas de dedicación, por su apoyo en todo momento, por su tranquilidad para llevarme por el camino correcto, por haber sido y ser un gran maestro, un gran asesor, pero por sobre todas las cosas por su amistad y entusiasmo en todo momento.

A mi abuelita Pina que cuando no podría ir a mi casa a comer, ella me daba sin ningún reproche una muy buena comida, gracias Abue por tu apoyo que me hizo de mucha utilidad otra vez gracias.

A mi tía Chayito que siempre creyó en mí y por sus consejos para mi familia y para la escuela.

A la Universidad Michoacana por haber sido mi segunda casa durante 5 años.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica por contribuir con una educación de calidad en mi formación.

A todos los profesores de la carrera, por haber sido parte de mi formación académica.

A todos mis demás amigos y personas que me conocen que me falta por mencionar, que alguna vez contribuyeron en mi formación tanto académica como personal, y que han formado parte de mi vida. Gracias

CONTENIDO

Agradecimientos.....	i
Contenido.....	ii
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tablas.....	vi

CAPITULO 1

INTRODUCCION.....	1
1.1 Antecedentes históricos de las fibras ópticas.....	2
1.2 Objetivo.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Organización de la Tesis.....	5

CAPITULO 2

ANTECEDENTES DE SEÑALES OPTICAS Y LUMINOSAS.....	6
2.1 Importancia de las señales ópticas.....	6
2.1.1 Historia de la fibra óptica	7
2.1.2 Óptica geométrica.....	8
2.1.2.1 Reflexión y refracción de la luz.....	8
2.1.2.2 Utilización de la reflexión total interna.....	12
2.1.2.3 Fibra óptica. Apertura numérica.....	13
2.1.3 Óptica Ondulatoria.....	16
2.1.3.1. Noción de modo de propagación.....	16
2.1.3.2 Principales resultados de la teoría modal.....	18
2.1.4 Dispersión en una fibra óptica.....	21
2.1.4.1. Definición de dispersión.....	21
2.1.4.2. Dispersión modal.....	24
2.1.4.3. Dispersión cromática.....	27
2.1.4.4. Reducción de la dispersión.....	28
2.1.4.4.1 Fibra de índice gradual.....	28
2.1.4.4.2 Fibra monomodo.....	33
2.1.5 Tres principales tipos de fibras.....	35
2.1.5.1 Fibra de índice escalonado	35
2.1.5.2 La fibra de índice gradual.....	36
2.1.5.3 La fibra monomodo.....	36

2.2	Dispositivos Luminosos.....	37
2.2.1	Canal de transmisión óptica.....	37
2.2.1.1	Reseña histórica de los primeros sistemas ópticos.....	37
2.2.1.2	Dificultades causadas por la propagación en la atmósfera.....	38
2.3	La fibra óptica como medio de transporte de señales.....	40
2.3.1	La fibra óptica como canal de transmisión.....	40
2.3.1.1	Reseña histórica.....	40
2.3.1.2	Advenimiento del láser.....	41
2.3.1.3	Fibras ópticas de baja atenuación.....	41
2.3.2	Sistema de comunicación por fibra óptica.....	41
2.3.2.1	Descripción general.....	42
2.3.2.2	Ventajas potenciales.....	43
2.3.2.3	Campos de aplicación.....	44
2.4	Aplicaciones Actuales.....	45
CAPITULO 3		
DISEÑO DE SISTEMAS DE INFORMACION LUMINOSAS.....		47
3.1	Diseño de despliegado de señales preventivas e informativas.....	47
3.1.1	Semáforos ecológicos.....	48
3.2	Diseño de un semáforo con fibras ópticas.....	52
3.2.1	Semáforo de sola un luz.....	53
3.3	Diseño de vías de transito.....	54
CAPITULO 4		
CONSTRUCCION DE SISTEMAS OPTICOS.....		56
4.1	Construcción de un semáforo con fibras ópticas.....	56
4.2	Señales viales iluminadas por medio de fibra óptica.....	64
4.3	Características de la fibra óptica utilizada.....	67
4.4	Comparativa de Semáforos de lámpara incandescente con LEDs.	69
4.5	Otras aplicaciones con fibra óptica.....	71
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		73
5.1	CONCLUSIONES.....	73
5.2	RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFIA.....		75

Lista de Figuras

Figura 2.1	Reflexión de la luz en un espejo.....	9
Figura 2.2	Refracción de la luz.....	10
Figura 2.3	Ángulo crítico de refracción.....	10
Figura 2.4	Reflexión total interna.....	11
Figura 2.5	Propagación por medio de reflexiones.....	12
Figura 2.6	Fuente luminosa.....	13
Figura 2.7	Efecto de una imperfección en la interfaz.....	13
Figura 2.8	Corte longitudinal de una fibra óptica.....	14
Figura 2.9	Cono de admisión de una fibra.....	16
Figura 2.10	Guía de onda plana con espesor a	17
Figura 2.11	Acoplamiento de modos causados por una microcurvatura.....	20
Figura 2.12	Acoplamiento de modos por un centro de difusión.....	21
Figura 2.13	Pérdida de información debida al alargamiento de pulsión.....	22
Figura 2.14	Variación de la amplitud de los pulsos.....	23
Figura 2.15	Variación de la atenuación de los pulsos (en dB).....	24
Figura 2.16	Corte longitudinal de una fibra.....	25
Figura 2.17	Variación del retraso medio modal.....	27
Figura 2.18	Distribución espectral de una fuente.....	27
Figura 2.19	Perfil del índice.....	29
Figura 2.20	Fibra con cuatro escalones del índice.....	29
Figura 2.21	Trayectoria de los diferentes modos en una fibra de índice gradual.....	30
Figura 2.22	Perfiles del índice, para diferentes valores del parámetro α	31
Figura 2.23	Variación del retraso modal.....	32
Figura 2.24	Fibra monomodo.....	33
Figura 2.25	Fibra de índice escalonado sin cubierta.....	35
Figura 2.26	Fibra de índice escalonado.....	35
Figura 2.27	Fibra de índice gradual.....	36
Figura 2.28	Fibra de índice monomodo.....	36
Figura 2.29	Fotófono de Graham Bell.....	37
Figura 2.30	Absorción y difusión de la luz.....	38
Figura 2.31	Sistemas de comunicación ópticas.....	39
Figura 2.32	Sistema de comunicación por fibra óptica.....	42
Figura 2.33	Repetidor óptico.....	42
Figura 2.34	Sistema general de comunicación por fibra óptica con conectores.....	43

Figura 3.1	Señales de prevención de vías de tránsito.....	48
Figura 3.2	Algunos ejemplos de una señal de informativa luminosa.....	49
Figura 3.3	Una celda solar para utilización iluminación de calles.....	50
Figura 3.4	Semáforo común con la utilización de leds.....	50
Figura 3.5	Violetas y boyas para la utilización de carreteras o autopistas iluminadas.....	51
Figura 3.6	Diseño para un semáforo por medio de fibras ópticas.....	53
Figura 3.7	Diseño para un semáforo se una sola luz.....	54
Figura 3.8	Carretera de Inglaterra iluminada por medio de leds.....	54
Figura 3.9	Un tipo de Violeta de la carretera utilizando leds.....	55
Figura 3.10	La luz se escapa a través de los lados del cable de fibra óptica.	55

Figura 4.1	Circuito 4017 y 555 cada uno con sus entradas y salidas.....	56
Figura 4.2	Circuito completo para la construcción del semáforo.....	57
Figura 4.3	Circuito construido con leds de alta luminosidad.....	58
Figura 4.4	Circuito funcionando mostrando leds rojo, amarillo y verde.....	58
Figura 4.5	Molde encima de los leds.....	59
Figura 4.6	Molde que se muestra el funcionamiento de las fibras ópticas.....	59
Figura 4.7	Se muestra el molde donde va cada led.....	60
Figura 4.8	Molde terminado y puesto encima del circuito.....	60
Figura 4.9	Molde para sustituir a los leds por la parte de la fibra óptica.....	61
Figura 4.10	Modelo de cómo se utilizan en las vías del tránsito.	61
Figura 4.11	Las fibras ópticas se colocan el molde y hacia el semáforo.	62
Figura 4.12	En la figura se muestra que el circuito se encuentra debajo del molde.....	62
Figura 4.13	-El semáforo armado con la fibra óptica.....	63
Figura 4.14	-El semáforo simulando estar en la noche.....	63
Figura 4.15	Modelo de iluminación en las vías del tránsito.	64
Figura 4.16	Kit para iluminar las señales.	64
Figura 4.17	Simulación de la carretera iluminada.	65
Figura 4.18	Señal para dar vuelta.	65
Figura 4.19	Las señales iluminadas ambas.....	66
Figura 4.20	Simulación de cómo se vería las vías de tránsito iluminadas en la noche..	66
Figura 4.21	Ala izquierda se muestra la fibra óptica sin ningún golpe ni pérdida de luz..	67
Figura 4.22	Semáforo de lámparas incandescentes verde y rojo..	69
Figura 4.23	Semáforo de lámparas luces LED verde, amarillo y rojo..	70
Figura 4.24	Bolsa, Minitop, tops y cortinas iluminadas con fibra óptica.	71
Figura 4.25	Un cuarto de un restaurante puede cambiar a varios colores.	71
Figura 4.26	Las escaleras de una casa y la piscina.	72
Figura 4.27	Letreros iluminados.	72
Figura 4.28	Focos de fibra óptica para hogares.	72

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Evolución de la atenuación en fibras ópticas.....	41
Tabla 3.1	Tabla comparativa entre un led y un foco convencional.....	51
Tabla 3.2	Tipos de materiales para la construcción del diodo.....	52
Tabla 4.1	Comparación de costos de Neón y fibra óptica.....	68

Capítulo 1

Introducción

En este mundo podemos apreciar muchos medios de comunicación que toman un papel primordial en la sociedad, estos dependen de la información, los cuales deben esparcir esta información para esto se requiere algo primordial para este propósito en este caso entra la fibra óptica la cual desempeña un papel preponderante en el futuro. En esta tesis se introduce un desarrollo de sistemas de información, así como poder descubrir el dominio de las fibras ópticas y aplicarlas en la sociedad para mayor comodidad de las personas que cotidianamente están en constante movimiento con la información.

Esta tesis va dirigido a alumnos y maestros para el área de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de comunicación que buscan una visión introductoria de fibra óptica así como sistemas de información, vías de tránsito con sistemas ópticos, así como diseños con la utilización de fibra óptica.

1.1 Antecedentes históricos de las fibras ópticas

La Luz es una forma de energía llamada “Energía radiante”. Las otras formas de energía radiante son las ondas radioeléctricas, los rayos infrarrojos, los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

En algunos estudios en física enfocados en la óptica, se descubrió un nuevo modo de empleo para la luz llamado rayo láser. Este último es usado con mayor vigor en el área de las telecomunicaciones debido a lo factible que es enviar mensajes con altas velocidades y con una amplia cobertura. Sin embargo, no existía un conducto para hacer viajar los fotones originados por el láser.

La posibilidad de controlar un rayo de luz, dirigirlo hacia una trayectoria recta se conoce desde hace mucho tiempo. En 1820, Augustin-Jean Fresnel ya conocía las ecuaciones por las que rige la captura de la luz dentro de una placa de cristal lisa, su ampliación a lo que entonces se conocía como cables de vidrio, fue obra de D. Honders y Peter Debye en 1910. El físico irlandés John Tyndall descubrió que la luz podía viajar dentro de un material (agua), curvándose por reflexión interna y en 1870 demostró sus estudios a los miembros de la Royal Society. A partir de este principio se llevaron a cabo una serie de estudios, en los que demostraron el potencial del cristal como medio eficaz de transmisión a larga distancia. Además, se desarrollaron una serie de aplicaciones basadas en dicho principio para iluminar corrientes del agua en fuentes públicas. Más tarde J.L. Baird registró patentes que describían la utilización de bastones sólidos de vidrio en la transmisión de luz, para su empleo en un primitivo sistema de televisión de colores. El gran problema, sin embargo, es que las técnicas y los materiales usados no permitían la transmisión de luz con buen rendimiento. Las pérdidas eran tan grandes y no había dispositivos de acoplamiento óptico.

Solamente en 1950 las fibras ópticas comenzaron a interesar a los investigadores, con muchas aplicaciones prácticas que estaban siendo desarrolladas. En 1952, el físico Narinder Singh Kapany, apoyándose en los estudios de John Tyndall, realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica.

Uno de los primeros usos de la fibra óptica fue emplear un haz de fibras para la transmisión de imágenes, que se usó en el endoscopio médico. Usando la fibra óptica, se consiguió un endoscopio semiflexible, el cual fue patentado por la Universidad de Michigan en 1956. En este invento se usaron unas nuevas fibras forradas con un material de bajo índice de refracción, ya que antes se impregnaban con aceites o ceras. En esta misma época, se empezaron a utilizar filamentos delgados como el pelo que transportaban luz a distancias cortas, tanto en la industria como en la medicina, de forma que la luz podía llegar a lugares que de otra forma serían inaccesibles. El único problema era que esta luz perdía hasta el 99% de su intensidad al atravesar distancias tan cortas como 9 metros de fibra.

Charles Kao, en su tesis doctoral de 1956, estimó que las máximas pérdidas que debería tener la fibra óptica, para que resultará práctica en enlaces de comunicaciones, eran de 20 dB/km.

El gran avance se produjo en 1970, cuando los investigadores Maurer, Keck, Schultz y Zimar que trabajaban para Corning Glass, fabricaron la primera fibra óptica aplicando impurezas de titanio en silicio, con cientos de metros de largo con la claridad cristalina que Kao y Hockman habían propuesto. Las pérdidas eran de 17 dB/km. Durante esta década las técnicas de fabricación se mejoraron, consiguiendo pérdidas de tan solo 0,5 dB/km.

En 1980, las mejores fibras eran tan transparentes que una señal podía atravesar 240 kilómetros de fibra antes de debilitarse hasta ser indetectable. Pero las fibras ópticas con este grado de transparencia no se podían fabricar usando métodos tradicionales. El gran avance se produjo cuando se dieron cuenta de que el cristal de Silicio puro, sin ninguna impureza de metal que absorbiese luz, solamente se podía fabricar directamente a partir de componente de vapor, evitando de esta forma la contaminación que inevitablemente resultaba del uso convencional de los crisoles de fundición. El progreso se centraba ahora en seleccionar el equilibrio correcto de componentes del vapor y optimizar sus reacciones. La tecnología en desarrollo se basaba principalmente en el conocimiento de la termodinámica química, una ciencia perfeccionada por tres generaciones de químicos desde su adopción original por parte de Willard Gibbs en el siglo XIX.

También en 1980, la AT&T presentó a la Comisión Federal de Comunicaciones de E.E.U.U. un proyecto de un sistema de 978 kilómetros que conectaría las principales ciudades del corredor de Boston a Washington. Cuatro años después, cuando el sistema comenzó a funcionar, su cable, de menos de 25 centímetros de diámetro, proporcionaba 80.000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. Para entonces, la longitud total de los cables de fibra únicamente en E.E.U.U. alcanzaba 400.000 kilómetros (lo suficiente para llegar a la luna).

Pronto, cables similares atravesaron los océanos del mundo. El primer enlace transoceánico con fibra óptica fue el TAT-8 que comenzó a operar en 1988, usando un cristal tan transparente que los amplificadores para regenerar las señales débiles se podían colocar a distancias de más de 64 kilómetros. Tres años después, otro cable transatlántico duplicó la capacidad del primero. Los cables que cruzan el Pacífico también han entrado en funcionamiento. Desde entonces, se ha empleado fibra óptica en multitud de enlaces transoceánicos o entre ciudades, y paulatinamente se va extendiendo su uso desde las redes troncales de las operadoras hacia los usuarios finales.

Hoy en día, debido a sus mínimas pérdidas de señal y a sus óptimas propiedades de ancho de banda, la fibra óptica puede ser usada a distancias más largas que el cable de cobre. Además, la fibra por su peso y tamaño reducido, hace que sea muy útil en entornos donde el cable de cobre sería impracticable.

1.2 Objetivo

De manera general en la actualidad no sólo se necesita innovar sino en cuestión de tiempo, requerir agilizar las que están en uso continuo para poder tener modelos más eficientes y ahorradores en el ámbito de energía eléctrica. De esta manera se tiene otras alternativas en vías de información luminosas en calles, carreteras y vialidades, así como vías de transito que estas puedan ser eficientes.

1.3 Justificación

El objetivo del presente trabajo es la aplicación de fibra óptica para uso en sistemas de vialidades para el ahorro de energía eléctrica en este ambiente.

Al momento de escoger la tesis tuve que plantearme algunas preguntas para poder seguir realizándola, en las cuales tendría que seleccionar el tema de la tesis para poder analizarla y aplicarla lo más importante que conduzca hacia una mejor solvencia en un entorno social, científico y tecnológico.

Por otro lado, gran parte de escoger esta tesis es poder desarrollar varias ideas planteadas y llevarlas a la práctica en algunas sistemas de información que hay en la sociedad, que podrían ser sistemas de transito así como calles, carreteras y vialidades, no sólo desarrollarlas sino para poder innovar las que están en utilización en las ciudades o carreteras estatales o federales de nuestro país y encontrar una posible soluciones satisfactorias muchos modelos de transito.

Podemos conocer mucha utilidad en los medios de información vial así como en muchas señales luminosas, para que se cumplan todos los objetivos, desarrollando con creatividad y habilidad poder resolver los problemas planteados y no esos sino también los que pudieran salir al finalizar la tesis.

Además poder apreciar estos sistemas de información, no solo que facilitan a los usuarios a agilizar las vialidades, sino también para una posterior solución de problemas que permitan mejorar estos sistemas.

Realizando la presente tesis se podrá tener una alternativa eficiente de las señales en vialidades y tener una aplicación más de las fibras ópticas.

1.4 Metodología

En el desarrollo del presente trabajo de tesis se utilizó información de libros y de páginas de internet para comprender como se lleva a cabo la transmisión de señales por fibra óptica, de esta manera se elaboró los antecedentes de esta tesis en el capítulo 2.

A continuación se buscó los proveedores de fibra óptica y en particular de compañías que proporcionen fibra óptica con propósitos de iluminación a gran escala, afortunadamente se encontró y compró la fibra óptica necesaria para llevar a cabo los propósitos de esta tesis.

Después se investigó la evolución y construcción de señales viales, principalmente de semáforos. Con la información recabada se diseñó e implementó señales viales y semáforos pero utilizando fibra óptica como medio de iluminación que es el objetivo de este trabajo de tesis.

1.5 Organización de la tesis

En esta tesis se conforma por cinco unidades que contienen teoría, conceptos, diseños, aplicaciones y conclusiones. En el capítulo 1 puede plantear sólo una reseña histórica de esta además de una breve información personal concreta de la realización de la tesis y cuál será su uso final de esta.

En el capítulo 2, se plantea algunos conceptos básicos para la utilización de la fibra óptica así mismo como de la luz que incide en esta para una mejor utilización posterior de esta, además de tener los conocimientos necesarios para utilizarla.

En el capítulo 3 se realizarán diseños, de algunos modelos para la utilización de sistemas de información no sólo luminosos sino también como medios de señales aquí se puede plantear la realización de estos sistemas no sólo teóricamente sino también físicamente.

En el capítulo 4 se detallará el proceso de elaboración así como una descripción precisa del funcionamiento del sistema óptico, las características de uso a grandes rasgos.

En el capítulo 5 se enunciarán las conclusiones y algunas recomendaciones a seguir.

Capítulo 2

Antecedentes de Señales ópticas y luminosas

2.1 Importancia de las señales ópticas

En poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información. Este novedoso material vino a revolucionar los procesos de las telecomunicaciones en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias hasta multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica.

Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables sin ningún componente conductor y pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión. Tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no hay problemas debido a los cortos circuitos. Tienen un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar

la capacidad de transmisión con el fin de reducir el costo por canal; de esta forma es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre.

Otro objetivo es minimizar las pérdidas adicionales por cableado y las variaciones de la atenuación con la temperatura. Tales diferencias se deben a diseños calculados a veces para mejorar otras propiedades, como la resistencia mecánica, la calidad de empalme, el coeficiente de relleno (número de fibras por mm^2) o el costo de producción.

2.1.1 Historia de la fibra óptica

La comunicación con la fibra óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material.

Antes, en 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura.

Sin embargo, esta utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en la fuente denominada rayo láser.

Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica dirigieron sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la fibra óptica. En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación.

Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata en realidad de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros.

El concepto de las comunicaciones por ondas luminosas ha sido conocido por muchos años. Sin embargo, no fue hasta a mediados de los años setenta que se publicaron los resultados del trabajo teórico. Estos indicaban que era posible confiar un haz luminoso en una fibra transparente flexible y proveer así un análogo óptico de la señalización por alambres electrónicamente.

El problema técnico que se había de resolver para el avance de la fibra óptica residía en las fibras mismas, que absorbían luz que dificultaba el proceso. Para la comunicación práctica, la fibra óptica debe transmitir señales luminosas detectables por muchos kilómetros. El vidrio ordinario tiene un haz luminoso de pocos metros. Se han desarrollado nuevos vidrios muy puros con transparencias mucho mayores que la del vidrio ordinario. Estos vidrios empezaron a producirse a principios de los setenta.

Este gran avance dio ímpetu a la industria de fibras ópticas. Se usaron láseres o diodos emisores de luz como fuente luminosa en los cables de fibras ópticas. Ambos han

de ser miniaturizados para componentes de sistemas fibroópticos, lo que ha exigido considerable labor de investigación y desarrollo. Los láseres generan luz "coherente" intensa que permanece en un camino sumamente estrecho. Los diodos emiten luz "incoherente" que ni es fuerte ni concentrada. Lo que se debe usar depende de los requisitos técnicos para diseñar el circuito de fibras ópticas dado.

2.1.2 Óptica geométrica

La propagación de la luz en una fibra óptica puede analizarse mediante el empleo de las leyes de la óptica geométrica. Esta primera aproximación permite definir simplemente una característica importante de la fibra óptica: su apertura numérica. La luz se compone de ondas electromagnéticas que se propagan en el vacío a una velocidad v del orden de 300 000 km/s. Estas ondas transportan energía y se caracterizan por sus frecuencias de oscilación f ; así mismo, pueden determinarse por medio de otro parámetro: la longitud de onda λ , que se define como la relación entre su velocidad de propagación y su frecuencia.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

Si su longitud de onda está comprendida entre $0.4 \mu\text{m}$ ($4 \times 10^{-7}\text{m}$) y $0.8 \mu\text{m}$ ($8 \times 10^{-7}\text{m}$), las ondas electromagnéticas tienen la particularidad de excitar al ojo humano, y de esta forma ser visibles. En tal caso se le designa con el nombre de luz.

La óptica es la parte de la física que estudia las propiedades de la luz. Si sólo se tiene en cuenta las trayectorias seguidas por la luz (los rayos), sin considerar la naturaleza física de las ondas electromagnéticas, entonces su estudio pertenece al campo de la óptica geométrica.

2.1.2.1 Reflexión y refracción de la luz

La luz puede transmitirse, reflejarse o refractarse en la superficie de separación que existe entre dos medios diferentes (aire, vidrio, plástico, etc.), es decir, su dirección inicial sufre una desviación. En seguida se observarán las principales propiedades de la reflexión y de la refracción de la luz.

Leyes de la reflexión

- a) Si la luz incide sobre un espejo (en general metálico), el ángulo de la reflexión θ_r , es igual ángulo de incidencia θ_i , (figura 2.1). Los ángulos se midieron con respecto a la perpendicular a la superficie reflectora (AN), en el punto de incidencia A. Esta recta se llama la normal a la superficie en el punto A.
- b) El rayo incidente R_i , el rayo reflejado R_r y la normal AN pertenecen a un mismo plano llamado plano de incidencia.

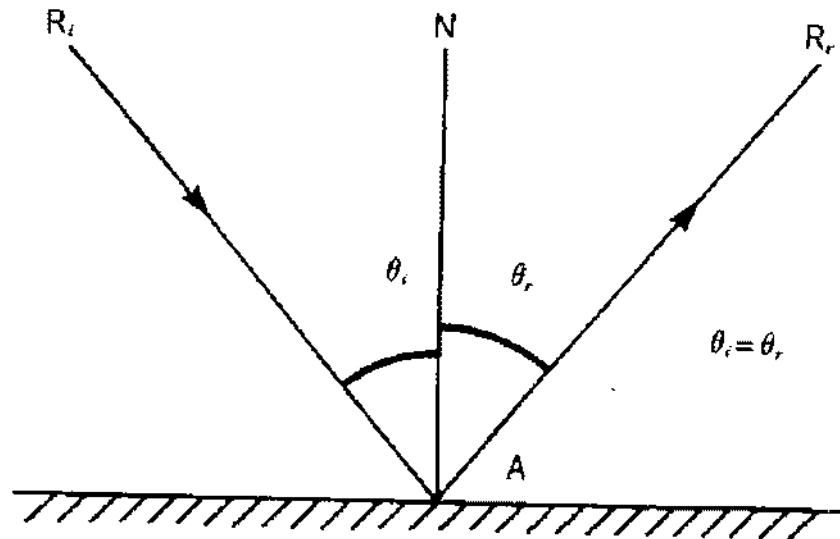


Figura 2.1. Reflexión de la luz en un espejo. $\theta_i = \theta_r$.

Leyes de la refracción

- a) En un medio dieléctrico (aislante eléctrico), la luz se propaga a una velocidad v menor, en comparación con la que alcanza en el vacío. La velocidad de propagación en el vacío (c), es aproximadamente igual a 300 000 km/s (3×10^8 m/s). La relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad en el dieléctrico se llama índice de refracción del dieléctrico. Este índice de refracción n es una característica específica del medio. Se tiene entonces:

$$\frac{c}{v} = n \quad \text{con } n > 1 \quad (2.2)$$

- b) La luz se desvía (se refracta) cuando atraviesa la interfaz de dos diferentes medios dieléctricos (cuyos índices son n_1 y n_2), de tal forma que (figura 2.2)

- El rayo incidente R_1 , el rayo refractado R_2 y la normal AN están en un mismo plano llamado plano de incidencia.
- La relación entre el seno del ángulo de incidencia θ_1 y el seno del ángulo de refracción θ_2 es constante y se define por:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{o} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

La cual se conoce como *Ley de Snell*

Consecuencias de las leyes de refracción

1) Cuando $n_1 < n_2$ (ver figura 2.3)

La luz pasa de un medio a otro que tiene un índice mayor (por ejemplo del aire al vidrio)

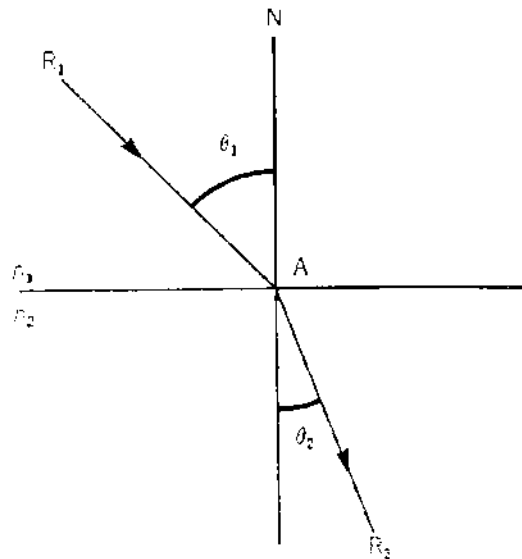


Figura 2.2. Refracción de la luz

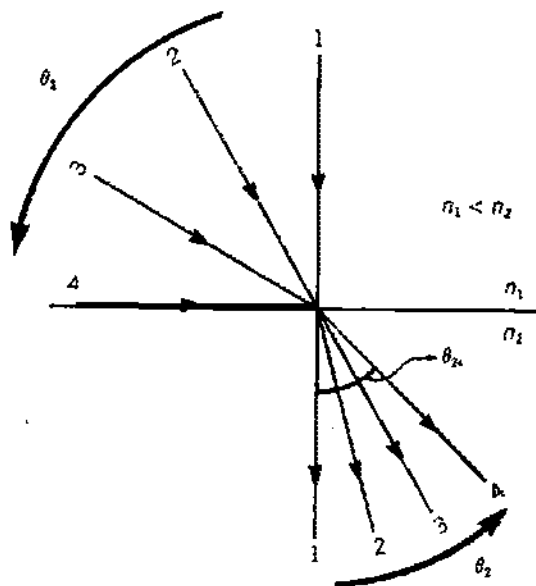


Figura 2.3. Ángulo crítico de refracción ($n_1 > n_2$), cuando θ_1 aumenta, θ_2 pero no sobrepasa a θ_{2c} .

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

En este caso existe un valor máximo del ángulo de refracción θ_{2c} , el valor que corresponde a $\sin \theta_1 = 1 (\theta_1 = 90^\circ)$.

$$\theta_{2c} = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (2.4)$$

θ_{2c} se conoce como el ángulo crítico de refracción

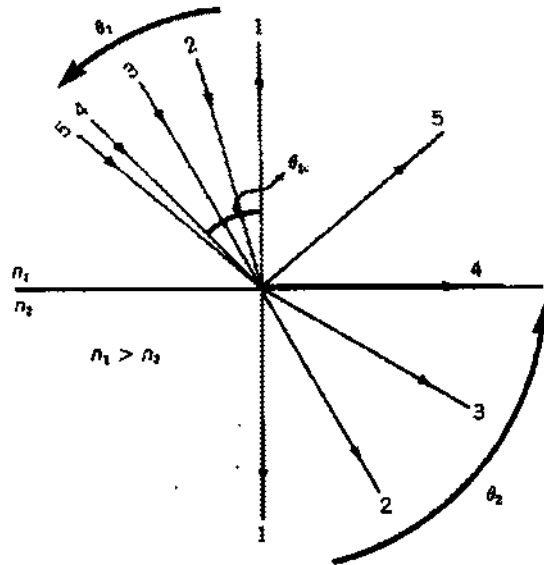


Figura 2.4. Reflexión total interna ($n_1 > n_2$), cuando θ_1 es mayor que θ_{1c} (rayo 5), la luz deja de ser refractada por lo que se refleja totalmente.

2) Cuando $n_1 > n_2$ (ver figura 2.4)

La luz pasa de un medio a otro que tiene un índice menor (por ejemplo del vidrio al aire)

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

Como la función seno no puede ser mayor que uno y la relación n_1/n_2 si lo es, entonces $\sin \theta_1$ tiene como límite superior a $\sin \theta_{1c}$.

$$1 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{1c}$$

$$\theta_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.5)$$

Si $\theta_1 > \theta_{1c}$, la luz no se refracta, por el contrario, se refleja totalmente en el medio original cuyo índice es n_1 . θ_{1c} se conoce como ángulo crítico o ángulo mínimo de reflexión total interna. Se tendrá entonces una reflexión total interna, si la luz alcanza la interfaz ($n_1 > n_2$) con un ángulo superior al ángulo crítico.

Estas nociones básicas de refracción y la reflexión interna total van a ser de gran ayuda para comprender la forma en que la luz puede propagarse en una fibra óptica.

2.1.2.2. Utilización de la reflexión total interna

La propagación de la luz entre dos puntos muy distantes entre sí debe hacerse necesariamente en un medio transparente y no a la atmósfera. Para que la luz permanezca en este canal material de transmisión, debe sufrir reflexiones cada vez que llegue a una interfaz entre el canal y el medio circundante, que suele estar constituido por aire. Supóngase que el canal de transmisión es una fibra de vidrio, para que la luz no pueda salir de la fibra, sólo basta recubrir la pared externa con una capa metálica. La luz experimenta reflexiones sucesivas sobre el espejo así creado, y luego se propaga en la fibra. Sin embargo, esta solución tiene un defecto que lo hace impracticable. En efecto en el momento de la reflexión sobre la superficie metálica, no se refleja toda la luz.

Una porción se pierde debido a la absorción del metal. Para un espejo de aluminio, está pérdida de reflexión es del orden del 10%. Por lo que, después de algunas decenas de reflexiones, prácticamente ya no hay luz.

Existe otra forma de confinar la luz, a saber: la reflexión total interna. En la fibra de vidrio ($n = 1.5$), cuando la luz alcanza la interfaz vidrio-aire con un ángulo mayor que 41.8° , se refleja totalmente hacia el interior de la fibra. De esta forma, la luz podrá propagarse a todo lo largo de la fibra, gracias a una serie de reflexiones totales internas. En seguida es necesario señalar que sólo se propagará la luz que llega a la interfaz con un ángulo mayor que 41.8° . Así pues, no todas las inclinaciones son adecuadas ($\theta > 42^\circ$), contrariamente a lo que sucede en la reflexión metálica (para cualquier valor de θ). Sin embargo, la reflexión total interna se hace sin pérdidas; ésta no ocasiona ninguna atenuación por lo que se toma en cuenta para transmisiones a larga distancia. (Ver figura 2.5)

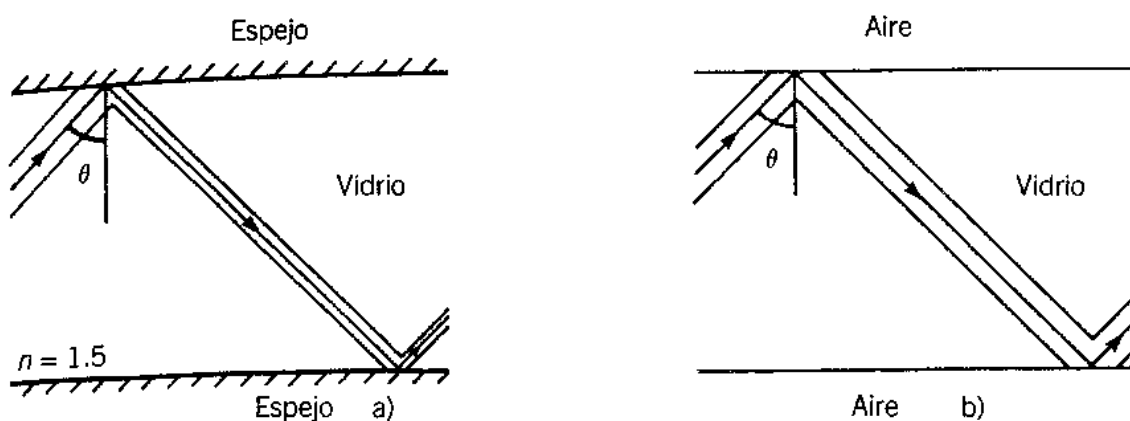


Figura 2.5. Propagación por medio de reflexiones a) Reflexiones sucesivas sobre espejos. θ puede ser cualquiera, aunque hay pérdida de luz en cada reflexión. b) Reflexiones internas totales; es necesario que $\theta > 42^\circ$, pero no hay ninguna pérdida de luz causada por la reflexión interna total.

La propagación mediante reflexión total interna permite explicar el fenómeno conocido con el nombre de fuente luminosa. A partir del hecho de que el índice de refracción del agua es mayor que el del aire. (Ver figura 2.6)

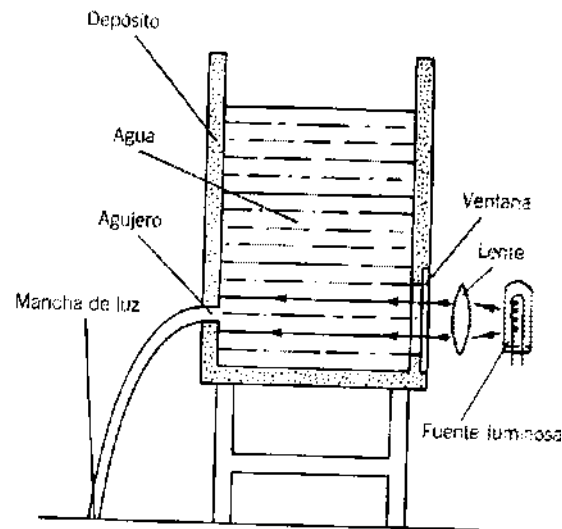


Figura 2.6. Fuente luminosa. La luz se propaga en línea recta, ¿Por qué hay una mancha de luz en el suelo?

2.1.2.3. Fibra óptica. Apertura numérica

Una fibra óptica es un cilindro de material dieléctrico transparente en el que el índice de refracción n_1 es superior al del medio circundante. Como el fenómeno de reflexión interna total se produce en la interfaz entre la fibra y el medio exterior, esta superficie debe definirse bien, no debe tener defectos. La luz que se propaga en la fibra óptica cumple las condiciones de la reflexión total, es decir: llega a la interfaz con un ángulo mayor que el ángulo crítico θ_{1c} . Si existe algún defecto en la interfaz tal vez esta condición no se cumpla, por lo que la luz puede refractarse fuera de la fibra y, en consecuencia perderse (ver figura 2.7).

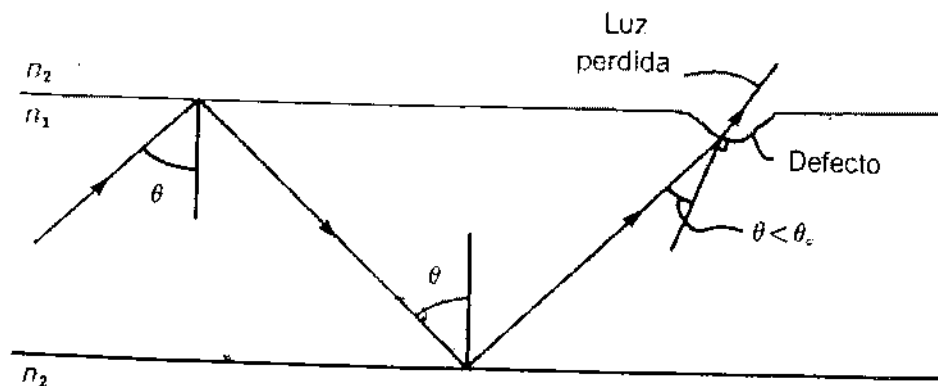


Figura 2.7. Efecto de una imperfección en la interfaz. Como $\theta < \theta_c$, en la imperfección, no hay reflexión interna total y la luz sale de la fibra.

Para evitar este inconveniente, se envuelve la fibra con otro dieléctrico, así que esta se presenta ahora en forma de dos cilindros concéntricos. El cilindro interno, con índice n_1 , se llama núcleo de la fibra. El cilindro externo, con índice n_2 , se conoce como la cubierta o vaina de la fibra.

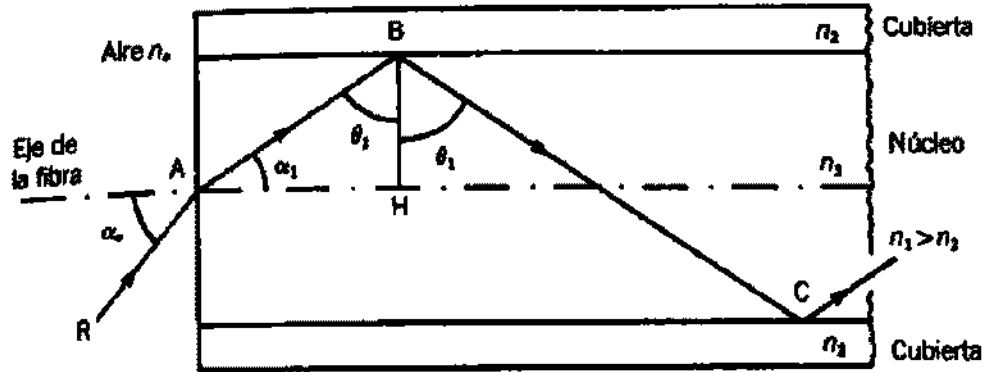


Figura 2.8. Corte longitudinal de una fibra óptica.

En la interfaz núcleo-cubierta se producirá la reflexión total interna. Por tanto, siempre es necesario que $n_1 > n_2$. (Ver figura 2.8 ilustra el corte longitudinal de una fibra de este tipo).

Un rayo luminoso R, procede de un medio con un índice n_o (pudiera ser el aire) penetra en la fibra en A. Este se refracta en ese punto. En B, el rayo experimenta una reflexión total, tendrá otra reflexión total en C y así sucesivamente. Por medio de una sucesión de reflexiones totales, la luz se propaga en zig-zag en la fibra. Se verá para cuales valores del ángulo de entrada α_o puede ocurrir la propagación.

En A, la Ley de Snell señala:

$$n_o \sin \alpha_o = n_1 \sin \alpha_1 \quad (2.6)$$

Para tener reflexión total en B (después C, D, etc.) se debe tener:

$$\sin \theta_1 \geq \frac{n_1}{n_2} \quad (2.7)$$

Como $\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 = 1$, la condición anterior puede escribirse también de la forma:

$$\cos \theta_1 \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} \quad (2.8)$$

Como $\cos \theta_1 = \sin \alpha_1$, puede escribirse:

$$n_o \sin \alpha_o = n_1 \cos \theta_1 \quad (2.9)$$

Se obtiene

$$\sin \alpha_o \leq \frac{1}{n_o} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.10)$$

La desigualdad establece el valor máximo del ángulo de entrada α_o , para que la luz pueda reflejarse totalmente en B y pueda, de esa forma, propagarse.

El ángulo máximo de entrada α_{oM} está dado por:

$$\sin \alpha_{oM} = \frac{1}{n_o} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.11)$$

Todo rayo luminoso que llegue a la cara de entrada de la fibra con un ángulo menor que α_{oM} se propagará. Esta luz está contenida en un cono, cuyo ángulo medio con vértice es α_{oM} llamado cono de admisión o cono de aceptación (ver figura 2.9)

En general, el medio que rodea a la fibra está constituido por aire y, por tanto, puede tomar $n_o=1.0$.

Entonces, el ángulo máximo de entrada está dado por:

$$\sin \alpha_{oM} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.12)$$

Este importante ángulo determina la capacidad de la fibra para propagar la luz. Por analogía con los instrumentos de óptica, se define un parámetro llamado apertura numérica geométrica de la fibra, y que es igual a $n_o \sin \alpha_{oM}$.

En este caso en que el medio externo sea el aire, la apertura numérica (A.N.) está dada por:

$$\text{A.N.} = \sin \alpha_{oM} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.13)$$

El concepto de apertura numérica es de extrema importancia, ya que corresponde a la propiedad de la fibra para recolectar la luz y propagarla. Por ejemplo, una fibra que tiene una apertura numérica de 0.3 propaga toda la luz que incide sobre su cara de entrada con un ángulo menor que, $\alpha_{oM} = \arcsin 0.3$, es decir, para todo ángulo menor que 17.5° aproximadamente. Como se observa en la ecuación anterior la apertura numérica de una fibra depende de los índices de refracción del núcleo (n_1) y de la cubierta (n_2), pero no de sus dimensiones. Por una parte, se podría aumentar A.N. si se escogieran los dos índices, y por consecuencia aumentar la cantidad de luz que puede entrar a la fibra, y por otra parte, se podría disminuir bastante las dimensiones de la fibra, lo que tendría como ventaja hacerla flexible.

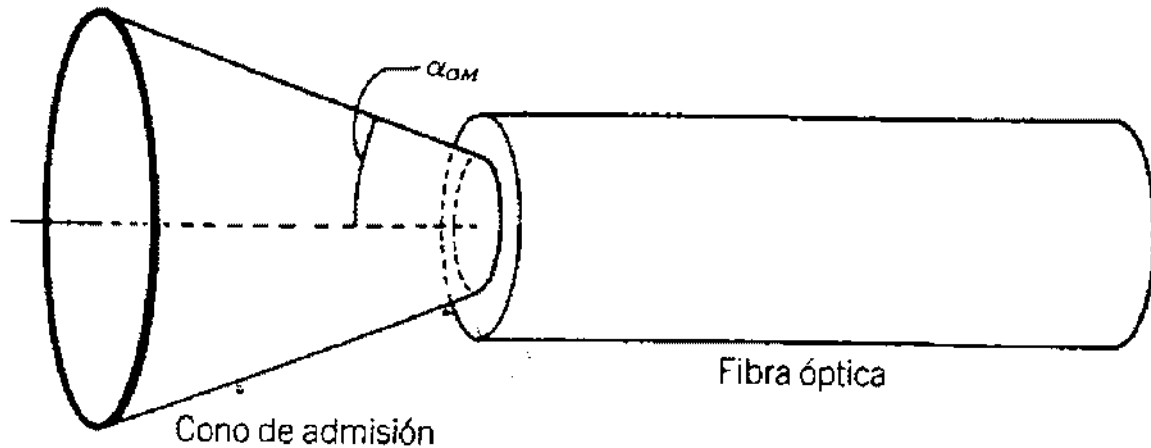


Figura 2.9. Cono de admisión de una fibra. Todo rayo de luz que entra con un ángulo α_o inferior a α_{oM} se propaga en la fibra.

2.1.3 Óptica Ondulatoria

Anteriormente no se tomó en cuenta la naturaleza de las ondas electromagnéticas que constituyen la luz. Sólo se examinaron las trayectorias seguidas por estas ondas; tal es el punto de vista de la óptica geométrica. Sin embargo, este enfoque es insuficiente, ya que no da información sobre las propiedades energéticas de la luz. Además, la óptica geométrica resulta menos válida cuando la luz tiene una longitud de onda comparable a las dimensiones del medio en el que se propaga. En tal caso, es necesario utilizar la teoría ondulatoria de la luz.

2.1.3.1. Noción de modo de propagación

La óptica geométrica muestra que la luz puede propagarse en una fibra por medio de la sucesión de reflexiones totales internas. Sin embargo, la naturaleza ondulatoria de la luz hace que existan interferencias entre diversas ondas en el interior de la fibra. Para que exista propagación efectiva de energía, estas interferencias deben ser constructivas, es decir, que no provoquen la anulación del campo eléctrico (o magnético) y por consecuencia de la energía. De hecho, esta condición de interferencia hace que ciertas direcciones de propagación que permitía la óptica geométrica, no puedan ocurrir en la realidad. Es lo que se va a demostrar por medio de un ejemplo simple, al utilizar la propagación entre dos planos en lugar de una fibra óptica.

Considérese una lámina de material dieléctrico de espesor a , con índice de refracción n_1 , sobre cuyas caras se han depositado dos capas de un medio dieléctrico, con índice n_2 inferior a n_1 . La luz se propaga y sufre reflexiones en A, B, C. (ver figura 2.10)

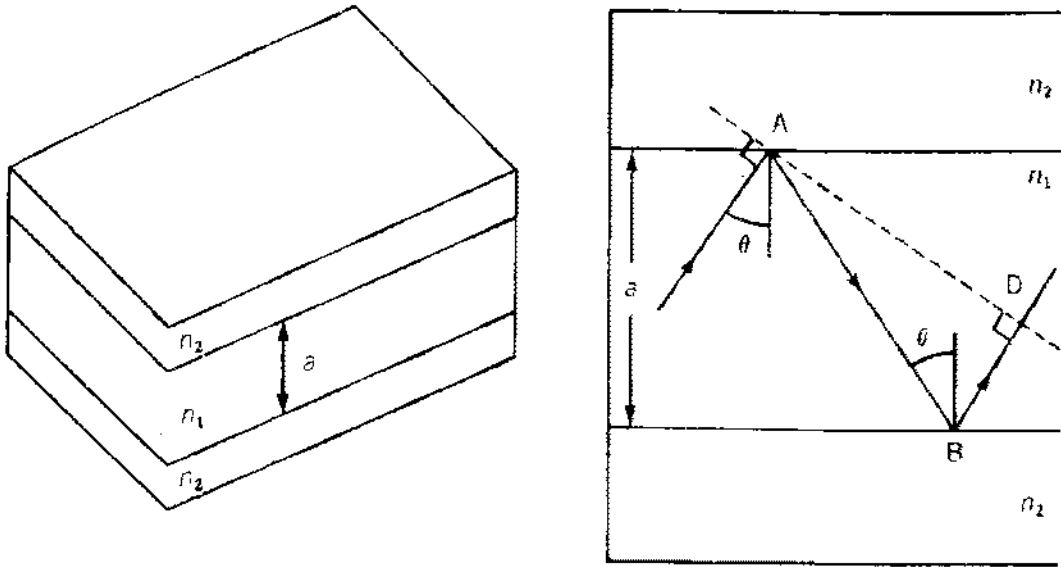


Figura 2.10. Guía de onda plana con espesor a .

Supóngase que una onda llega al punto A en un instante t . Su campo eléctrico E_1 se encuentra en un plano perpendicular a su dirección de propagación, indicado con línea punteada en la figura 2.10. La ecuación del campo eléctrico $E_2 = E_o \sin 2\pi f t$. Otra onda se propaga siguiendo la misma trayectoria, cuando llega a D tiene su campo eléctrico E_2 en el mismo plano punteado que la anterior. En esas condiciones habrá interferencia entre estos dos campos eléctricos en el plano punteado. Para que haya propagación de la energía, la interferencia entre estas dos ondas debe ser constructiva, es decir, las variaciones en el tiempo en los campos debe estar en fase. La onda que llegó a D sufrió dos reflexiones totales de más (en A y en B) que en la onda que llegó a A, y además recorrió la distancia A B D. La ecuación del campo eléctrico de esta onda puede escribirse: $E_2 = E_o \sin (\pi f t + \varphi)$ en donde φ es el defasamiento entre las dos ondas. Por consiguiente, hay un defasamiento φ .

$$\varphi = 2\varphi_1 + \varphi_2$$

φ_1 es el defasamiento introducido por una reflexión total;

φ_2 es el defasamiento introducido por la diferencia en el recorrido

Calcúlese φ_2 . La onda se propaga a la velocidad $v = c/n_1$. Un simple cálculo geométrico muestra que $A B D = 2a \cos \theta$. El tiempo tomado para recorrer A B D es entonces:

$$\Delta t = \frac{ABD}{v} = \frac{(2a \cos \theta)n_1}{c} = \frac{2n_1 a \cos \theta}{c}$$

El defasamiento φ_2 es igual a $2\pi f \Delta t = 2\pi \frac{c}{\lambda} \Delta t$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 a \cos \theta$$

El defasamiento total φ es entonces:

$$\varphi = 2\varphi_1 + \frac{4\pi}{\lambda} n_1 a \cos \theta$$

Para que la interferencia sea constructiva, el defasamiento debe ser un múltiplo de 2π

$$\varphi = 2\varphi_1 + 4\pi n_1 \frac{a}{\lambda} \cos \theta = 2\pi m \quad \text{con } m=0,1,2,\dots \quad (2.14)$$

Esta importante relación muestra que la propagación no puede producirse más que para ciertos valores del ángulo θ . Estas direcciones permitidas de propagación constituyen lo que se llama modos de propagación. A cada valor de m le corresponde un valor de θ y, por tanto, un modo. La relación (2.14) pone en evidencia cierto número de propiedades:

1. Mientras más grande sea el espesor a con respecto a λ ($a/\lambda \gg 1$), habrá más valores posibles de m que satisfagan la ecuación (2.14) y, por consecuencia, más modos. En tal caso, hay una multitud de ángulos posibles que constituyen una pseudocontinuidad de manera que se obtienen los mismos resultados que proporciona la óptica geométrica.
2. Inversamente, para una longitud de onda dada, si se disminuye el espesor se podrá hacer de tal forma que sólo pueda propagarse un modo. La óptica geométrica no permite llegar a este resultado.

Debe señalarse que los diversos ángulos posibles deben satisfacer igualmente las condiciones de la reflexión total. Se debe tener también:

$$\theta > \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

La teoría electromagnética de la reflexión total en la interfaz de dos medios dieléctricos con índices n_1 y n_2 muestra que el desfase φ_2 debido a esta reflexión aumenta cuando crece la diferencia de los índices ($n_1 - n_2$). Por tanto, se puede reducir el número de modos al disminuir esta diferencia de índices.

Los diversos resultados obtenidos en el caso de lo que se puede llamar una guía de onda plana son igualmente válidos para las fibras ópticas que son guías circulares de onda. Tómese el ejemplo de la guía de onda plana, debido a su sencillez geométrica.

El modo $m = 0$ corresponde a la propagación con $\theta = 90^\circ$, por lo que es paralela al eje de los planos, sin reflexión total. El coeficiente m se llama orden del modo. Los modos que corresponden a los valores pequeños de m , que sufren pocas reflexiones totales, se llaman modos de orden pequeños. Los que corresponden a los grandes de m se llaman modos de orden elevado.

2.1.3.2 Principales resultados de la teoría modal

Una fibra óptica es una guía de onda de forma cilíndrica. Las propiedades de conducción sólo pueden determinarse con rigor si se aplican las ecuaciones de Maxwell

en este medio dieléctrico de geometría cilíndrica. Es un problema complejo por lo que aquí sólo se darán los principales resultados prácticos de este estudio.

a) Modos de propagación.

Por causa de la geometría cilíndrica, los modos (ondas) que se propagan en una fibra óptica siempre tienen componentes de campos eléctricos o magnéticos a lo largo del eje de la fibra. Sin embargo, estos componentes longitudinales son menores que los componentes transversales.

Además de los modos normales que se propagan en el núcleo, ciertos modos – llamados modos de fuga– pueden propagarse si siguen parcialmente las trayectorias helicoidales en el núcleo de la fibra, pero sobre todo, si esto sucede en la cubierta. Su propagación depende de la naturaleza de la interfaz entre la cubierta y el exterior (aire o capa protectora de la fibra). Los modos pueden subsistir en distancias que varían desde algunos milímetros hasta varios metros, en función de las fibras.

b) Frecuencia normalizada.

Con el fin de generalizar y de poder comparar los fenómenos de propagación en las fibras que tienen radios de núcleo a diferentes, e índices de núcleo n_1 y de cubierta n_2 diferentes, se introduce un parámetro llamado frecuencia normalizada V definida como sigue:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.15)$$

Este parámetro puede asociarse con la apertura numérica geométrica A.N, que es un parámetro característico de la fibra.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (A.N.) \quad (2.16)$$

Igualmente se puede determinar el número de modos M .

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (2.17)$$

Para el caso precedente, el número de modos M es aproximadamente igual a 5 500.

c) Potencia transportada

La aplicación de la teoría electromagnética muestra que, para un modo dado en una fibra óptica, una parte de la potencia transportada se encuentra en la cubierta. La relación entre la potencia total del modo y la potencia transportada efectivamente en la cubierta aumenta a medida que el orden del modo disminuye. Esto tiene consecuencias en la fabricación de la fibra, ya que es necesario que la cubierta sea de muy buena calidad para evitar que se perturbe la propagación. Esto es tan cierto como el número de modos, casi toda la potencia óptica se transporta en el núcleo de la fibra; lo cual tiene concordancia con los resultados de la óptica geométrica para fibras cuyos diámetros son grandes con respecto a la longitud de onda.

d) *Acoplamiento de modos. Distancia de equilibrio.*

Al inyectar luz en una fibra óptica siguiendo una dirección determinada, se introduce un modo bien definido en la fibra. Quizá se piense que o se recobrarán más que este modo o esta dirección de propagación al final de la fibra. Esto sería cierto en el caso de una fibra ideal, sin defectos que hacen que se produzca una mezcla entre las diversas direcciones o ángulos de propagación permitidos; en esas condiciones se dice que hay acoplamiento de modos. Los defectos principales que pueden dar origen a este acoplamiento de modos son las microcurvaturas y la difusión.

i) **Microcurvas.** Durante la fabricación el diámetro de una fibra puede sufrir ligeras variaciones, lo que produce curvaturas en la interfaz núcleo-cubierta. (Ver figura 2.11)

Para un modo dado (θ_1 fijo), la reflexión total sobre la microcurvatura se hace con un ángulo θ_2 diferente θ_1 . Así se tiene un cambio de dirección y de modo. En el caso de la figura 2.11, el modo de orden elevado cambia de un modo de orden más bajo ($\theta_3 > \theta_1$). Lo contrario habría podido producirse ($\theta_3 < \theta_1$), pero si ($\theta_3 > \theta_{1c}$), la condición de reflexión total ya no se cumple, por lo que el modo penetra en la cubierta y se pierde para la propagación. Está tanto acoplamiento de modo como atenuación.

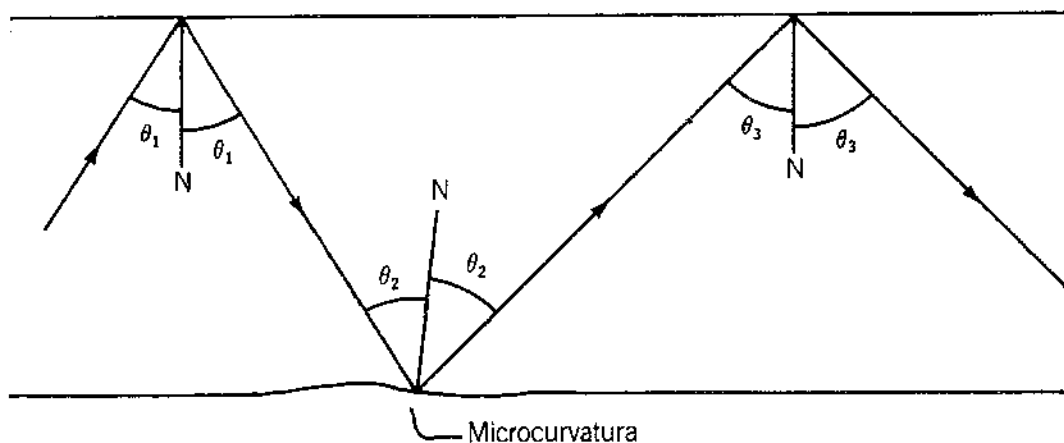


Figura 2.11. Acoplamiento de modos causados por una microcurvatura. El ángulo de reflexión total (θ) pasa del valor θ_1 al valor de θ_3 debido a la curvatura. Por tanto, no es el mismo modo antes que después de la microcurvatura.

ii) **Difusión.** Ciertos defectos en el núcleo de la fibra pueden reaccionar como centros de difusión (ver figura 2.12) un modo que llegue sobre dicho núcleo será absorbido y re-emitido en la misma longitud de onda, pero en direcciones diferentes a la dirección de llegada. El modo inicial se transformó en otros modos. Así como ciertas direcciones quizá no satisfagan las condiciones de reflexión total, se perderán ciertos modos para la propagación.

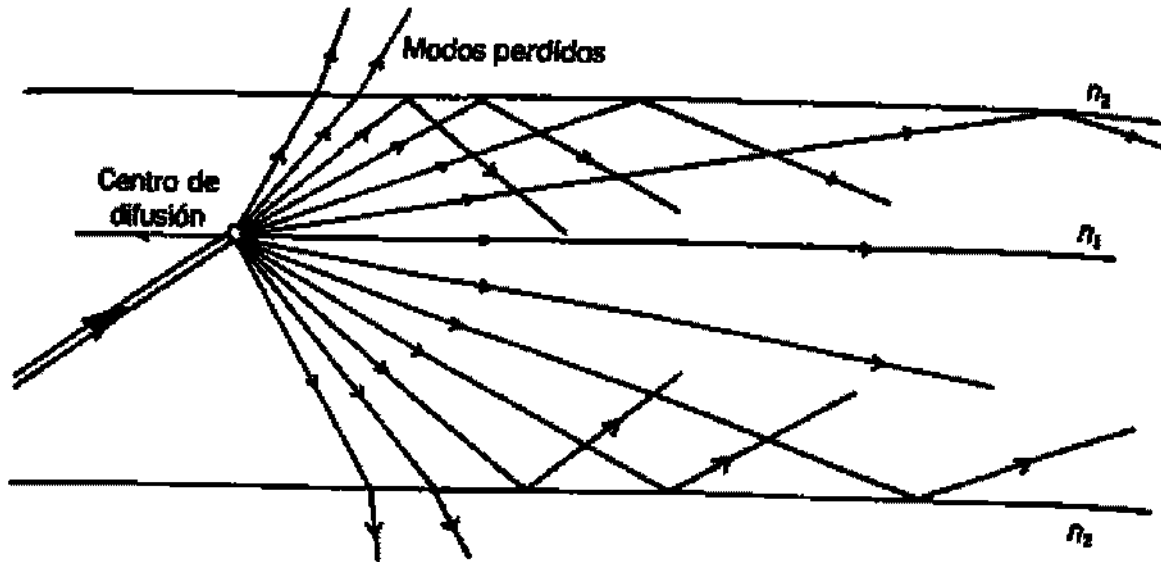


Figura 2.12. Acoplamiento de modos por un centro de difusión. El centro de difusión transforma un solo modo en muchos. Únicamente se propagarán los que obedezcan la ley de reflexión total.

Debido a la difusión y a las microcurvaturas, hay acoplamientos de modos en una fibra óptica. Si se tiene una distribución de modos en la entrada de la fibra, esta distribución se modificará. La modificación será mayor según aumente el número de defectos. A partir de cierta distancia en la fibra, la distribución de los modos no depende tanto de las condiciones de inyección de los modos, como de la propia fibra. Se dice entonces que se alcanzó la distancia de equilibrio L_{eq} de la fibra. Si la fibra presenta demasiados defectos por unidad de longitud, el acoplamiento de modos tiene lugar en una distancia corta. Una fibra de mala calidad tiene una distancia de equilibrio corta. La distancia de equilibrio puede variar desde unos cuantos metros hasta algunos kilómetros, según sea la calidad de la fibra.

2.1.4. Dispersión en una fibra óptica

En un sistema de telecomunicaciones, la fibra óptica constituye el canal de transmisión. Este canal debe estar en condiciones de transportar el máximo de información por unidad de tiempo. Como ya se había mencionado, la frecuencia de la luz posibilita una extraordinaria capacidad de transporte de información. Es importante saber si el hecho de canalizar la luz en una fibra no reduce la banda pasante del canal óptico, y comprender la forma en que se puede remediar este defecto

2.1.4.1. Definición de dispersión

La fibra óptica se utiliza como canal de transmisión de información; es necesario que la luz introducida a la fibra puede modularse a muy alta frecuencia, e igualmente el detector debe tener un tiempo de respuesta sumamente rápido para poder seguir la señal óptica procedente de la fibra. Es importante saber si la fibra tiene un ancho de banda

suficiente y ver cuáles serían los fenómenos físicos que pudiesen limitar esta banda de paso.

Se puede realizar la transmisión digital en la fibra óptica, en cuyo caso, la información que circula por la fibra tiene la forma de pulsos de luz. Al “cero” numérico – o señal baja- le corresponde una ausencia de luz, mientras que al “uno” numérico –o señal alta– le corresponde una presencia de luz. La información se transmite entonces por secuencias de pulsos luminosos en la fibra. Entre más pulsos luminosos por unidad de tiempo sea posible inyectar, mayor será la capacidad de transmisión de la fibra. Para que la información luminosa pueda utilizarse en un extremo de la fibra, es necesario, primero, que la atenuación de la luz no sea demasiado grande, y además que la información pueda reconocerse; es decir, que pueda distinguirse si la señal que llega es alta o baja. Es necesario que la información no haya sido modificada, de manera que puedan diferenciarse los pulsos. Si en la fibra se llega a producir un alargamiento en la duración de los pulsos luminosos, pueden mezclarse dos puntos sucesivos diferentes en la entrada de la fibra y con esto hacer que la información se pierda. (Ver figura. 2.13)

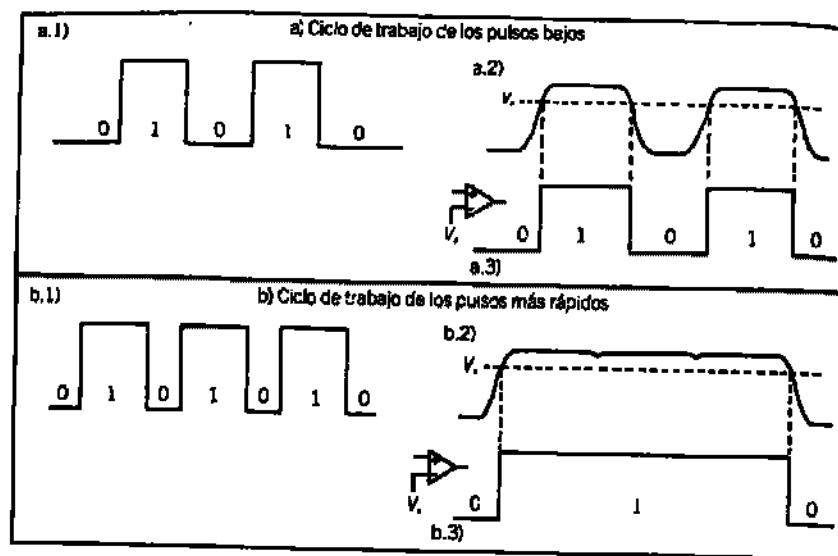


Figura 2.13. Pérdida de información debida al alargamiento de pulsión.

- a) Caso en el que el ciclo de trabajo del pulso es bajo: 1. Forma de los pulsos iniciales; 2. Forma de los pulsos alargados; 3. Forma de los pulsos reconstruidos con la ayuda de un comparador. (Cuando la amplitud del pulso es superior al umbral de detección V_r , la señal de salida del comparador es alta.) b) Caso en que el ciclo de trabajo de los pulsos es elevado: 1. Forma de los pulsos iniciales; 2. Forma de los pulsos alargados (hay superposición); 3. Forma de los pulsos reconstruidos; se perdió la secuencia 010101.

Este alargamiento de los pulsos obliga a aumentar el tiempo entre dos pulsos sucesivos, por tanto, a reducir su ciclo de trabajo y en consecuencia la capacidad de transmisión de información. A este alargamiento de los pulsos se le llama dispersión temporal, la cual limita la banda pasante. Las fibras ópticas presentan este inconveniente.

La duración del pulso luminoso aumentará durante su trayecto en la fibra. Veamos con mayor detalle cómo pueden asociarse el alargamiento del pulso luminoso y la capacidad de la fibra para transportar información.

Consideremos un sistema que emite pulsos de luz L de muy breves duraciones en una fibra óptica de longitud L , a una frecuencia f . Estos pulsos están separados por un $T = \frac{1}{f}$. En el otro extremo de la fibra, estos pulsos se alargan y alcanzan una longitud a media altura ΔT . (Véase la figura 2.14.)

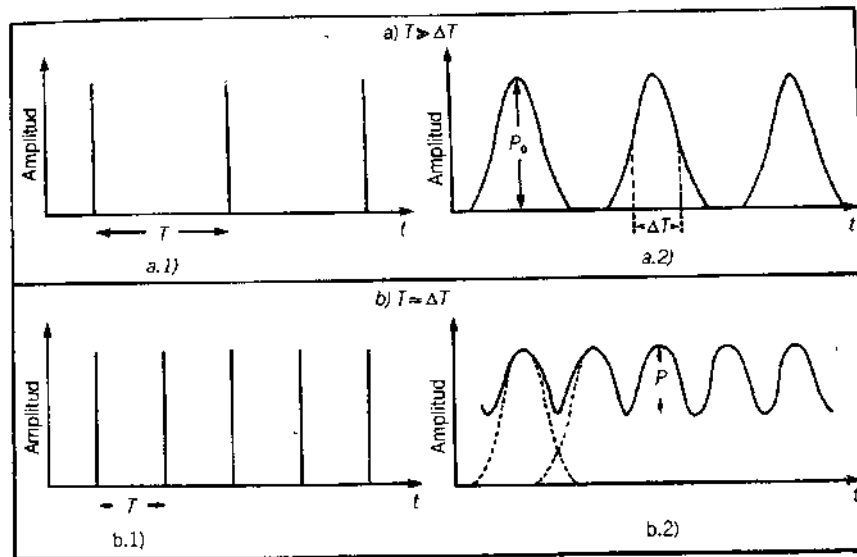


Figura 2.14. Variación de la amplitud de los pulsos, en función de la frecuencia, debido al alargamiento de los pulsos.

- Si el tiempo T entre dos pulsos es muy grande con relación a ΔT , los pulsos tienen una amplitud máxima (P_0).
- Si T es del orden de magnitud de ΔT , la señal no puede descender a cero entre dos pulsos, lo que reduce la amplitud de los pulsos (P)

Cuando $T \gg \Delta T$, en baja frecuencia, los pulsos de salida pueden distinguirse bien P_0 será la amplitud del pulso en este caso la figura 2.14^a. Si se aumenta la frecuencia f en un momento dado, los pulsos comenzarán a encimarse. La amplitud de los pulsos disminuye cuando la frecuencia aumenta como en la figura 2.14^b. Existe entonces una relación entre la frecuencia f , la longitud ΔT de los pulsos y su amplitud P . Se define la atenuación de la amplitud de los pulsos como:

$$A(\text{dB}) = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

Cuando $\Delta T \ll T$, se obtiene $\frac{P}{P_0} = 1$, es decir $A=0\text{dB}$

Después se tendrá que $A < A_0$ cuando los pulsos se confundan. La figura 2.15 muestra cómo varía A en función de la frecuencia.

Se puede definir una frecuencia f_c para la cual los pulsos se reducen a la mitad $P/P_0 = 0.5$, es decir $A = -3$ dB. Por analogía con los filtros electrónicos, se le asocia a esta frecuencia un ancho de banda Δf_1 igual a f_1 puesto que no hay frecuencia de corte de bajas. Entre más pequeña sea ΔT , más grande será Δf .

Para pulsos de formas gaussianas, lo que es generalmente el caso de las transmisiones por fibras ópticas, se puede hacer la siguiente aproximación:

$$\Delta f = \frac{0.35}{\Delta T} \quad (2.18)$$

donde Δf es la banda de paso a-3dB. Y ΔT es la longitud a media altura del pulso gaussiano. Se tiene otra aproximación cuando el pulso de salida posee una duración a media altura ΔT_1 ; si el pulso de llegada tiene una duración a media altura ΔT_1 el alargamiento del pulso ΔT está dado por:

$$\Delta T = (\Delta T_2^2 - \Delta T_1^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

El alargamiento provocado por la fibra reduce de manera considerable, en ese caso, la frecuencia máxima a la cual es posible emitir pulsos y, por tanto, limita la capacidad de una fibra para transportar información. Considérese ahora las razones de alargamiento del pulso luminoso en la fibra y obsérvese cómo se puede remediar este defecto.

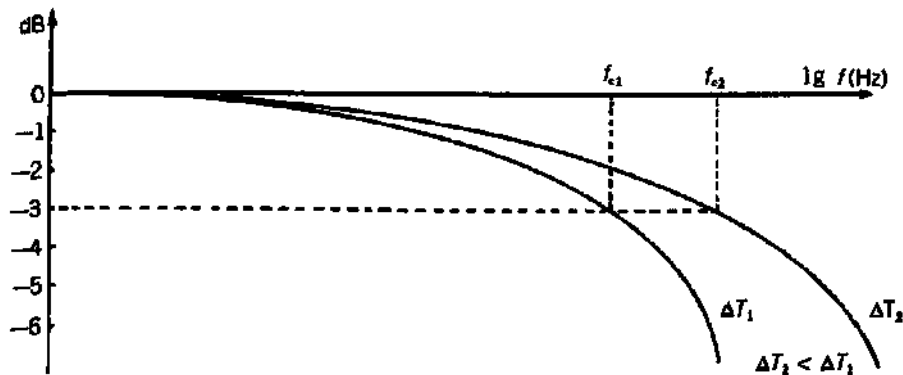


Figura 2.15. Variación de la atenuación de los pulsos (en dB), en función del logaritmo de la frecuencia de los pulsos, para dos valores ΔT_1 y ΔT_2 de la duración de los pulsos.

2.1.4.2. Dispersión modal

En una fibra óptica no todos los modos se propagan siguiendo las mismas trayectorias. Los modos de orden pequeño van prácticamente en línea recta, mientras que los de orden elevado reciben un gran número de reflexiones totales, así que tienen trayectorias en zig-zag.

Tómese una fibra óptica y calcúlese la diferencia entre las distancias recorridas por el modo cuyo orden es el más bajo, y aquel cuyo orden es el más elevado.

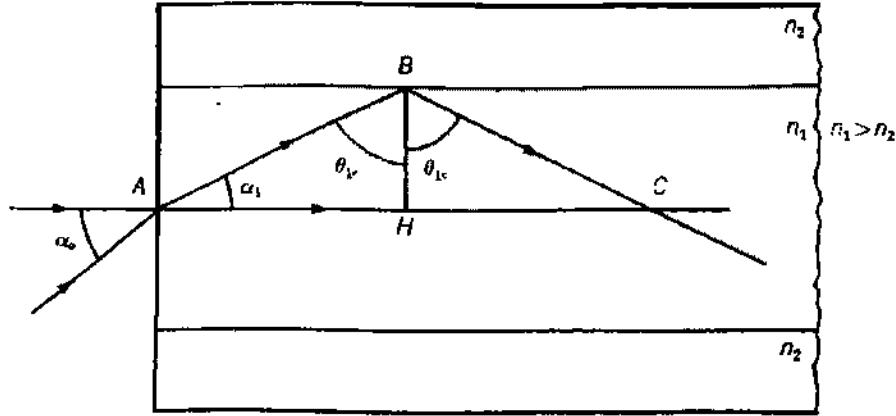


Figura 2.16. Corte longitudinal de una fibra

El primer modo considerado corresponde a una trayectoria paralela al eje de la fibra, es decir, sigue la dirección AC hasta el final de la fibra. El otro modo considerado es el que conserva el ángulo crítico límite para la reflexión total, el cual es $\theta_{1c} = \arcsen(n_2/n_1)$. Este modo sigue la trayectoria ABC y alcanza el final de la fibra por una sucesión de reflexiones totales sucesivas. Sobre el modo recorre la distancia AC y el otro la distancia ABC, que es igual a 2 AB. La relación entre las distancias recorridas por estos dos modos es:

$$\frac{2AB}{2AH} = \frac{AB}{AH} = \frac{1}{\sin \theta_{1c}} = \frac{n_1}{n_2}$$

Esta relación es la misma, independientemente del número de segmentos AH contenidos en la longitud total de la fibra. Este número es siempre muy grande, por lo que se puede decir que la relación es constante, sea cual fuere la longitud de la fibra.

Esta diferencia de tiempo que tardan los diversos modos en recorrer una longitud dada de fibra es la dispersión modal de una fibra.

Calcúlese el retardo máximo Δt_m que corresponde a una longitud AH de fibra. Sea t_{AH} el tiempo de recorrido de la distancia AH y t_{AB} el tiempo de recorrido de la distancia AB.

$$\Delta t_m = t_{AB} - t_{AH} = t_{AH} \left(\frac{t_{AB}}{t_{AH}} - 1 \right)$$

Como los dos modos viajan a la misma velocidad ($v = c/n_1$), se tiene:

$$\frac{t_{AB}}{t_{AH}} = \frac{AB}{AH} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$t_{AH} = \frac{AH}{v} = \frac{AH}{c} n_1$$

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{c} AH \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

Para una longitud de fibra cualquiera L, el retardo es:

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{c} L \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{n_1}{c} L \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right)$$

En el caso de una fibra para la cual es pequeña la diferencia entre los índices del núcleo y de la cubierta, se tiene:

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{c} L \Delta$$

(2.20)

Como en este caso se tiene que la A.N. $\approx n_1 \sqrt{2\Delta}$ se puede expresar el retardo en función de la apertura numérica.

$$\Delta t_m = \frac{L}{2cn_1} (A.N.)^2$$

(2.21)

Para una fibra como ésta, se calcula experimentalmente un retardo del orden de 20 a 30 ns por kilómetro. Esto se debe a que la medida obtenida experimentalmente no es la del retardo máximo dado por la fórmula, sino que es la del retardo medio de todos los modos. Además, debido al acoplamiento de los modos sobre los defectos, aún si se inyectara sólo el modo de orden más elevado se tendrían en la salida modos de orden menor y, por tanto, un retardo medio inferior al retardo que se hubiese obtenido sin acoplamiento de modos. El acoplamiento de los modos reduce, por consecuencia, la dispersión en una fibra óptica.

El retardo Δt_m aumenta linealmente con la longitud L de la fibra. Experimentalmente resulta que el retardo medio debido al acoplamiento de los dos, varía linealmente con la distancia L, cuando L es inferior a la distancia de equilibrio L_{eq} de la fibra. Para $L > L_{eq}$, el retardo medio varía proporcionalmente a la raíz cuadrada de la longitud L. (ver figura 2.17)

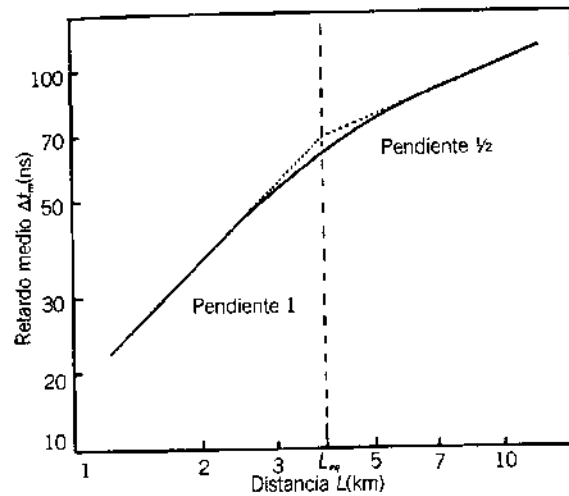


Figura 2.17. Variación del retraso medio modal Δt_m en función de la longitud L de la fibra. Variación lineal para $L < L_{eq}$.

2.1.4.3. Dispersión cromática

Las fuentes de la luz nunca fueron monocromáticas. La luz emitida por estas fuentes está constituida por la suma de ondas de diversas longitudes. (Véase figura 2.18)

El índice de refracción del material que forma a la fibra varía con la longitud de onda, lo que da por resultado una velocidad de propagación diferente para cada longitud de onda.

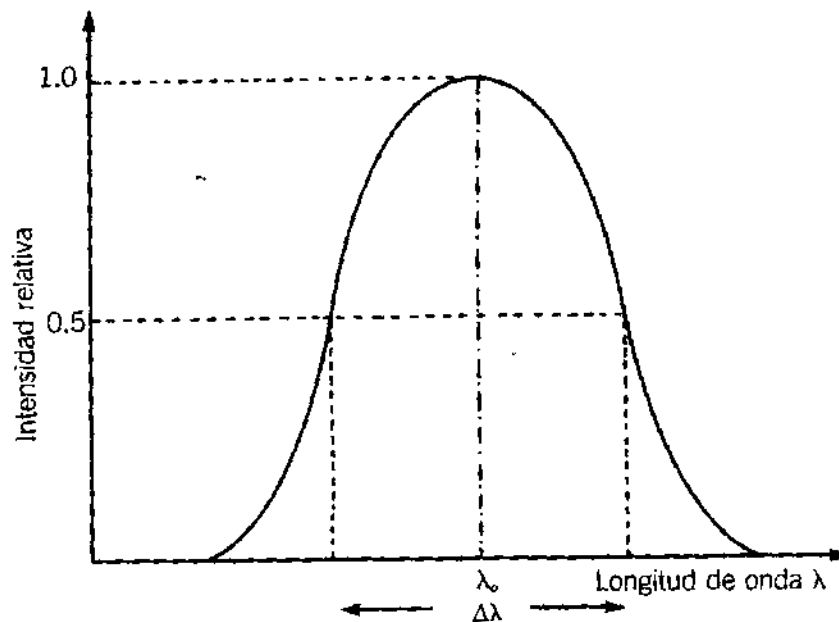


Figura 2.18. Distribución espectral de una fuente.

Si se inyecta de diversas longitudes en una dirección dada, esta luz se propaga a diferentes velocidades, según sea la longitud de onda, y si se descompone en función del tiempo, da como resultado un retardo entre las diferentes longitudes de onda en el extremo de la fibra, aun cuando se hayan inyectado en el mismo instante. A esta dispersión se le llama dispersión cromática o dispersión material. Es posible demostrar teóricamente que el retardo se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\Delta t_c = \frac{\lambda_o \Delta \lambda}{c} \left(\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)_{\lambda_o} (L) \quad (2.22)$$

donde λ_o es la longitud de onda central de la fuente; $\Delta \lambda$ el ancho de banda espectral de la fuente (ancho de banda a media intensidad); $\left(\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)_{\lambda_o}$ la segunda derivada del índice del núcleo en relación con la longitud de onda calculada a la longitud de onda; el retardo Δt_c debido a la dispersión cromática depende, por tanto, del ancho de banda de la fuente y de una propiedad física del núcleo de la fibra expresada por el término $\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$.

2.1.4.4. Reducción de la dispersión

La dispersión impone un límite a la capacidad de una fibra para transportar información. El retardo introducido por la dispersión determina una separación mínima al tiempo transcurrido entre dos pulsos sucesivos, o expresado en términos de frecuencia, hay una frecuencia máxima por arriba de la cual en la recepción se perderá la información transmitida a causa de la superposición de dos pulsos sucesivos. Como el retardo aumenta con la distancia, la frecuencia máxima se reduce a medida que la longitud de la fibra aumenta. De aquí el interés por disminuir la dispersión, con el fin de aumentar la capacidad de la fibra.

2.1.4.4.1 Fibra de índice gradual

La dispersión modal en una fibra óptica típica se había visto, se debe a la diferencia entre los tiempos de recorrido de los diferentes modos que se propagan en la fibra. Con el fin de igualar los tiempos de recorrido de los diferentes modos se utilizan fibras para las cuales el índice de refracción del núcleo n_1 no es el mismo en todo el núcleo, sino que disminuye gradualmente del centro del núcleo hacia la cubierta. La variación del índice con respecto a la distancia se conoce como perfil del índice y es de forma parabólica (véase la Fig. 2.19^a) Se le llama fibra de índice gradual a una fibra cuyo índice aumenta gradualmente de la cubierta hacia el centro del núcleo. A la fibra clásica se la llama fibra de índice escalonado, ya que el índice experimenta un salto ($n_2 < n_1$) cuando pasa por la cubierta al núcleo (véase la fig. 2.19).

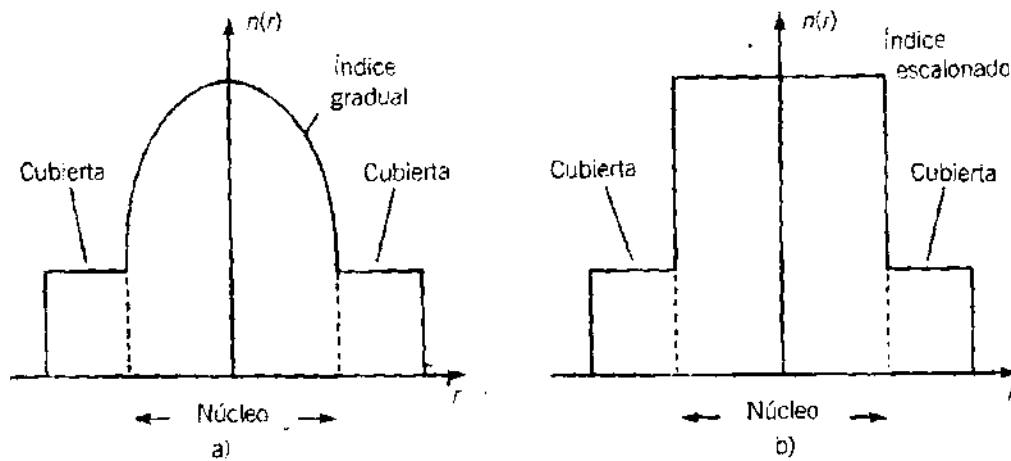


Figura 2.19. Perfil del índice: a) Fibra de índice gradual, b) fibra clásica de índice escalonado

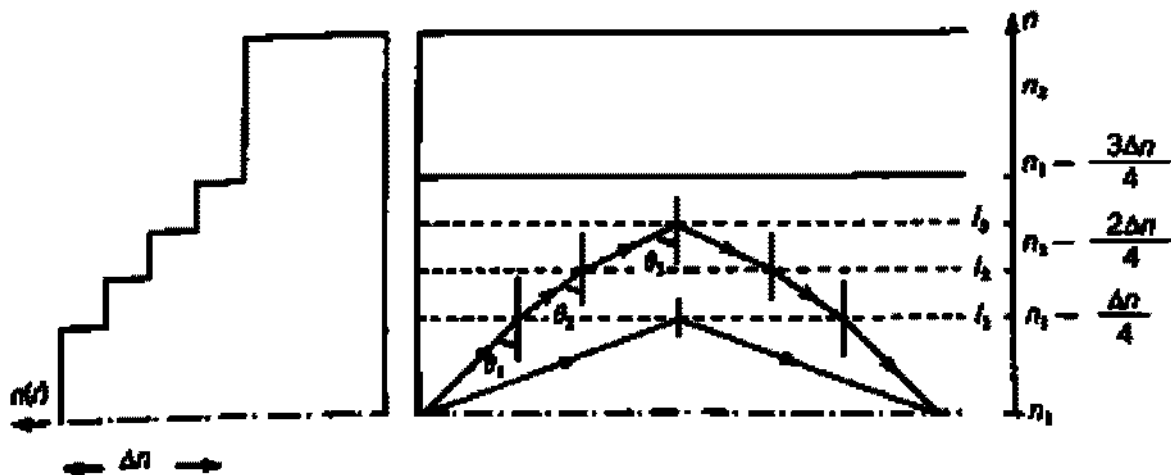


Figura 2.20. Fibra con cuatro escalones del índice.

Se verá cómo en una *fibra óptica de índice gradual* puede reducirse la dispersión modal. Para simplificar el razonamiento, imagínese que el índice del núcleo en el lugar de variar en forma continua del centro a la cubierta, disminuye en pequeños saltos sucesivos (véase la fig. 2.20). Supóngase primero que el índice tiene cuatro saltos sucesivos igualmente espaciados para pasar de n_2 hacia el valor máximo de n_1 (véase la fig. 2.20). Un rayo de luz que parte del centro de la fibra y se dirige hacia la cubierta se encontrará con tres escalones en el valor del índice. La luz pasa de un medio con índice elevado hacia uno de menor índice. Sobre la primera interfaz I_1 , la luz pasa de un medio con índice n_1 a otro con índice $n_1 - (\Delta n/4)$ donde $\Delta n = n_1 - n_2$.

Supóngase que $\theta_1 < \theta_{1c}$ lo que es fácilmente realizable cuando la diferencia de índice es pequeño. El rayo luminoso se refracta y abandona I_1 con un ángulo θ_2 más grande que θ_1 . Este rayo alcanza la interfaz I_2 con un ángulo θ_2 . Si se tiene que $\theta_2 < \theta_{2c}$, se produce la refracción nuevamente. En seguida se alcanza a I_3 con un ángulo θ_3 . Como θ_3 es muy grande, se puede tener reflexión total sobre I_3 , por lo que el rayo se regresa hacia el centro de la fibra mediante refracciones inversas. El rayo tiene entonces una curvatura gradual ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$).

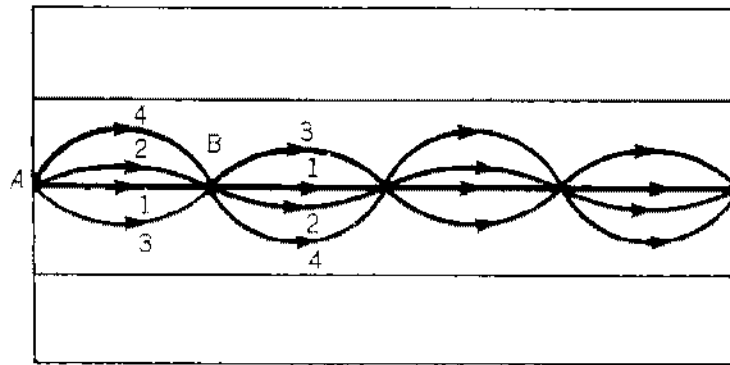


Figura 2.21. Trayectoria de los diferentes modos en una fibra de índice gradual.

Si el índice varía por 10 saltos sucesivos en lugar de 4, las diferencias entre los ángulos sucesivos serán más pequeñas. De esta forma se deduce que en el límite – cuando el índice varía en forma continua – la trayectoria, en lugar de formarse mediante variaciones de ángulos sucesivos y pequeños, es una curva continua. Si el ángulo inicial θ_1 es muy grande, se produce la reflexión total más rápido, y el rayo luminoso queda más cerca del centro del núcleo. Las trayectorias para una fibra de índice gradual tienen, por tanto, una forma como las que se muestran en la figura 2.21.

El rayo 1 (véase la fig. 2.21) se propaga en el centro del núcleo en línea recta. La distancia recorrida es corta pero la luz se propaga a baja velocidad porque el índice de refracción es máximo en el centro. El rayo 2 recorre una distancia un poco más larga que la del rayo 1. Sin embargo, su velocidad media es mayor puesto que se propaga en una zona del núcleo en donde el índice es más pequeño que en el centro. De hecho, si se escoge bien el perfil del índice del núcleo se puede hacer que las diferencias en la longitud de las trayectorias se compensen por las diferencias de velocidad. Así, los rayos luminosos que parten en el mismo instante del punto A, llegan al mismo tiempo a los puntos B, C... hasta el extremo de la fibra. Esto se produce sin importar cuál sea la trayectoria y, por tanto, sin importar cuál sea el modo. En una fibra como ésta, todos los modos tardan el mismo tiempo en recorrer la fibra y, como consecuencia, ya no se tiene dispersión modal.

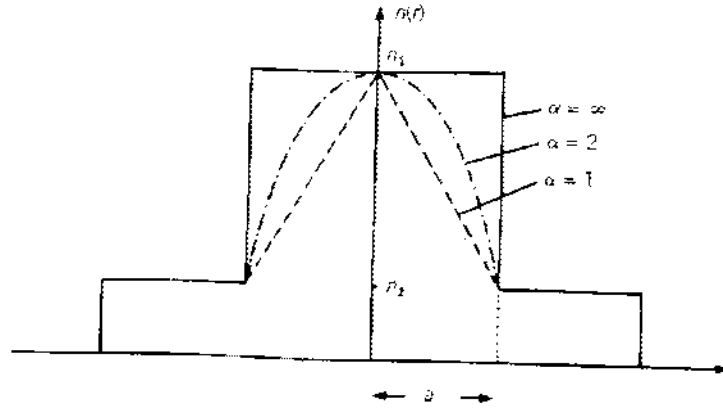


Figura 2.22. Perfiles del índice, para diferentes valores del parámetro α .

El perfil del índice puede describirse mediante una ecuación del tipo (véase la fig. 2.22):

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad 0 \leq r \leq a$$

$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta]^{1/2} \quad r \geq a \quad (2.24)$$

$$\text{con } \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1$$

Recuérdese que $(1-x)^b \approx 1 - bx$ si $x \ll 1$. En la ecuación (2.24), r es la distancia axial considerada a partir del centro de la fibra, α es un coeficiente que caracteriza al perfil, n_1 es el valor del índice del núcleo para $r = 0$, n_2 es el valor del índice de la cubierta, a es el radio del núcleo.

Para $\alpha = \infty$, $y(r/a) < 1$, se tiene $n(r) = n_1$. Se tiene por tanto, el perfil de una fibra de índice escalonado. Para $\alpha = 2$, el perfil de índice es parabólico y corresponde a una fibra de índice gradual. Para una fibra de índice gradual no se puede definir más que una apertura numérica local, puesto que el índice de refracción del núcleo está en función de la distancia r . Se tiene:

$$A.N. = \sin \alpha_{OM}(r) = \sqrt{n^2(r) - n^2(a)}$$

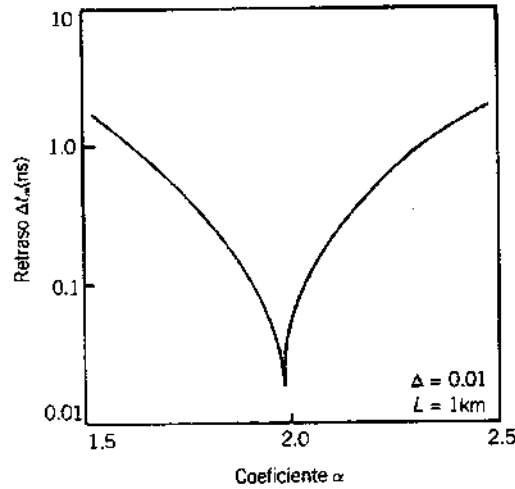


Figura 2.23. Variación del retraso modal Δt_m , en función del parámetro α . Δt_m es máximo para $\alpha = 1.98$. Cuando tiende al infinito Δt_m tiende a 50 ns, que es el retraso modal de una fibra de índice escalonado ($\alpha = \infty$).

La elección del perfil de índice (α) de acuerdo a la Fig. 2.23 es que la dispersión modal será mínima para $\alpha = 2(1 - \Delta)$.

Para una fibra, Δ es del orden del 1%. Es, por tanto, un perfil casi parabólico que dará la más baja dispersión modal. La dispersión modal es muy sensible a las variaciones de α . Las pequeñas variaciones de α alrededor del valor de α óptimo para las cuales se tiene el menor retraso Δt aumentan rápidamente la dispersión. Esta gran sensibilidad a las pequeñas variaciones de α hace que la fabricación de la fibra sea muy difícil, puesto que es necesario que el perfil real sea lo más cercano posible al perfil óptimo. Para un α óptimo, el retraso Δt_m está dado por la fórmula:

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{8c} \Delta^2 (L) \quad (2.24)$$

Por tanto, para una fibra de índice gradual, el retraso debido a la dispersión cromática es el que más influye sobre la dispersión total, aún en el caso de una fuente con pequeño ancho de banda espectral. Sin embargo, el índice de refracción varía con la longitud de onda, de modo que un perfil optimizado del índice, a una longitud de onda dada, no lo será para una longitud de onda vecina. Si la fuente de luz tiene un gran ancho de banda espectral (LED) –aún cuando la fibra se optimice para la longitud de onda central λ_0 de tal fuente– la dispersión será elevada debido a las contribuciones de las longitudes de onda diferentes a λ_0 . Un diodo láser que tiene un ancho de banda muy pequeño producirá una dispersión mucho menor.

En conclusión, la fibra de índice gradual reduce la dispersión modal. Sin embargo, la dispersión modal de tal fibra es muy sensible a las desviaciones del valor del coeficiente α en relación con el coeficiente α óptimo, lo que obliga a una cuidadosa fabricación de la fibra. Además, por causa de la variación del índice de refracción con

respecto a la longitud de onda, el perfil óptimo (α) depende de la longitud de onda. Por ello, es indispensable asegurarse de que la fuente utilizada en una longitud de onda de emisión λ_o corresponda a la de la fibra de dispersión mínima. Aún si esta condición se cumple, una fuente que tiene una longitud espectral $\Delta\lambda$, grande respecto λ_o , tendrá una dispersión más elevada que cuando dicha fuente tenga una longitud espectral pequeña. La fibra de índice gradual queda, sin embargo, sujeta a la dispersión cromática que predomina aun cuando la fibra se utiliza a una longitud cuyo perfil de índice se haya optimizado.

En la figura 2.24 se muestra una gráfica para obtener los parámetros a y Δ para una gráfica monomodo.

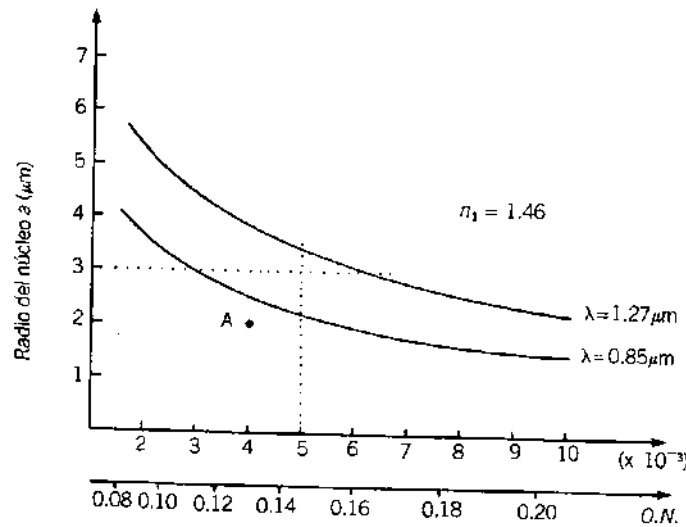


Figura 2.24. Fibra monomodo. Valores que deben tener los parámetros físicos a y Δ para que una fibra sea monomodo a una longitud de onda determinada.

2.1.4.4.2 Fibra monomodo

Ya que la dispersión en una fibra por salto de índice se debe a que los modos recorren trayectorias diferentes, una solución para reducir la dispersión es hacer que sólo se tenga un único modo en la fibra. La teoría modal aplicada a una fibra de índice escalonado demuestra que esta fibra no puede transportar más que un solo modo cuando la frecuencia normalizada V de la fibra es inferior o igual a 2.405.

Condición para que sólo haya un modo (fibra llamada monomodo):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \leq 2.405 \quad (2.26)$$

si $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ es pequeño, esta relación puede escribirse:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(A.N.) = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{1/2} \leq 2.405 \quad (2.27)$$

Para que una fibra sea monomodo a una longitud de onda determinada, se puede actuar ya sea sobre la dimensión a del radio del núcleo, o sobre la diferencia relativa de índice Δ . En la figura 2.24 se trazaron – para dos longitudes de onda (0.85 y 1.27 μm) – las curvas $(2\pi/\lambda) a n_1(2\Delta)^{1/2} = 2.405$.

Para una longitud de onda dada, por ejemplo $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, si el punto que corresponde a un radio a y una Δ dados se encuentra por debajo de la curva correspondiente, la fibra es monomodo.

Si $a = 3 \mu$ una fibra es monomodo:

- 1) si $\Delta < 3 \times 10^{-3}$ con $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$
- 2) si $\Delta < 6 \times 10^{-3}$ con $\lambda = 1.27 \mu\text{m}$

Si $\Delta = 5 \times 10^{-3}$ una fibra es monomodo:

- 1) si $a < 2.23 \mu\text{m}$ con $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$
- 2) si $a < 3.41 \mu\text{m}$ con $\lambda = 1.24 \mu\text{m}$

Si una fibra tiene una Δ grande ($\approx 10^{-3}$), debe tener un diámetro pequeño ($\approx 3 \mu\text{m}$ a $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$). Un núcleo de dimensión tan pequeña dificulta tanto la inyección de luz como la soldadura o conexión de dos fibras.

Si una fibra tiene una Δ muy pequeña ($\approx 10^{-4}$), su diámetro puede ser muy grande ($\approx 30 \mu\text{m}$ a $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$). Sin embargo, si Δ es muy pequeña, el ángulo crítico de reflexión total es muy grande ($\theta_{1c} \approx 89^\circ$). En tal caso, cualquier curvatura de la fibra hace que no se cumpla la condición de reflexión total $\theta > \theta_{1c}$, y se tenga una fibra muy sensible a las curvaturas y muy difícil de manipular o cablear, por lo que, en general, es necesario tomar una posición intermedia entre estos dos extremos. Se consideran como valores típicos de los diámetros los que varían entre 6 y 15 μm y las diferencias relativas de índice, las que varíen de 2×10^{-3} a 10^{-2} .

Entre más pequeño sea el orden del modo, mayor será la porción de potencia óptica transportada en la cubierta. Para $V = 2.405$, la potencia transportada en la cubierta es 16% de la potencia total del modo. Esta proporción aumenta de manera visible si $V = 2.405$, la potencia transportada en la cubierta es 16% de la potencia total del modo. Esta proporción aumenta de manera visible si V disminuye y puede alcanzar el 70% para $V = 1$. Debido a este fenómeno, es necesario que en una fibra monomodo se tenga un diámetro de cubierta 5 a 10 veces mayor que el del núcleo para evitar interacciones entre el modo y el revestimiento de la cubierta. Una fibra monomodo no tiene dimensiones externas muy diferentes a las de las fibras multimodos, aunque el diámetro del núcleo sea más pequeño. En una fibra monomodo no hay dispersión modal; la única dispersión que persiste es la cromática.

2.1.5. TRES PRINCIPALES TIPOS DE FIBRAS

La fibra clásica cuya fabricación es más fácil, es la fibra multimodo de índice escalonado. Esta tiene una gran dispersión y para reducirla se crearon otros dos tipos de fibras.

2.1.5.1 FIBRA DE INDICE ESCALONADO

La fibra de índice escalonado puede no tener cubierta; es la más simple, pero también la de menor eficiencia. (Véase la fig. 2.25)

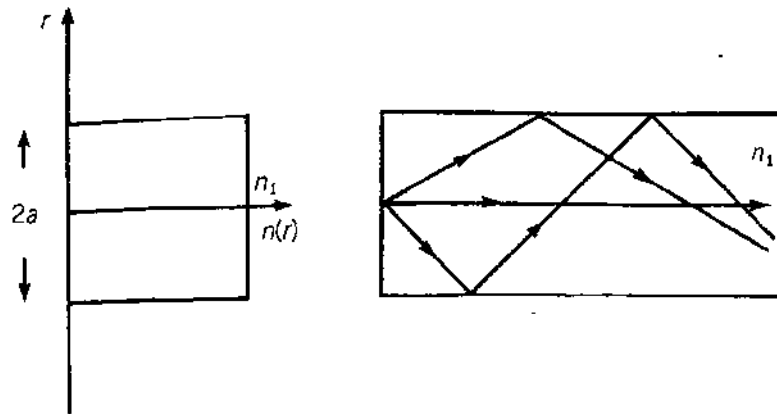


Figura 2.25. Fibra de índice escalonado sin cubierta.

Esta fibra puede tener un diámetro $2a$, hasta de un milímetro o más. La fibra de índice escalonado de buena calidad posee cubierta (véase la fig. 2.26)

Estas fibras, utilizadas por lo general para uniones de corta distancia, tienen diámetros del núcleo $2a$ que varían de 10 a 200 μm y diámetros de cubierta $2b$ que varían de 150 a 250 μm . Su apertura numérica es de alrededor de 0.3. Para un kilómetro de fibra el retraso Δt varía de 20 a 2 ns y la banda pasante de 20 a 200 MHz.

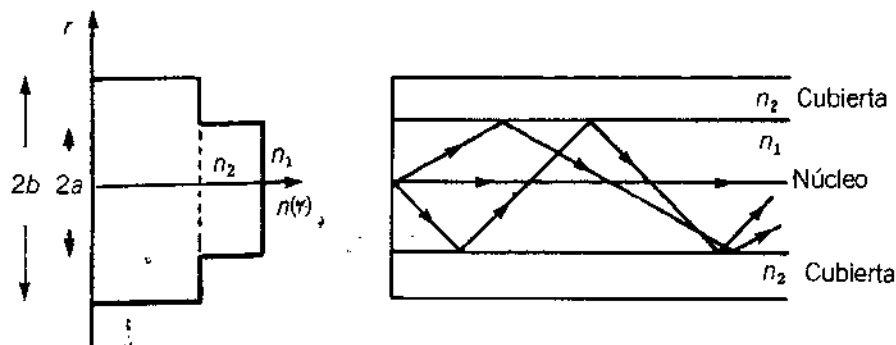


Figura 2.26. Fibra de índice escalonado.

2.1.5.2 LA FIBRA DE ÍNDICE GRADUAL

La fibra de índice gradual es más difícil de fabricar y se utiliza en los enlaces de más alta capacidad de información.

El perfil de índice es pseudoparabólico. El diámetro del núcleo $2a$ es generalmente de $50\mu\text{m}$. La apertura numérica es de alrededor de 0.2. El retraso está en función de la optimización del perfil del índice, del ancho de banda espectral y de la longitud de onda de la fuente luminosa utilizada. Para un kilómetro de fibra, el retraso Δt varía de 800 a 200 ps y la banda pasante de 500 a 1 500 MHz. (véase la fig. 2.27)

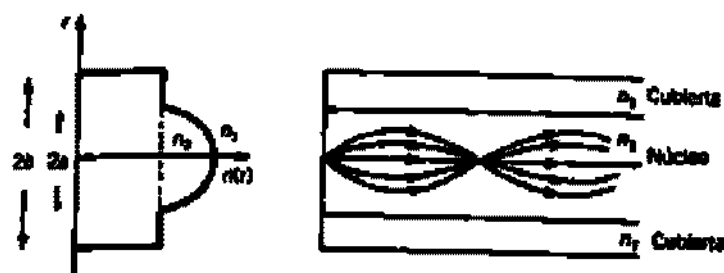


Figura 2.27. Fibra de índice gradual.

2.1.5.3 LA FIBRA MONOMODO

Este tipo de fibra que promete en las telecomunicaciones a gran distancia con elevada eficiencia, todavía permanece dentro del campo de las investigaciones. El diámetro del núcleo $2a$ es de alrededor de 6 a 8 μm , mientras que el diámetro de la cubierta es de 125 μm . La diferencia relativa de índice Δ es del orden de 0.005. Recuerdese que una fibra no es monomodo más que a una cierta longitud de onda, puesto que debe satisfacer la ecuación $\lambda \geq 3.69 a n_1 (\Delta)^{1/2} = \lambda_c$, λ_c se llama longitud de onda crítica de la fibra. (Véase la fig. 2.28)

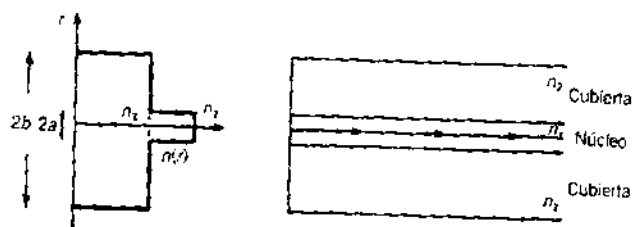


Figura 2.28. Fibra de índice monomodo.

Para este tipo de fibra se consideran posibles bandas pasantes superiores a los 50 GHz por kilómetro.

2.2 Dispositivos Luminosos

2.2.1 Canal de transmisión óptica

Entre más elevada sea la frecuencia de una onda electromagnética, mayor será la cantidad de información que ésta pueda transmitir. Esto justifica que los especialistas de telecomunicaciones piensen en utilizar frecuencias superiores a las de microondas, es decir, en el área del infrarrojo y del espectro visible. La frecuencia promedio de la luz visible es del orden de 3×10^{14} Hz, en donde existe un enorme potencial para transportar información. Como un canal de televisión necesita un ancho de banda de 6 MHz existe la posibilidad teórica de transportar sobre una sola vía de comunicación óptica la información originada por 50 millones de canales de televisión.

2.2.1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LOS PRIMEROS SISTEMAS ÓPTICOS

Como el hombre está provisto de detectores ópticos (sus ojos), utiliza desde hace mucho tiempo la luz como medio de comunicación. Los indios americanos se comunicaban mediante señales de humo que pudieran percibirse a grandes distancias. Asimismo, los fuegos encendidos sirvieron como señales para los ejércitos durante mucho tiempo.

Durante la Revolución Francesa, en la década de 1790, se construyó un sistema de telegrafía que se extendía por toda Francia y que utilizaba semáforos (del griego sêma, signo y phoros, que porta) construidos en las cimas de las colinas.

En 1880, Alexander Graham Bell inventó el "fotófono", que es un aparato gracias al cual se comprueba que la luz puede servir para transportar la voz humana. (Véase figura 2.29)

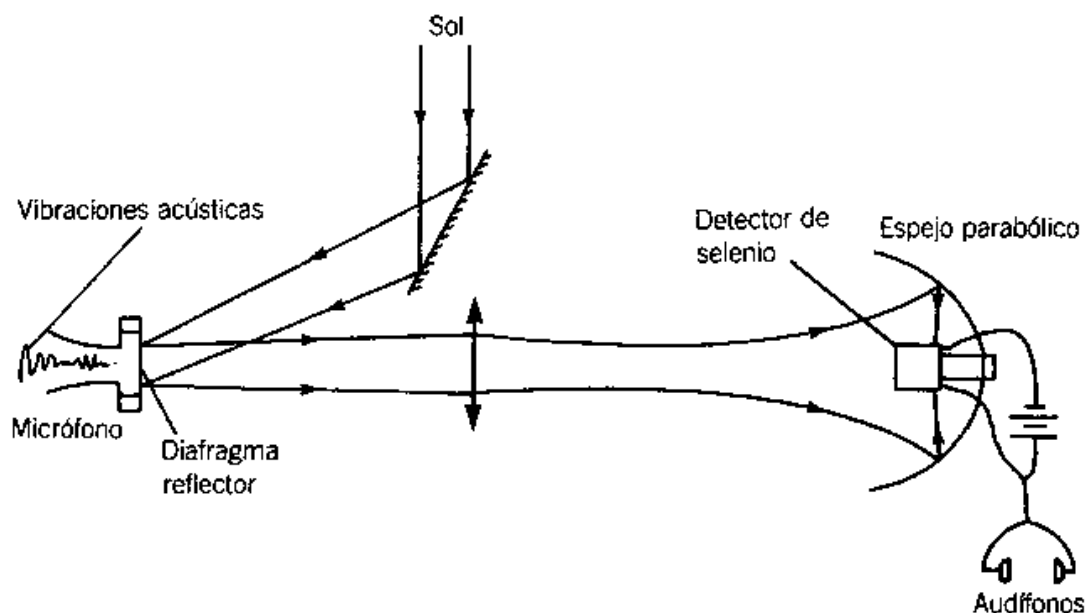


Figura 2.29 Fotófono de Graham Bell

Para esto, A. G. Bell enfocada la luz proveniente del sol por medio de un pequeño espejo fijado sobre la membrana vibrante de un micrófono. Las vibraciones acústicas del espejo provocaban que el haz de luz reflejado fuera más o menos divergente, de esta forma Bell había producido un haz de luz modulado en amplitud, el cual recuperó, 200 m más lejos, con la ayuda de un gran espejo parabólico en cuyo centro colocó un detector de selenio. Este detector, cuya resistencia eléctrica es función de la cantidad de luz que incide sobre él, se colocó en serie con una batería y un audífono. Este ingenioso sistema tenía el inconveniente de que dependía del sol.

Gracias al descubrimiento de fuentes luminosas de gran intensidad, se han empleado sistemas que portan mensajes luminosos codificados en clave Morse como medio de comunicación entre barcos, en un periodo que incluye hasta la Segunda Guerra Mundial. La invención del láser – fuente de luz potente, coherente y direccional – hizo nacer la esperanza de aumentar el alcance de esas comunicaciones. Sin embargo, las dificultades se originan en el mismo medio en donde se efectúa la propagación, es decir, en la atmósfera.

2.2.1.2 Dificultades causadas por la propagación en la atmósfera

En todos sistemas ópticos mencionados hasta ahora, la luz se propaga en la atmósfera y no en el vacío. Ahora bien, el aire que nos rodea actúa sobre la propagación de la luz.

El primer efecto producido es la absorción molecular. Si la frecuencia de la onda es la misma que la de las vibraciones mecánicas de las moléculas, entonces, cada vez que una onda electromagnética (como la luz) choque con las moléculas de un gas, la luz se absorberá. Esta absorción se debe principalmente a las moléculas de agua y de gas carbónico presentes en el aire.

Una segunda perturbación es la acción que las partículas sólidas o líquidas (aerosoles), en suspensión en el aire, llevan a cabo sobre la luz. Estas partículas pueden ser gotas de agua o polvos. La absorción. Como consecuencia de la difusión, la luz se propaga en todas direcciones. La amplitud de este fenómeno es función de las dimensiones de las partículas en relación con la longitud de onda de la luz. (Véase Figura 2.30)

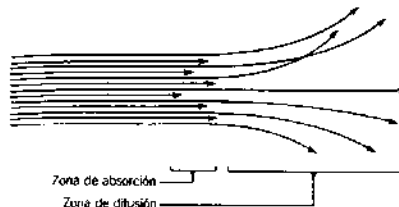


Figura 2.30 Absorción y difusión de la luz

Es de notarse que la turbulencia atmosférica, debida a las variaciones locales del índice de refracción del aire, tiene por efecto desviar los rayos luminosos. Estas variaciones del índice pueden ser causadas por variaciones locales de la temperatura del aire. Si este efecto de refracción es inconveniente cuando es aleatorio, por otra parte puede servir para volver a enfocar un haz luminoso difundido por la atmósfera. Se hicieron varios ensayos al respecto utilizando tanto lentes de vidrio como lentes térmicos.

Estos sistemas son complejos, difíciles de alinear, costosos y no suprimen el fenómeno de absorción. Las comunicaciones ópticas que utilizan la atmósfera como medio de transmisión parecen, a causa de estas dificultades, estar sujetas a un desarrollo limitado. Por tanto, fue necesario buscar otro medio de propagación que no presentara todos estos inconvenientes. (Véase Figura 2.31)

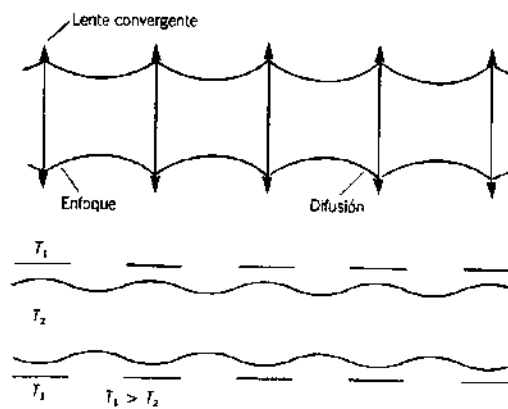


Figura 2.31. Sistemas de comunicación ópticas: a) utilización de lentes convergentes; b) utilización de lentes térmicos. El índice de refracción del aire es mayor en el centro cuando $T_1 > T_2$

2.3 La fibra óptica como medio de transporte de señales

La fibra óptica ofrece la transmisión de datos a alta velocidad, en tiempo real o no, entre un número de ruteadores y estaciones separadas en distancias considerables. La fibra óptica sirve también como red de conexión entre las estaciones que estén funcionando previamente.

La fibra óptica se ha sabido adaptar a las características de entornos en los que resulta muy deseable disponer de ella, pero su elevado costo inicial pareciera prohibir este medio eficaz de comunicación. Esto hace de la fibra óptica una alternativa muy interesante sin embargo la irrupción de las telecomunicaciones han hecho que a la fibra óptica se la considere "la hermana pequeña" de las redes de la comunicación.

Sin embargo la fibra óptica es también un arma muy eficaz y peligrosa si es utilizada para fines bélicos. Pero aún así la Fibra óptica representa una nueva corriente tecnológica muy eficaz para el desarrollo de las comunicaciones.

2.3.1 LA FIBRA OPTICA COMO CANAL DE TRANSMISION

Las primeras telecomunicaciones ópticas en la atmósfera libre tropezaron con los mismos inconvenientes que las transmisiones por microondas. Así como se utilizaron guías de onda con atmósfera controlada para limitar la atenuación de las microondas, se visualizó la idea de controlar el medio de propagación de la luz. Fue así como se originaron las guías de onda de luz, es decir, las fibras ópticas. Las ondas luminosas se propagan dentro de un cilindro de vidrio extremadamente puro y no absorbente.

2.3.1.1 Reseña histórica

En 1884 un físico irlandés, Hohn Tyndall, mostró que la luz que se propaga en un medio con alto índice de refracción no puede penetrar en un medio que tiene un índice más bajo, cuando esta luz llega con un ángulo suficientemente pequeño. Este principio, conocido con el nombre de reflexión total interna es la base del funcionamiento de una fibra óptica, ya que permite confinar la luz al medio de más alto índice. Sin embargo, no fue sino hasta 1927 que el inglés J. L. Baird y el americano C. W. Hansell, al registrar sus patentes, dieron la posibilidad de transmitir imágenes empleando fibras de silicio.

Más tarde, las fibras de plástico se utilizaron en medicina para alumbrar lugares de difícil acceso; sin embargo, estas fibras eran poco eficaces. Gracias a los trabajos de A. C. S. van Heel y de N. S. Kapany a fines de la década de 1950, la introducción de la fibra de una cubierta protectora de menor índice y la utilización de haces de fibras, permitieron que esta tecnología evolucionara y llegara a aplicarse sobre todo en el campo de la medicina. La endoscopía fue el beneficio más grande que se obtuvo de estos progresos. No fue sino hasta el año de 1966 que, gracias a una publicación científica de K. C. Kao y G. Z. Hockham, se consideró seriamente la posibilidad de utilizar fibras como canal de transmisión de las telecomunicaciones. Sin embargo, esta utilización necesitaba el logro de progresos tecnológicos tanto a nivel de las fibras como de las fuentes de luz.

2.3.1.2 ADVENIMIENTO DEL LASER

La primera fuente coherente de luz se inventó a principios de la década de 1960. Esta fue el láser; el invento tuvo el mérito de revivir la idea de utilizar la luz para transportar información. Sin embargo, los primeros rayos láser de gas eran demasiado voluminosos como para utilizarlos fácilmente en las telecomunicaciones mediante fibra óptica.

La invención del láser y del diodo semiconductor electroluminiscente de pequeñas dimensiones, permitió considerar el futuro con optimismo. Antes de 1970, estas fuentes semiconductoras presentaban mayores inconvenientes. Por una parte, su vida era corta y, por la otra, como estaban hechas de arseniuro de galio, la emisión era a $0.95\text{ }\mu\text{m}$ que es una longitud de onda en la que las fibras son poco transparentes. El desarrollo, después de 1970, de fuentes que utilizaban semiconductores de arseniuro de galio y de aluminio, que emitían entre 0.8 y $0.9\text{ }\mu\text{m}$ (para estas longitudes de onda la fibra es transparente) produjo grandes esperanzas. Estas fuentes se perfeccionaron a tal grado que su vida pasó de dos horas a un millón de horas (1979). Durante este tiempo, la tecnología de las fibras experimentó también un progreso considerable.

2.3.1.3 FIBRAS OPTICAS DE BAJA ATENUACION

La fibra óptica debe ser lo más transparente posible, a fin de que pueda utilizarse. Entre menor sea la atenuación de la fibra, más larga podrá ser ésta. Considérese el rápido progreso que ha tenido la tecnología de fibras ópticas en la reducción de la atenuación. Al respecto, hay que calcular para qué la longitud de fibra se encontrará sólo 10% de la luz inyectada en ella. (Véase tabla 2.1)

Esta rápida reducción de la atenuación, aunada al desarrollo de fuentes fiables que emiten en longitudes de onda para las cuales la fibra presenta un mínimo de atenuación, dio origen a las telecomunicaciones por fibra óptica que se conocen actualmente.

Tabla 2.1 Evolución de la atenuación en fibras ópticas. Longitud de fibra que corresponde a una atenuación de 10.

1968	10 m
1969	100 m
1970	500 m
1980	50 000

2.3.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA OPTICA

Los recientes progresos de la tecnología en rayos láser semiconductores y en fibras ópticas de baja atenuación hacen posible la realización de sistemas de telecomunicación mediante fibras ópticas como canal de transmisión. Estos sistemas ya

son operativos. Es importante conocer su estructura general, así como las ventajas potenciales de su utilización en diversos campos.

2.3.2.1 DESCRIPCION GENERAL

En su forma más simple, un sistema de comunicación por fibra óptica está constituido por tres elementos: (Véase figura 2.32)

- Un módulo de emisión, que tiene por función transformar la información en forma de señal eléctrica a información en forma de luz. A este módulo se le llamará emisor óptico.
- Un canal de transmisión de la luz, que es la fibra óptica.
- Un módulo de recepción, que tiene por función transformar la información óptica recibida en información con la forma de señal eléctrica: se le llamará receptor óptico.



Figura 2.32 Sistema de comunicación por fibra óptica

Las transmisiones a distancias demasiado grandes pueden necesitar la utilización de uno o varios repetidores, cuya función es amplificar la señal óptica. Un repetidor está constituido por un receptor óptico. (Véase figura 2.33)

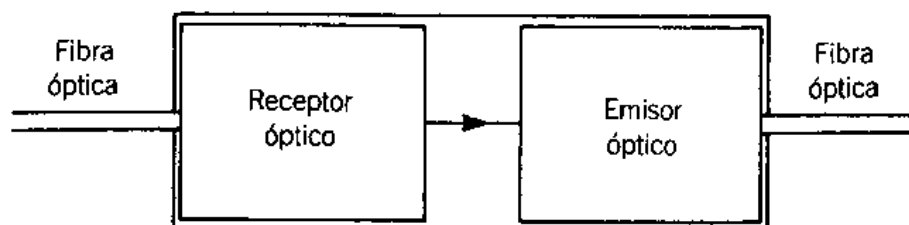


Figura 2.33 Repetidor óptico

El emisor óptico contiene la fuente de luz, que puede ser un diodo electroluminiscente o un diodo láser.

El receptor óptico contiene al detector óptico, el cual puede ser un fotodiodo o un fototransistor.

El emisor y el receptor ópticos están dotados de conectores que permiten acoplar la fuente y el receptor de la luz a la fibra.

El canal de transmisión puede contener conectores que le permitan acoplar dos fibras en sí.

2.3.2.2 VENTAJAS POTENCIALES

Con respecto a los sistemas tradicionales de comunicación, los sistemas por fibra óptica poseen cierto número de ventajas potenciales, las cuales se deben a algunas características de la fibra. Estas son:

a) Baja atenuación.

Gracias a la baja atenuación de las fibras actuales se puede acrecentar la distancia entre las repetidoras en un sistema de comunicación por fibra óptica. De esta forma, si se disminuye el número de repetidoras (eliminandolos en la práctica), se aumenta la confiabilidad del sistema.

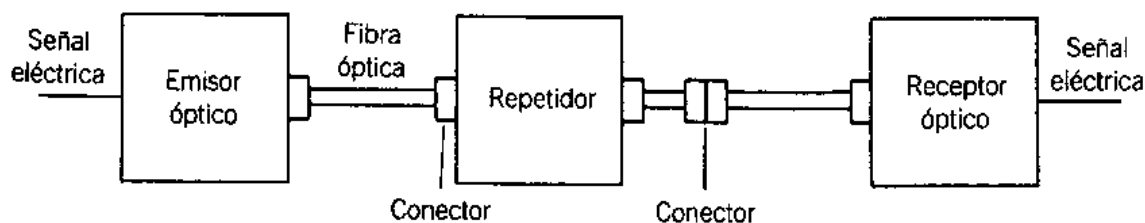


Figura 2.34 Sistema general de comunicación por fibra óptica con conectores

b) Aislamiento eléctrico

Las fibras se hacen de materiales aislantes eléctricos (vidrios, plásticos). Esto hace que las interferencias electromagnéticas externas no perturben la transmisión de la fibra. La transmisión será de muy alta calidad sin que se necesite una protección costosa contra el ruido electromagnético externo. Esto es una gran ventaja en lugares donde se producen variaciones bruscas de tensión y de corriente. Las fibras ópticas no sufren centelleos ni cortocircuitos, lo que las hace seguras en las fábricas de explosivos o de productos químicos y petroquímicos.

c) Peso y dimensiones

Un cable de fibra óptica es, por lo menos, diez veces más ligero y más compacto que un cable coaxial clásico. Esta reducción de peso y dimensiones permite economizar el transporte y la instalación de cables; constituye también una ventaja neta para la instalación en aviones, barcos y en cualquier lugar donde el espacio sea limitado.

d) Gran banda de paso

Una fibra óptica gracias a su gran capacidad de banda pasante, permite reemplazar varios canales de transmisión clásicos, lo que es un importante logro económico.

e) Diafonía

Como una fibra óptica no radia ni capta radiaciones externa, está completamente exenta de diafonía, lo que propicia una transmisión con muy buena calidad.

2.3.2.3 CAMPOS DE APLICACIÓN

Los campos de aplicación de las fibras ópticas son numerosos. A continuación se listan los principales:

a) Telefonía:

- enlaces sin repetidoras entre centrales telefónicas;
- enlaces interurbanos con repetidoras;
- enlaces transoceánicos por cable óptico submarino;
- transmisión de datos;
- distribución de gran capacidad entre los abonados de servicios telefónicos, videofónicos y de transmisión de datos.

b) Televisión:

- distribución por cable;
- enlaces cámara-estudio;
- teleconferencias;
- sistemas de seguridad.

c) Informática:

- enlaces entre computadoras;
- enlaces entre computadoras y periféricos;
- conexión de material de oficina;
- enlaces internos de material informático;

d) Control de procedimientos e instrumentación:

- trabajo en un medio deflagrante;
- controles nucleares;
- instrumentación de medida y control.

e) Área militar:

- comunicaciones tácticas;
- aviación (helicópteros, interceptores);
- marina (submarino, barcos).

No son más que los principales campos. En esta tecnología en plena evolución, todos los días se descubren nuevas aplicaciones de las fibras ópticas.

2.4 Aplicaciones actuales

Su uso es muy variado, desde comunicaciones digitales, pasando por sensores y llegando a usos decorativos, como árboles de navidad, veladores y otros elementos similares.

a) Comunicaciones con fibra óptica

La fibra óptica se emplea como medio de transmisión para las redes de telecomunicaciones, ya que por su flexibilidad los conductores ópticos pueden agruparse formando cables. Las fibras usadas en este campo son de plástico o de vidrio, y algunas veces de los dos tipos. Para usos interurbanos son de vidrio, por la baja atenuación que tienen.

Para las comunicaciones se emplean fibras multimodo y monomodo, usando las multimodo para distancias cortas (hasta 5000 m) y las monomodo para acoplamientos de larga distancia. Debido a que las fibras monomodo son más sensibles a los empalmes, soldaduras y conectores, las fibras y los componentes de éstas son de mayor costo que los de las fibras multimodo.

b) Sensores de fibra óptica

Las fibras ópticas se pueden utilizar como sensores para medir la tensión, la temperatura, la presión y otros parámetros. El tamaño pequeño y el hecho de que por ellas no circula corriente eléctrica le da ciertas ventajas respecto al sensor eléctrico.

Las fibras ópticas se utilizan como hidrófonos para los sismos o aplicaciones de sonar. Se ha desarrollado sistemas hidrofónicos con más de 100 sensores usando la fibra óptica. Los hidrófonos son usados por la industria de petróleo así como las marinas de guerra de algunos países. La compañía alemana Sennheiser desarrolló un micrófono que trabajaba con un láser y las fibras ópticas.

Los sensores de fibra óptica para la temperatura y la presión se han desarrollado para pozos petrolíferos. Estos sensores pueden trabajar a mayores temperaturas que los sensores de semiconductores.

Otro uso de la fibra óptica como un sensor es el giroscopio óptico que usa el Boeing 767 y el uso en microsensores del hidrógeno.

c) Más usos de la fibra óptica

- Se puede usar como una guía de onda en aplicaciones médicas o industriales en las que es necesario guiar un haz de luz hasta un blanco que no se encuentra en la línea de visión.
- La fibra óptica se puede emplear como sensor para medir tensiones, temperatura, presión así como otros parámetros.

- Es posible usar latiguillos de fibra junto con lentes para fabricar instrumentos de visualización largos y delgados llamados endoscopios. Los endoscopios se usan en medicina para visualizar objetos a través de un agujero pequeño. Los endoscopios industriales se usan para propósitos similares, como por ejemplo, para inspeccionar el interior de turbinas.
- Las fibras ópticas se han empleado también para usos decorativos incluyendo iluminación, árboles de Navidad.
- Líneas de abonado
- Las fibras ópticas son muy usadas en el campo de la iluminación. Para edificios donde la luz puede ser recogida en la azotea y ser llevada mediante fibra óptica a cualquier parte del edificio.
- También es utilizada para modificar el sistema sensorial de los taxis provocando que el taxímetro (algunos le llaman cuentafichas) no marque el costo real del viaje.
- Se emplea como componente en la confección del hormigón translúcido, invención creada por el arquitecto húngaro Ron Losonczi, que consiste en una mezcla de hormigón y fibra óptica formando un nuevo material que ofrece la resistencia del hormigón pero adicionalmente, presenta la particularidad de dejar traspasar la luz de par en par.

Capítulo 3

Diseño de sistemas de Información Luminosas

3.1 Diseño de despliegado de Señales preventivas e informativas

Las señales preventivas, denominadas además de advertencia de peligro, tienen como propósito advertir a los usuarios de las vías de riesgos y/o situaciones imprevistas de carácter permanente o temporal e indicarles su naturaleza, los colores distintivos son: fondo amarillo, símbolo y orla negros.

Estas señales requieren que los conductores tomen las precauciones del caso ya sea reduciendo la velocidad o realizando maniobras necesarias para su propia seguridad, la del resto de los vehículos y las de los peatones.

El uso de estas señales es de gran importancia para los conductores. Para una mejor claridad sobre estas señales se ha realizado la siguiente clasificación:

- Diseño de la Vía
- Irregularidades Físicas de las Vías
- Generales en la Vía
- Otros Riegos
- Señales Especiales

En la figura 3.1 se muestra este tipo de clasificación de señales viales.



Figura 3.1 señales de prevención de vías de tránsito

3.1.1 Semáforos ecológicos

Se puede considerar como el primer semáforo a las luces de tránsito que se habían instalado en el exterior del parlamento británico de *Westminster*; obra del ingeniero *J.P. Knight*, especialista en señales de ferrocarril. Este aparato empezó a funcionar el 10 de diciembre de 1868 e imitaba a las señales de ferrocarril y sólo usaba las luces de gas rojas y verdes por la noche. Dos zumbidos señalaban que el tráfico que podía avanzar era el de la avenida y un sólo zumbido indicaba que era el tráfico de la calle 105. No tuvo una larga existencia dado un desafortunado accidente que provocó que explotase matando a un policía. Hasta la invención del automóvil no fue necesaria, y fue sólo entonces cuando se retomó su desarrollo.

El 4 de agosto de 1914 se instaló el primer semáforo "moderno", en *Cleveland*, Estados Unidos. Gestionaba el tráfico entre la avenida Euclid y la calle 105. Este contaba con luces rojas y verdes, colocadas sobre unos soportes con forma de brazo. Además incorporaba un emisor de zumbidos como su antecesor inglés.

En la actualidad cuando hablamos de los semáforos nos referimos a un dispositivo mecánico o eléctrico que controla el tráfico de vehículos en las intersecciones de caminos de nuestras ciudades. El tipo más frecuente tiene tres lámpara incandescente / halógena que con luces de colores y un sistema pre programado a través de los hertz de la electricidad regulan el tráfico de vehículos y peatones.

- Verde, para avanzar
- Rojo, para detenerse
- Amarillo o ámbar como paso intermedio del verde a rojo.

El amarillo tiene un significado distinto si está intermitente (pasar con precaución) o si está fijo (detenerse, si la velocidad que llevemos nos lo permite con seguridad).

El tráfico vehicular es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Se presenta también con muchas similitudes en otros fenómenos como el flujo de partículas (líquidos, gases o sólidos) y el de peatones. En las ciudades, el tráfico

vehicular se encuentra presente en casi todas las esferas de la actividad diaria de las personas, y ocasiona numerosos fenómenos entre los que destacan especialmente los congestionamientos. En la figura 3.2 se muestra algunos ejemplos de señales informativas luminosas instalados, que funcionan a partir de leds.

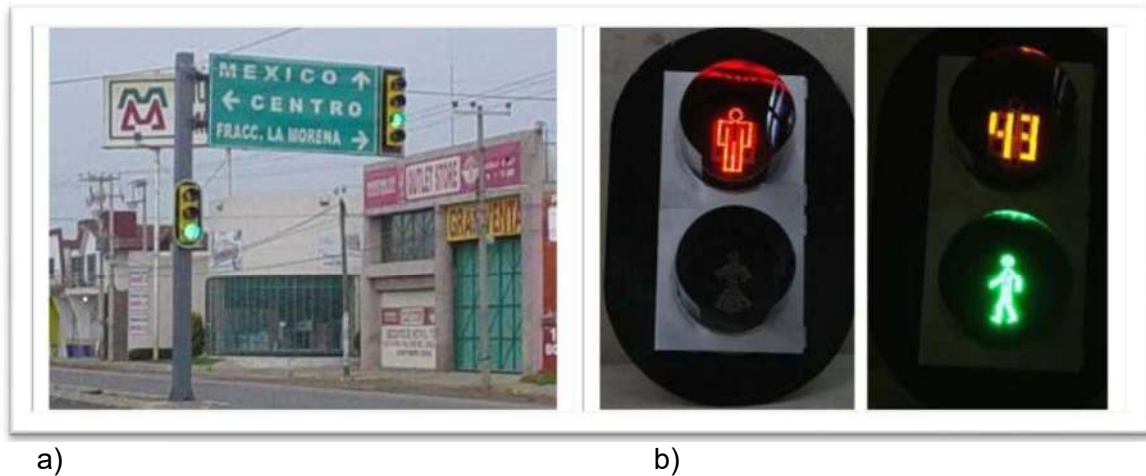


Figura 3.2 Algunos ejemplos de una señal de informativa luminosa como son:

a) Semáforo. b) Señales luminosas para avanzar y detenerse.

Este fenómeno es producto del crecimiento Social, Económico, Político e Industrial de nuestras ciudades produciendo así la sobre población de las pequeñas y grandes urbes.

El fenómeno es cada día más engorroso que, con la ayuda de los semáforos pre programados cumplen un ciclo de cambio de señales continuo, uniforme que no varía en pro de un desahogo eficiente de dicha arteria, dificultando el transporte al sitio de trabajo, casa u otros lugares especialmente en las horas pico, que a su vez, bien sea como pasajero en un autobús o en su vehículo particular, provoca la pérdida de tiempo, estrés, cansancio, entre otras. Por tanto, el tráfico no es sólo causado por el crecimiento de la población, sino también por los sistemas que los regulan.

Innovando el ciclo de cambio de señales continuas pre-programadas de los semáforos, en eficiente desahogo eficiente de la arteria vial a través de sensores conectados al exterior, para lograr la mayor eficiencia al momento de regular el tráfico en horas pico. Un sensor que mide el volumen de vehículos por medio del cual evalúa el comportamiento del tránsito en la zona y generando los ajustes necesarios emite una decisión inmediata que coordina las fases de cambios de los demás semáforos con el del mismo, debido a que es un sistema ideal para intercepciones de ocho direcciones, sin la necesidad de un operador que suministre la información. Logrando así, disminuir con mayor seguridad el tráfico, aportando desarrollo y tecnología a la calidad de vida en materia de tránsito. La función de este sensor es, calcular el flujo de vehículos para así crear un lapso de tiempo que mantenga la señal (luz verde) "algo mayor a lo normal" proporcionando ventaja al hacer avanzar a más automóviles, poniendo en evidencia que por cada segundo que transcurre, el tráfico fluye con más rapidez, obteniendo mayor seguridad y organización de vehículos en movimiento con una diferencia de segundos que nos da el sistema automáticamente. Este dispositivo es alimentado íntegramente con energía solar.

Un panel solar es un sistema que permite capturar la energía del sol mediante paneles compuestos por celdas de entre cinco y diez centímetros de placas de silicio y boro, llamadas células fotovoltaicas, y que son capaces de convertir la luz solar en electricidad. Para la instalación de estos paneles, se necesita que la zona tenga un mínimo de días de sol o irradiación, un objeto destinado a pasar muchas horas en el exterior soportando dichas condiciones ambientales son **los semáforos. Los semáforos al tener que soportar estas condiciones nos proporciona la ventaja** de operar este sistema.



Figura 3.3 Una celda solar para utilización iluminación de calles.

Si la luz solar como energía natural que no necesita de mantenimiento, la cual podemos disfrutar por una gran cantidad de horas al día, los 365 días del año, las plantas la utilizan como fuente para fabricar su alimento y los seres vivos la usamos como **fuelle de calor**, porque no usar esta energía para producir corriente eléctrica renovable.

Por tanto que, los equipos que posean este novedoso sistema no necesitaran un mantenimiento periódico como los normales, y produciendo su propia fuente de electricidad, su gasto es cero una vez instalados. Lo que multiplica el ahorro de energía haciendo de este artefacto un modelo innovador. También al auto suministrarse de energía eléctrica de manera ecología y asegurando un constante flujo de electricidad incluso de noche, no necesita ninguna conexión a una fuente externa de electricidad porque cuenta con acumuladores de voltaje. Causando un ahorro en energía a largo plazo, a la par de la utilización de energía limpia y renovable. Creando así nuevas estrategias de ahorro y eficiencia para reducir esta importante demanda que requiere para operar y, así, contribuir a contrarrestar el calentamiento global.

El ahorro de energía en el sistema tradicional de iluminación de un semáforo compuesto de una bombilla tras un cristal coloreado (verde, ámbar o rojo) ha sido a lo largo del tiempo un duro trabajo. Estas lámparas convencionales incandescente / halógena consumen 70 vatios (W) y tienen un periodo de vida útil de 5.000 horas aproximadamente. Reemplazar este sistema por un nuevo modelo que incluye multitud de diminutas lámparas de colores que, en conjunto, generan un efecto similar al que antes se tenía. El sistema de iluminación con tecnología LED, permite ahorrar hasta un 80% de su consumo eléctrico, al aprovechar mejor la energía incrementando la seguridad del tráfico por su fiabilidad, durabilidad y mayor intensidad de iluminación. Los discos llevan una gran cantidad de luz, se ven de forma más contrastada y uniforme siendo su vida útil de 100.000 horas aproximadamente y su consumo es de 10 vatios (W). Este sistema se está implantando también en las luminarias de algunos modelos de vehículos. Como se muestra en la tabla 3.1 la comparación.



Figura 3.4 Semáforo común con la utilización de leds.

La sinergia que causa la tecnología LED con la producción de energía eléctrica por medio de celdas solares, aporta las condiciones ideales que deben tener los dispositivos creados para la evolución de la ciencia en pro mayor eficiencia de la vida de los seres humanos conservando el medio ambiente, la ecología y contrarrestando calentamiento global.

Por todo lo antes expuesto se, pretende diseñar un Semáforo Ecológico e Inteligente basándose en los requerimiento de la sociedad como también la gran demanda por reducir la contaminación atmosférica. Determinar la factibilidad técnica, económica y financiera del equipo, ya que es un dispositivo actuado que regula y agiliza el tráfico por medio de datos externos operando automáticamente según las variables obtenidas. En la figura 3.5 se muestra algunos ejemplos de tipos de led utilizados en vialetas para así ser más fácil su ubicación en la noche.



Figura 3.5 Vialetas y boyas para la utilización de carreteras o autopistas iluminadas

Tabla 3.1 se indica una comparación de las características de un foco convencional y de un LED.

Foco convencional	LED
De 60 a 150 watts por luz	7.5 a 13.5 watts
Poca vida del foco	Vida máxima de 11.5 años
Baja visibilidad, en especial con sol	Alta visibilidad, aún con sol, visible hasta 1.8 km

A continuación se enlistan las condiciones para que un semáforo pueda ser instalado con LEDs:

1. El color de la mica del LED debe de ser totalmente transparente, el LED por sí solo da el color necesario ya sea verde, amarillo o rojo. Algunos semáforos que no dan la intensidad necesaria utilizan difusores rojos y amarillos para darle el color a la luz, esto limita el ángulo de apertura del LED;
2. El LED debe de ser totalmente frío, existen algunos diseños que utilizan menos LEDs pero que producen mucho calor, calor = pérdida de energía. La ventaja del LED es el bajo consumo de voltaje, por lo que el LED debe de estar a temperatura ambiente y no producir calor;
3. El ángulo es algo muy importante, existen algunos modelos que se ven muy bien en línea recta pero al verlos en ángulo se ve muy opaca la luz, es por eso que el LED debe de verse con la misma intensidad tanto en línea recta como a 40 grados de la luz;
4. Se deben tener varias matrices con LEDs, el usar una sola matriz como por ejemplo 3 LEDs limita totalmente la vida de la luz.

Así mismo la definición de un LED viene de las siglas en inglés Light-Emitting Diode o diodo emisor de luz en español. Es un dispositivo semiconductor que emite luz policromática, por lo que se obtienen diferentes longitudes de onda, cuando este se polariza en directa y es atravesado por la corriente eléctrica.

El color se obtiene según el material semiconductor empleado en la construcción del diodo, por lo que se obtiene desde luz ultravioleta, se pasa por el espectro de luz visible, llegando hasta el infrarrojo.

Tabla 3.2 se dan las características de los leds de acuerdo a su color y longitud de onda.

Compuesto	Color	Longitud de onda
Arseniuro de Galio (GaAs)	Infrarrojo	940 nm
Arseniuro de Galio y Aluminio (AlGaAs)	Rojo en infrarrojo	890 nm
Arseniuro Fósforo de Galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo	630 nm
Fósforo de Galio (GaP)	Verde	555 nm
Nitruro de Galio (GaN)	Verde	520 nm
Seleniuro de Zinc (ZnSe)	Azul	470 nm
Nitruro de Galio e Indio (InGaN)	Azul	450 nm
Carburo de Silicio	Azul	480 nm
Diamante (C)	Ultravioleta	400 nm
Silicio (Si)	En desarrollo	En desarrollo

3.2 Diseño de un semáforo con fibras ópticas

Esta modernización de la red de semáforos permitirá igualmente, mejorar los sistemas para dar prioridad al transporte público y a los servicios de emergencia dentro del conjunto del tráfico ciudadano. La supervisión centralizada de las intersecciones, por complejas que sean, mediante la red de fibra óptica que sustituirá a los cables actuales también facilitará que el centro de control pueda adaptar la regulación de los semáforos en caso de incidentes.

Para el diseñar y construir un semáforo por medio de fibras ópticas debemos tener en cuenta los circuitos integrados y así poder tener un mejor rendimiento en la energía eléctrica y también poder utilizar la energía solar para el mismo.

Para poder realizar el semáforo necesitamos realizar un circuito que simule el funcionamiento de este. Para esto utilizamos un circuito integrado 555 y un 4017 que son de mucha utilidad. A partir de esto se une los dos circuitos por medio de la patita 3 del 555 y de la patita 14 del 4017 y se conectan diodos del 1N914 hacia cada transistor que van hacia el led del color correspondiente.

La siguiente es la lista de material que vamos a necesitar para la construcción que se explicara más detalladamente en el capítulo 4:

- ⊙ Circuito integrado 555
- ⊙ Circuito integrado 4017
- ⊙ Resistencias
- ⊙ 47 k Ω
- ⊙ 10 k Ω
- ⊙ 3X 180 Ω
- ⊙ Capacitor de 10 μ F
- ⊙ Diodos 8X 1N914gura
- ⊙ Transistores 6X 2N3904
- ⊙ 3 Led (Rojo, amarillo y Verde)

En la figura 3.6 se propone un diseño de un semáforo basado en la visualización de la luz por medio de fibras ópticas.

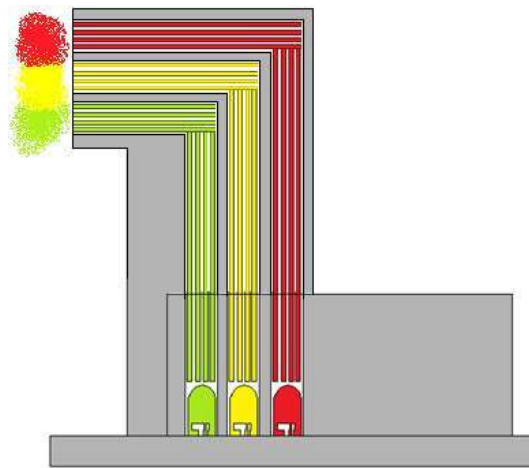


Figura 3.6 Diseño para un semáforo por medio de fibras ópticas

A continuación se muestran algunos diseños que podrán para innovar a los semáforos convencionales de focos. Aquí solo se mencionan algunos para ilustrar como serian.

3.2.1 Semáforo de sola un luz

Este semáforo funciona por medio de 3 luces de led para así poder tener un mayor ahorro de energía, que se acomodan en la parte de arriba de led porque la necesidad de las fibras ópticas de la apertura numérica que hablamos anteriormente de central la luz por la fibra para una mayor eficiencia en la luz y lo que entre sea casi similar a lo que salga.

Después de que se toma la luz del led la fibra óptica hace su trabajo de trasportarla hasta al otro extremo de esta así poner la luz en un lugar donde iría la luz verde, roja y amarilla. Sin embargo debemos poner varias fibras ópticas a varios orificios según su color, para tener así gran variedad de luces y estas prenderían todas las verdes juntas y luego las amarillas seguidas con todas las rojas así sucesivamente.

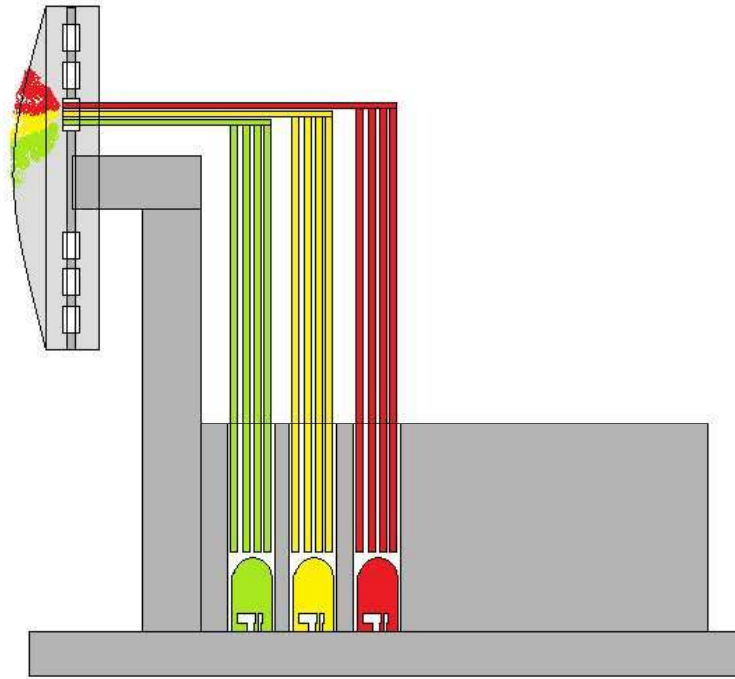


Figura 3.7 Diseño para un semáforo se una sola luz.

3.3 Diseño de vías de transito

Un correcto sistema de iluminación vial puede ayudar a reducir los accidentes hasta en un 30%. Su probada capacidad estructural las vuelve la solución ideal para un próximo proyecto.

Estos dispositivos son emisores de luz empleando la energía almacenada previamente durante el día gracias al sol, que delimitan las calzadas y aumentan la visibilidad nocturna de unos 90 metros a los 900, incrementando de forma ostensible la capacidad de reacción de los conductores. Lo mejor de todo es que aunque el camino este totalmente oscuro estas emiten la luz para guiar a los vehículos en cualquier situación climática independientemente de las luces que lleve el automóvil.



Figura 3.8 Carretera de Inglaterra iluminada por medio de leds.

Así las carreteras o curvas pueden ser visibles a los conductores en la noche. Tanto es esto, que los accidentes producidos por la noche en estas carreteras han disminuido un 70 por ciento.

Por ahora sólo este sistema de tachuelas sólo se encuentra en Gran Bretaña, esperemos que otros países lo implementen para así disminuir el riesgo de accidentes y brindarle a los conductores una mayor seguridad en las oscuras carreteras.



Figura 3.9 Un tipo de Vialita de la carretera utilizando leds.

También puede ser utilizada con una sola recta por medio de fibra óptica como se muestra en la figura 3.10 donde con un solo foco se puede iluminar un tramo de luz para que sean más visibles las líneas de seguimiento. Es también más económica de energía. El resplandor lateral se utiliza principalmente para los usos decorativos de la iluminación y es perfecto en las localizaciones mojadas, montadas alrededor o en del agua, en una piscina, una fuente o muelle. Entonces no tuviera ningún inconveniente con las condiciones ambientales que se presenten.



Figura 3.10 La luz se escapa a través de los lados del cable de fibra óptica.

Capítulo 4

Construcción de sistemas ópticos

4.1 Construcción de un semáforo con fibras ópticas

En el diseño de un semáforo básico se requieren dos principales circuitos integrados que están en la figura 4.1 los cuales son muy accesibles y comunes para su adquisición.

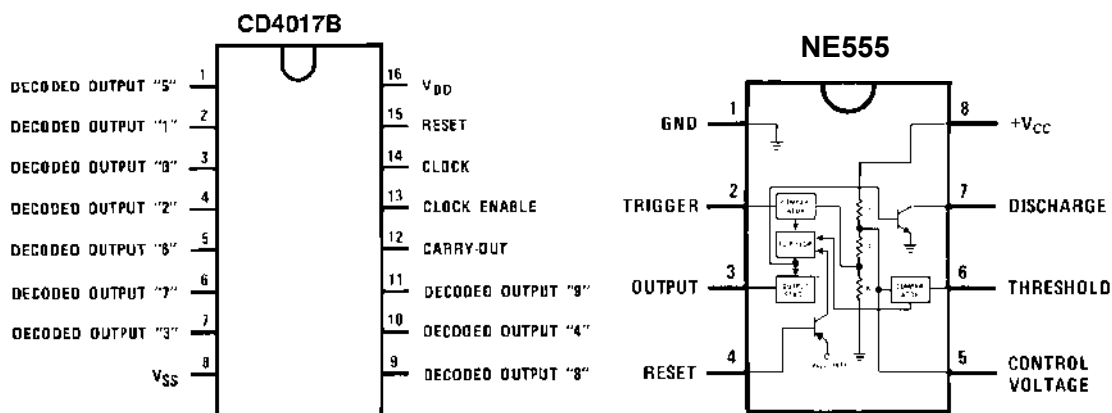


Figura 4.1 Circuito 4017 y 555 cada uno con sus entradas y salidas así como el funcionamiento de cada una de ellas

Como se había mencionado anteriormente en el capítulo 3 se muestra la lista de material necesario para la construcción solo del semáforo y así poder realizarlo.

- ⊙ Circuito integrado 555
- ⊙ Circuito integrado 4017
- ⊙ Resistencias de 47 k Ω , 10 k Ω y tres de 180 Ω
- ⊙ Capacitor de 10 μ F
- ⊙ Diodos 8X 1N914
- ⊙ Transistores 6X 2N3904
- ⊙ 3 Led (Rojo, amarillo y Verde)

A partir de esto se une los dos circuitos por medio de la terminal 3 del circuito integrado 555 y de la terminal 14 del 4017 y se conectan diodos del 1N914 hacia cada transistor que van hacia el led del color correspondiente. En la figura 4.2 se muestra el diagrama de conexión de los elementos para la construcción de un semáforo.

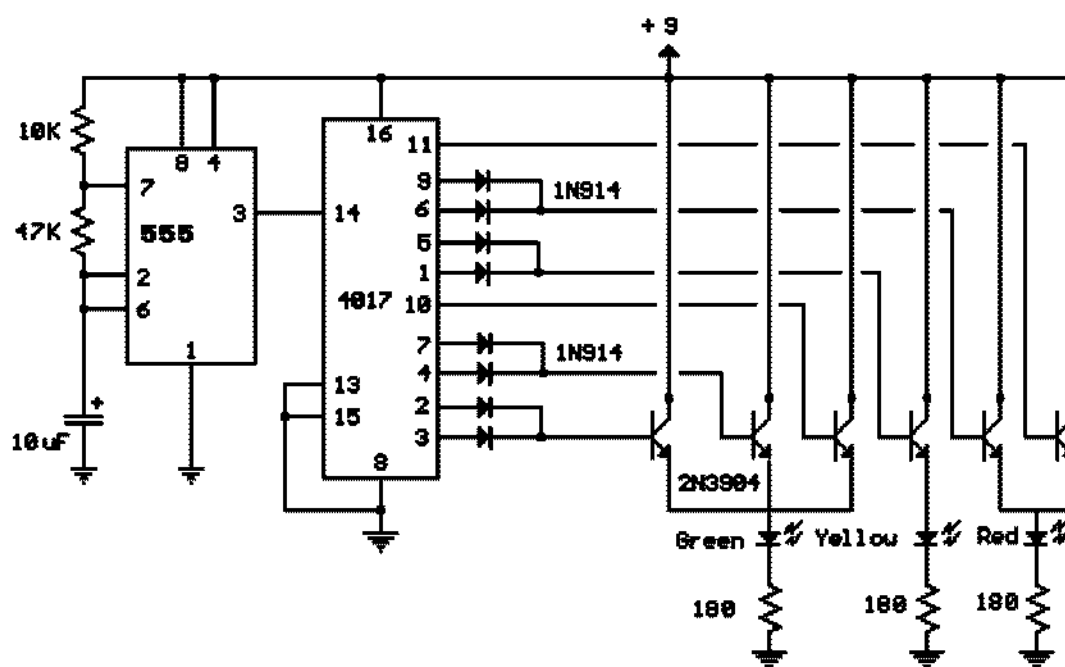


Figura 4.2 Circuito completo para la construcción del semáforo

En la figura 4.3 muestra el circuito armado en un protoboard y utilizando leds de alta intensidad para un mayor luminosidad.

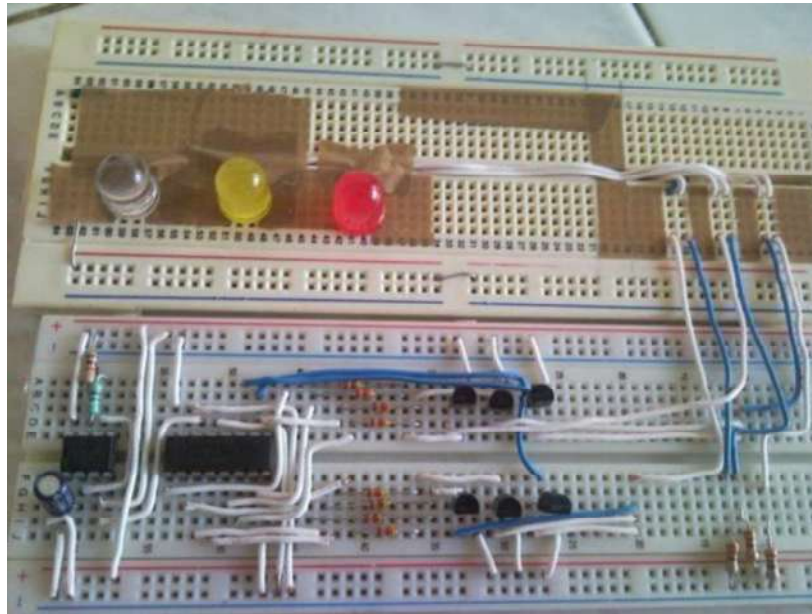


Figura 4.3 Circuito construido con leds de alta luminosidad

En la figura 4.4 se puede apreciar como el circuito antes mencionado funciona perfectamente, dura un periodo de tiempo en verde luego cambia a amarillo unos instantes para cambiar a rojo después así repetidamente al igual que un semáforo. Con la utilización de circuitos muy fácil de obtener.

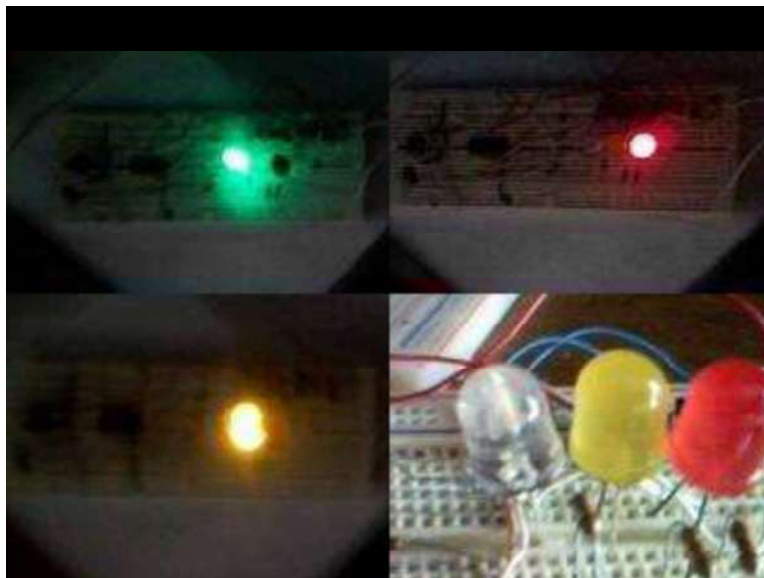


Figura 4.4 Circuito funcionando mostrando leds rojo, amarillo y verde

Para poder trasladar la luz hacia el semáforo tuvimos que hacer un molde como se muestra en la figura 4.5. En este molde se coloca arriba del circuito y tienes unos conductos para pasar la fibra óptica entre ellos, para llegar al otro extremo que se manipula la el brillo que sale del extremo final para poder esta utilizarla como si fueran varios leds pero con fibra óptica.

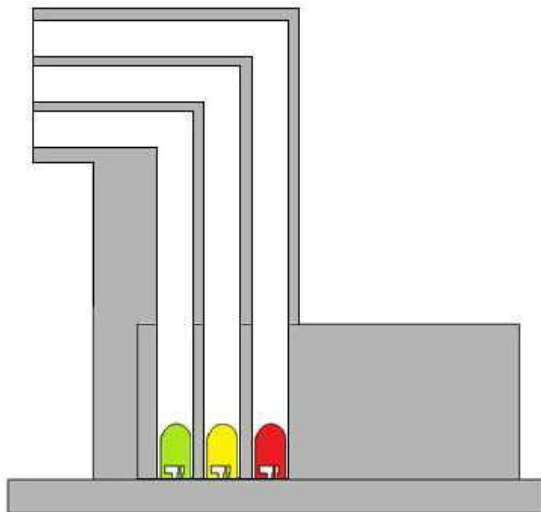


Figura 4.5 Molde encima de los leds

Para que las fibras ópticas puedan tener un mayor intensidad luminosa, se debe poner en el punto el cual ellas toman la mayor eficiencia en la luz como lo vimos en los capítulos anteriores con la apertura numérica casi deben ser arriba del led, para esto tuvimos que hacer un molde de esta manera las fibras pueden entrar en él y así tomar toda la luminosidad cual se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6 Molde que se muestra el funcionamiento de las fibras ópticas hacia el extremo final del semáforo.

Para poder tomar la luz que refleja el led se hicieron unos orificios al molde para que la fibra óptica tenga la mayor luminosidad necesaria por donde se va a colocarla y va ir por el conducto hasta el otro extremo así poder dar toda la luz necesaria esto se muestra en la figura 4.7.

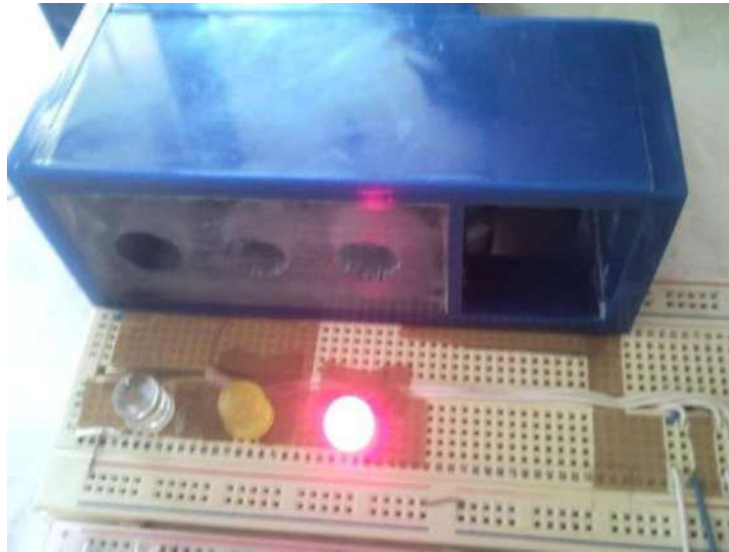


Figura 4.7 Se muestra el molde donde va cada led

A continuación en la figura 4.8, se muestra el molde donde lleva la fibra óptica por el conducto muestra donde va cada led que trasmite a través de la fibra óptica la luz y así poderla utilizar para las vías de transito



Figura 4.8 Molde terminado y puesto encima del circuito

En la figura 4.9 se muestra el lugar donde va el otro extremo de la fibra para así, los leds puedan ser remplazados por la fibra óptica por un molde que tiene el aspecto igual al del led sólo que en vez de utilizar energía eléctrica se utiliza la iluminación por medio de la fibra óptica. Esta puede utilizarse por cada led que hay en los semáforos.



Figura 4.9 Molde para sustituir a los leds por la parte de la fibra óptica. Tiene la punta similar a un led solo que en la parte de atrás se podrá introducir las fibras ópticas.

Ahora que el molde está listo para trasladar la luz hacia el otro extremo de la fibra óptica, en la figura 4.9 se muestra como se puede utilizar la fibra óptica que se usan para este tipo de servicios.

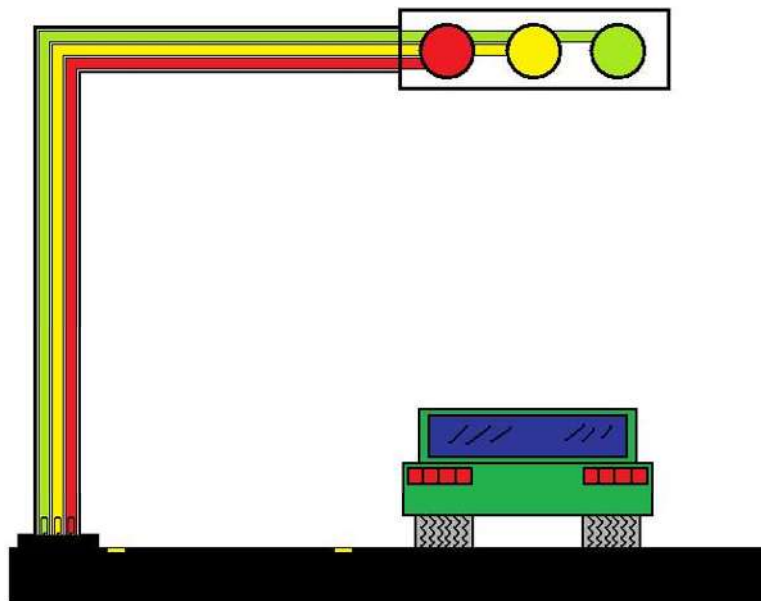


Figura 4.10 Modelo de cómo se utilizan en las vías del tránsito.

En la figura 4.10 se muestra como se dirigen las fibras del circuito hacia el semáforo donde están colocadas cada una de las fibras ópticas con su respectivo color.



Figura 4.11 Las fibras ópticas se colocan en el molde y hacia el semáforo.

Figura 4.12 En la figura se muestra que el circuito se encuentra debajo del molde y así sacar las fibras y estas llegan al semáforo.



En la figura 4.12 se muestra como se colocan las fibras ópticas en los moldes que anteriormente se habían mencionado parecidos a los leds estos se colocan dentro de ellos para así dar la luz. Estas con el circuito anterior hace cambiar cada uno a diferentes colores verde, amarillo y rojo.

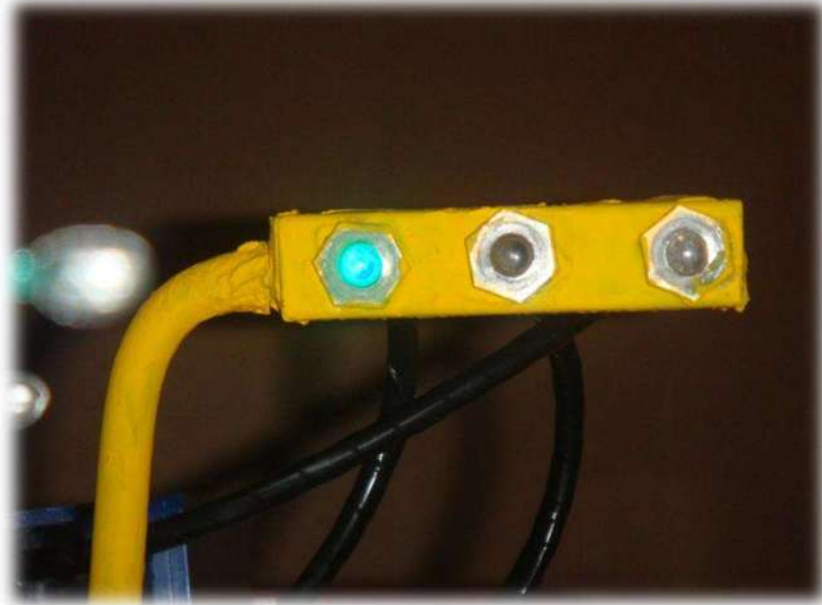


Figura 4.13 -El semáforo armado con la fibra óptica

En la figura 4.13 se simula como puede ser en la noche un semáforo de este tipo esto puede ser muy brillante y ahorrador, así pudiendo remplazar los led por fibras ópticas.



Figura 4.14 -El semáforo simulando estar en la noche.

4.2 Señales viales iluminadas por medio de fibra óptica

Para llevar a cabo la iluminación de algunas señales viales que este caso vamos a tomar las líneas que van entre un carril y otro dependiendo de la carretera y la señal de vuelta a la derecha, las vamos a iluminar cada uno con fibra óptica pero vamos a utilizar sólo un foco en el cual podrá ser cambiado de color por medio de un círculo giratorio de varios colores como se muestra en la figura 4.15

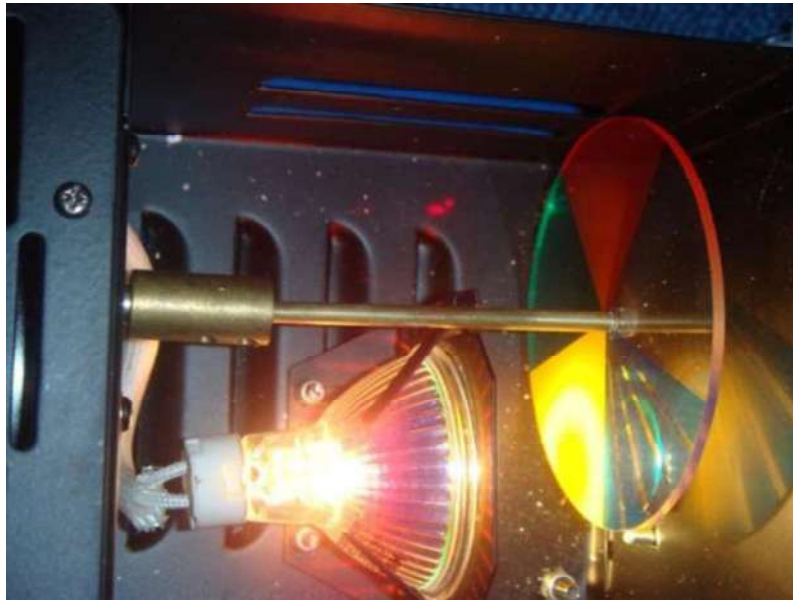


Figura 4.15 Modelo de iluminación en las vías del tránsito.

La figura 4.16 se muestra el kit donde está por dentro el foco y el círculo con varios colores y tiene un orificio donde se pone la fibra óptica y ésta puede ser utilizada en las señales.



Figura 4.16 Kit para iluminar las señales.

Después estas van conectadas a cada una de las líneas que hay en las carreteras como se muestra en la figura 4.17, cabe mencionar que no importa las condiciones climáticas de las carreteras pues estas son resistentes al agua.

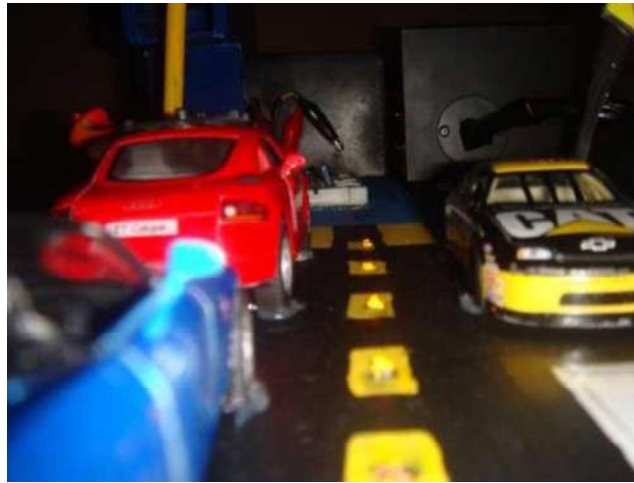


Figura 4.17 Simulación de la carretera iluminada.

Estas fibras van desde el foco hasta el otro lado de cada una de las líneas de vías de tránsito también son iluminadas también la señal para dar vuelta a la derecha como se muestra en la figura 4.18.



Figura 4.18 Señal para dar vuelta. Del lado izquierdo se puede observar van algunas fibras en la señal y a la derecha se puede ver las señal iluminada con las fibras ópticas.

Tales fibras son muy utilizadas y serían muy conveniente para evitar accidentes así como también se pueden ser utilizadas en las líneas de tránsito que son continua, al igual que en esta figura 4.19 sólo que se utilizaría otro tipo de fibra óptica llamada fibra óptica side glow pero sería el mismo principio que se utiliza para está.

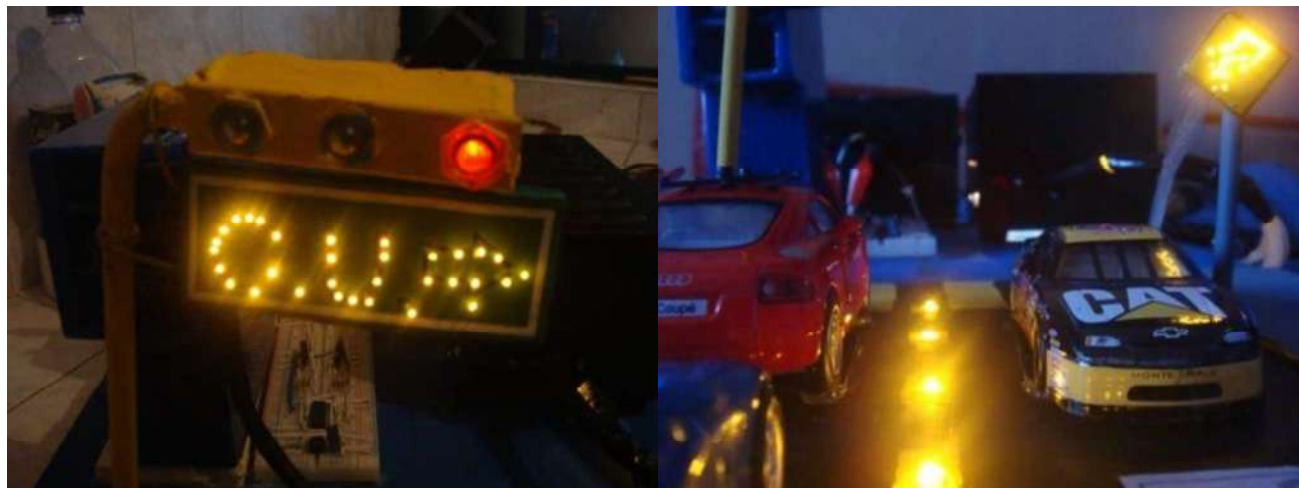


Figura 4.19 Las señales iluminadas ambas.

Para finalizar se muestra en la figura 4.20 la comparación de cuando es de noche y de día utilizando la fibra óptica se puede observar que esta es muy confiable en la noche, además de ser muy atractivo puede ser muy

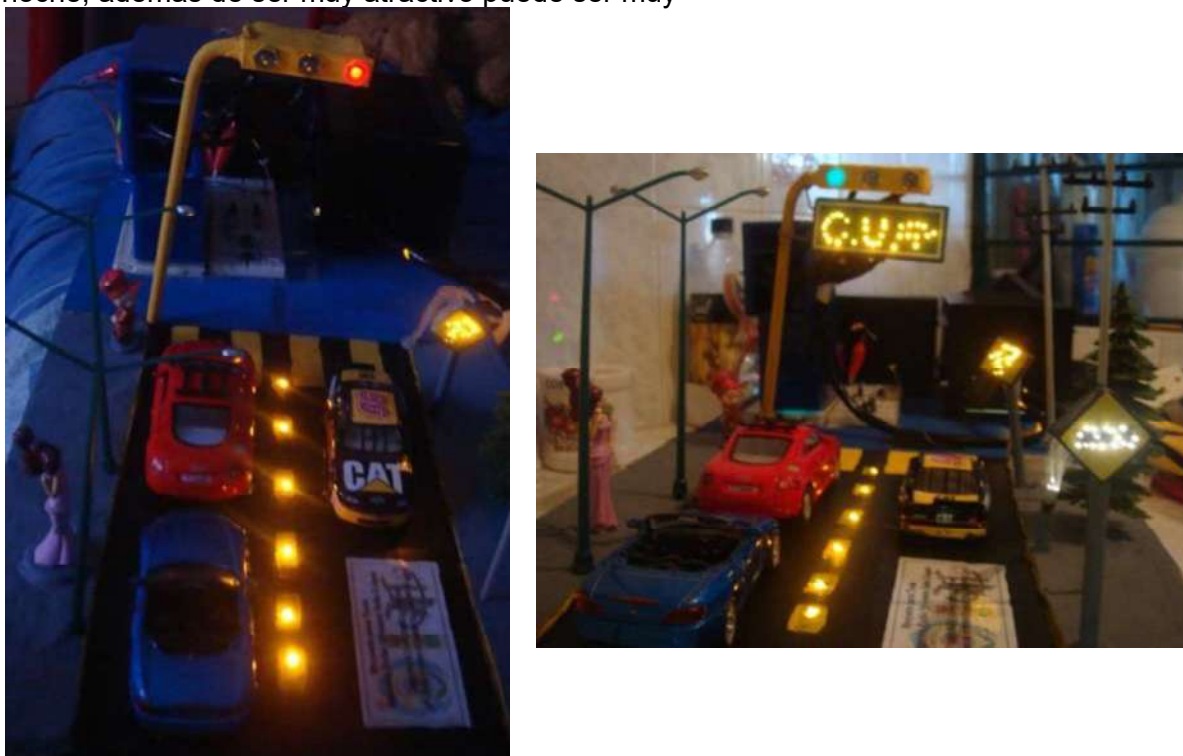


Figura 4.20 Simulación de cómo se vería las vías de tránsito iluminadas en la noche.

4.3 Características de la fibra óptica utilizada

La fibra óptica utiliza una de sus características importantes para que la luz pueda llegar de principio a fin. En la figura 4.21 se puede observar mejor la pérdida de luz en una fibra óptica.



Figura 4.21 A la izquierda se muestra la fibra óptica sin ningún golpe ni pérdida de luz y a la derecha se muestra una fibra golpeada y con algunas pérdidas de luz.

Algunos detalles para la fibra son su diámetro. Sin embargo está determinado por la cantidad de Fibras:

14 Fibras :	3/16"	4.8 mm
23 Fibras :	1/4"	6.35 mm
32 Fibras :	5/16"	7.9 mm
42 Fibras :	3/8"	9.5 mm
84 Fibras :	1/2"	12.7 mm
126 Fibras :	5/8"	15.9 mm

Todas las Fibras son: de .30 / 0.75 mm. Número de fibras indicadas en cada modelo dentro de un tubo de PVC

El brillo es dependiente sobre varios factores tales como color, fondo, cociente del contraste, ángulo de visión y condiciones ligeras ambiente. También cuanto mayor es el número de filamentos del cable, más brillante es el resultado final.

La mayoría de las fibras son aprobadas para de interior o el uso al aire libre. La fibra óptica está protegida contra los rayos UV (ULTRAVIOLETA) así que puede ser instalado casi dondequiera. La fibra puede estar en las temperaturas a partir de -40 grados de centígrados a 200 grados de centígrados.

El costo de la fibra óptica por dólar /pie se muestra a continuación:

Cable emisor al final (End Emitting Cable)

Filamento 3.8 mm de diámetro	\$0.65/pie
Filamento 5.5mm de diámetro	\$0.95/ pie
Filamento 7 mm de diámetro	\$2.49/ pie
Filamento 9.4 mm de diámetro	\$3.84/ pie
Filamento 10.5 mm de diámetro	\$4.61/ pie
Filamento 12mm de diámetro	\$6.99/ pie
Filamento 13 mm de diámetro	\$8.75/ pie
Filamento 15mm de diámetro	\$9.75/ pie
Filamento 15.5mm de diámetro	\$15.75/ pie
Filamento 16mm de diámetro	\$19.65/ pie

Las fibras ópticas así como el cable de neón son similares. Sin embargo, tienen algunas diferencias, el cable es virtualmente irrompible y es extremadamente económico de energía.

En la siguiente tabla 4.1 se muestra una idea general de las ventajas del cable óptico de fibra comparado al neón. No considera el coste para uso general eléctrico de neón sobre fibra.

Tabla 4.1 Comparación de costos de Neón y fibra óptica

Característica	Neon	Fibra óptica	Ahorro \$\$
Costo por 100ft	\$2000	\$2000	---
Instalación	\$1000	\$250	\$750
5años de manteni.	\$1250	\$250	\$1000
TOTAL	\$4250	\$2500	\$1750

4.4 Comparativa de Semáforos de lámpara incandescente con LEDs.

El Semáforo de luces incandescente como la figura 4.22 es idéntico a las señales de tránsito usadas en las vías urbanas y brinda una serie de ventajas como:

- Las luces tienen lentes de 20 cm. (8") y 30 cm. (12") de diámetro y se les puede instalar focos incandescentes de 100 watts.
- El cabezal debe conectarse a una fuente de 127 V de corriente alterna.
- El cabezal es de policarbonato, en colores amarillo, negro y verde. Así como el frente y las viseras que pueden ser de tipo túnel o cachucha.
- Puede combinar los colores del cabezal, frente y viseras como lo necesite.
- Los colores de lentes disponibles de línea son: rojo, ámbar y verde, en sólido y flecha.
- Bajo porcentaje de absorción de agua.
- Alta resistencia estructural y excelente estabilidad dimensional.



Figura 4.22 Semáforo de lámparas incandescentes verde y rojo.

Los semáforos de luces LED como en la figura 4.23 son idénticos a las señales de tránsito usadas en las vías urbanas y brindan una serie de ventajas como ahorro de energía, menor costo de mantenimiento, mayor seguridad vial y operativa. Eliminan el efecto fantasma y pueden ser reemplazados en secciones actuales.

A continuación se describen con más detalle para que conozca cada una de sus características:

- Ahorro de energía. Una lámpara LED puede lograr ahorros de hasta 90% en consumo de energía comparada con un foco incandescente.

- Menor costo de mantenimiento. Dado que la vida efectiva de las lámparas LED es mayor, el cambio de unidades es menos frecuente.
- Mayor seguridad vial. Ya que los semáforos de LED ofrecen más brillantes y luminosidad.
- Mayor seguridad operativa. Debido a la durabilidad de los LED's es recomendable emplear sólo una unidad roja para el ALTO en los semáforos y no dos, como se hace en los semáforos de luz incandescente y de halógeno.
- Elimina el efecto fantasma. Ya que el diseño de las lámparas de LED's impide la creación de este efecto, por no requerir reflector.
- Recuperación rápida de su inversión. Dados los ahorros de energía, su bajo mantenimiento y durabilidad, la recuperación de su inversión en semáforos de LED's se dará en menos de la mitad de su vida útil.
- Cuidan el ambiente. La energía ahorrada se traduce en menos generadores eléctricos trabajando y un mejor ambiente para todos.
- Mejor visibilidad. La distribución de los LED's cubre uniformemente el orificio del lente, mejorando la visibilidad del semáforo, al mismo tiempo que dan imagen de modernidad.



Figura 4.23 Semáforo de lámparas luces LED verde, amarillo y rojo.

- Focos a prueba de luz solar. Los rayos ultravioleta no afectan la coloración de los focos.
- Diseñados para reemplazo directo en secciones actuales.
- Cumplen con los estándares de calidad mundiales.
- Resistentes al polvo y humedad.
- Montaje a prueba de intemperie.
- Esperanza de vida entre 15 y 25 años.
- Estimado de fallas menor al 3% después de 200,000 horas de funcionamiento.
- Temperatura de operación: 4° C hasta 74° C.
- Gran resistencia al impacto y al vandalismo.
- Pérdidas menores al 1% de luminosidad con la falla de 1 LED.

4.5 Otras aplicaciones con fibra óptica

Como se muestra en la figura 4.24, se puede utilizar para innovar las prendas de vestir pueden ser iluminadas como una prenda sin mangas puede brillar. Los artículos de la manera similares a esto tal como bolsos, las decoraciones, e incluso el pelo óptico de fibra están también disponibles



Figura 4.24 Bolsa, Minitop, tops y cortinas iluminadas con fibra óptica.

Para decoración de una discoteca, recamaras o hasta un restaurante y este puede no solo ser de un color sino cambiar a varios colores como se muestra en la figura 4.25. Además de poder iluminar no sólo un cuarto sino varios.



Figura 4.25 Un cuarto de un restaurante puede cambiar a varios colores.

En la figura 4.26 se puede utilizar para iluminar las escaleras del patio de una casa y así también una piscina, como estas son resistentes al agua, a las condiciones ambientales y poder hacerlas más visibles en la noche.



Figura 4.26 Las escaleras de una casa y la piscina.

También se puede observar en la figura 4.27 que la publicidad puede ser utilizada por la fibra óptica, sin embargo esta se encuentra casi siempre prendida durante toda la noche puede ser ahorradora y eficiente para consumo.



Figura 4.27 Letreros iluminados.

Algunas otras aplicaciones se pueden utilizar en los hogares que estas pueden remplazar a los focos que se usan sin embargo se pueden utilizar también en las oficinas. Como se muestra en la figura 4.28 se pueden usar como lámparas.

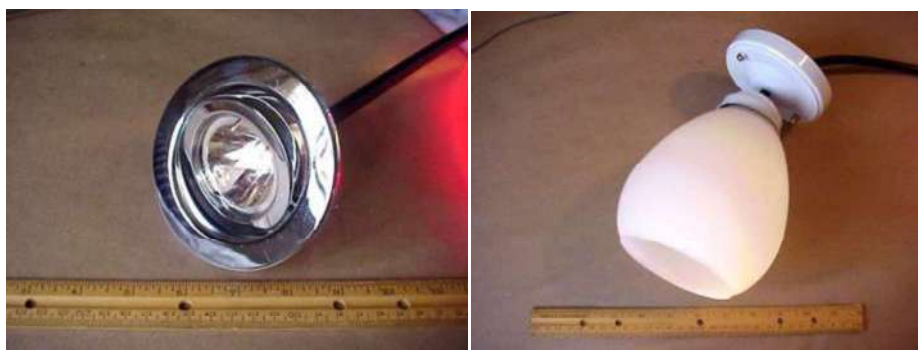


Figura 4.28 Focos de fibra óptica para hogares.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Para poder llevar a cabo estas investigaciones se tuvo que realizar un experimento de la construcción de un prototipo de semáforo basado en fibras ópticas.

Es importante señalar que tiene un costo razonable la fibra óptica en comparación con los cables de cobre. Una de las ventajas más notables de la fibra óptica es la velocidad de transferencia de luz y datos.

Las señales luminosas se degradan menos que las señales que pasan a través de conductores de cobre. A comparación de los cables de cobre que estos consumen mayor cantidad de luz, el peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos.

La propuesta de esta tesis es de transmitir la luz de la fibra óptica desde el led hasta el lugar donde se encuentra el otro extremo de la fibra para poder así dar la luz necesaria para mostrar el color del semáforo que se encuentre. Con respecto al tiempo para llevar la luz del led hasta el fin de la fibra este tiempo es casi instantáneo que esto no sería problema en el sentido de llevar el color de luz al semáforo.

Otra de las ventajas de la fibra óptica es inmune al ruido y las interferencias. Las fibras no pierden luz, por lo que la transmisión es también segura y no puede ser perturbada. Por lo que, en un caso remoto un semáforo construido con fibra óptica pudiera ser instalado en líneas de distribución o de transmisión sin temor a la distorsión de las señales.

Las principales razones detrás de esta elección son los costos, la eficiencia y conveniencia. El material utilizado en la fibra óptica lo hace muy cómodo de usar, esto hace que sea más fácil de llevar, y el paquete creado. Aparte de esto, las fibras ópticas no calientan y no son inflamables. Esto daría lugar a poder ahorrar un poco de espacio además a este tipo de semáforo estuviera bien poner una celda solar para poder así ahorrar energía eléctrica.

Por lo tanto, este trabajo de tesis pretende describir un proyecto a futuro como una nueva alternativa en la señalización de vías de tránsito y su control por semáforos, en los cuales, la información luminosa se despliegue a través de fibra óptica con sus características propias y pudiéndole dar un sentido de estética. Diseñando de manera adecuada el consumo de energía eléctrica se puede reducir mucho, así como los costos.

5.2 RECOMENDACIONES

Como recomendación general de este trabajo se propone que esta facultad se dé un tema selecto de fibras ópticas por sus múltiples aplicaciones. Así mismo, se recomienda realizar un prototipo a escala real de lo planteado en esta tesis para analizar, funcionalidad, ahorro de energía y costo real del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

1. www.dsif.fee.unicamp.br/~moschim/cursos/simulation/simulation.htm
2. www.ordenadores-y-portatiles.com/fibra-optica.html
3. http://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_fibra_%C3%B3ptica
4. http://html.rincondelvago.com/fibra-optica_10.html
5. <http://www.del-lighting.com>
6. <http://www.lumigram.com/>
7. www.fibraopticaleds.cjb.net
8. Instalaciones de fibra óptica : fundamentos, técnicas y aplicaciones
Chomycz, Bob
McGraw-Hill
Madrid
1998
9. Sistemas de comunicaciones por fibra óptica
Jardón Aguilar, Hildeberto
Instituto Mexicano de Comunicaciones
México
1995
10. Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas
Nérou, Jean Pierre
Editorial TRILLAS
1era edición
México
11. Introducción a la fibra óptica y el laser
Safford, Edward L.
Editorial Paraninfo
Madrid
1988
12. Sistemas de comunicaciones por fibra óptica
Jardón Aguilar, Hildeberto.
Editorial Alfaomega
México
1995