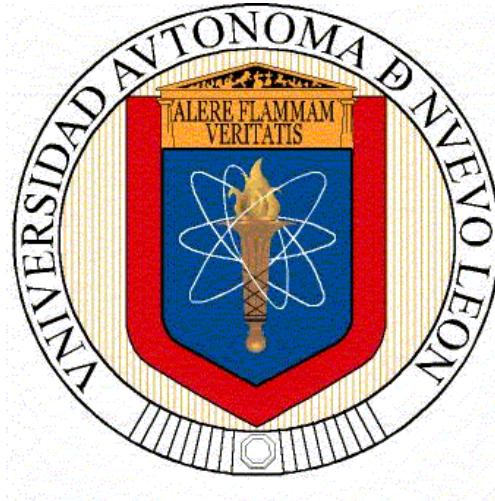


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE
DÍA EN INTERIORES MEDIANTE FIBRA ÓPTICA

POR

TANIA NICTE MATA MATA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

MARZO, 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN DE
DÍA EN INTERIORES MEDIANTE FIBRA ÓPTICA

POR

TANIA NICTE MATA MATA

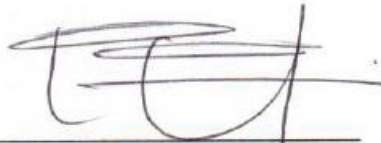
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

MARZO, 2015

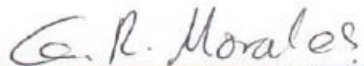
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Estudio y diseño de un sistema de iluminación de día en interiores mediante fibra óptica" realizada por la alumna Tania Nichte Mata Mata, con número de matrícula 1433433, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis



Dra. Norma Patricia Puente Ramírez
Asesor



Dr. Gustavo Rodríguez Morales
Revisor

Dra. Noemi Lizarraga Osuna
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, marzo 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios, nuestro señor, por permitirme llegar y terminar esta etapa de mi vida.

A mi asesora, la Dra. Norma Patricia Puente Ramírez por la orientación, motivación, esfuerzo, como también sus conocimientos brindados en la materia, su paciencia y sobre todo su apoyo sin lo cual no hubiera sido posible, el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Gustavo Rodríguez, por su ayuda y sugerencias en este trabajo.

A mis padres, por estar siempre a mí lado aconsejándome, apoyándome, e impulsándome a alcanzar mis metas y objetivos.

A mis hermanos, por su paciencia, apoyo y consejos.

A mis compañeros y amigos de la generación, por el apoyo mutuo, las horas compartidas en el estudio, su ayuda y ánimo brindando en este proceso.

A mis amigos, por su entusiasmo y ánimo transmitidos.

A los catedráticos de esta institución que ayudaron a mi formación académica.

También doy gracias al comité, Dra. Norma Patricia Puente Ramírez, Dr. Gustavo Rodríguez Morales y Dra. Norma Lizárraga Osuna por su interés y comentarios brindados en este trabajo.

Contenido

Resumen	7
Introducción.....	8
Capítulo 1	12
Antecedentes	12
1.1 Evolución del estudio de la energía solar	13
1.2 Evolución del estudio de los dispositivos ópticos y la fibra óptica en la iluminación.....	19
Capítulo 2	29
Fibra Óptica.....	29
2.1 Definición	30
2.2 Parámetros.....	32
2.2.1 Índice de refracción	33
2.2.2 Ángulo crítico	34
2.2.3 Ángulo de aceptación	35
2.2.4 Apertura numérica.....	36
2.2.5 Parámetro V	36
2.2.6 Modos	37
2.3 Tipos de fibras ópticas	38
2.3.1 Materiales	40
2.4 Condiciones de propagación.....	41
2.4.1 Refracción	42
2.4.2 Reflexión	43
2.4.3 Ley de Snell	44
2.5 Tipos de propagación de rayos	46
Capítulo 3	49
Estructuras en la fibra óptica	49
3.1 Definición	50
3.2 Tipos de estructuras.....	54
3.2.1 Análisis de la fibra óptica común	54
3.2.2 Análisis de la fibra óptica con abertura cónica	56
3.2.3 Análisis de la fibra óptica biselada.....	64
Capítulo 4	67

Energía Solar	67
4.1 Definición	68
4.2 El Sol.....	70
4.2.1 Espectro Electromagnético	71
4.2.2 Tipos de Radiación.	72
4.3 Transmitancia y Reflectancia	75
4.4 Reflectancia no polarizada en el sistema.....	77
4.4.1 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica común.	77
4.4.2 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica con abertura cónica.	79
4.4.3 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica biselada.	81
4.5 Energía del sistema.....	83
4.6 Energía del sistema con fibras ópticas comerciales.....	91
Capítulo 5.....	95
Pérdidas	95
5.1 Definición	97
5.2 Tipos de pérdidas.....	97
5.3 Atenuación en el sistema.....	99
Capítulo 6.....	103
Conclusiones	103
Referencias	107
Índice de Figuras	112
Índice de tablas.....	114

Resumen

La luz natural está caracterizada por ser parte del espectro electromagnético que emite el sol, es un tipo de energía limpia, renovable y asequible, una de las mejores formas de aprovechar este recurso es en la iluminación, por lo que en este trabajo de tesis se propuso un sistema de colección de luz solar empleando fibra óptica para iluminar espacios en interiores, se evaluaron cuatro tipos de estructuras en la cara incidente de la fibra óptica y diferentes materiales en su núcleo, con el fin de encontrar una combinación que colecte la mayor cantidad de luz solar, también se realizó el análisis con fibras ópticas comerciales monomodo y multimodo para definir cuál de ellos es idóneo en el sistema.

Se consideraron como geometría las siguientes estructuras: común que es la fibra óptica sin ninguna modificación, una abertura cónica a 30° , otra abertura cónica a 60° y biselada el cual se le hace un corte en diagonal a la fibra óptica; en las estructuras de la abertura cónica a 30° y 60° se realizó con el análisis de R. de Luca¹, las otras dos estructuras común y biselada se analizaron con la geometría que les corresponde, en las cuatro estructuras se contempló la óptica geométrica al igual que los fenómenos, parámetros y condiciones de una fibra óptica, en la evaluación de la energía solar se procedió con el análisis efectuado por Jaramillo², adaptándolo a este sistema.

Los resultados muestran que, logran coleccionar luz solar sin embargo algunas coleccionaron mayor cantidad de luz solar si su núcleo es de un material que absorba gran parte de estos rayos solares, las fibras ópticas comerciales multimodo presentaron pérdidas, así que las fibras ópticas monomodo serían las más aptas para el sistema, sin embargo una multimodo con un buen material puede igualar las pérdidas de una monomodo.

Palabras claves: fibra óptica, energía solar, energía renovable, iluminación.

Introducción

A través del tiempo los seres humanos han buscado la manera de aprovechar los recursos naturales, uno de ellos es la energía solar; la cual ofrece luz y calor, gran parte de este tipo de energía influye en el ecosistema y en la vida de los seres vivos tanto de animales como de plantas, esto ha llevado a los investigadores a estudiar su comportamiento, características y la manera de beneficiarse. La demanda de obtener una fuente natural e inagotable de iluminación ha incrementado a causa del agotamiento de los recursos energéticos por mencionar: el consumo de energía tanto residencial como comercial ha aumentado cada año provocando dificultades en el abastecimiento del gasto energético a nivel regional, nacional e internacional³, incluso los impactos ambientales que ha ocasionado debido a la intensa luz artificial emitida por las ciudades: desvían la trayectoria de las aves al migrar, reducen la vida de los insectos, disminuyen la intensidad de brillo en las estrellas⁴, etc. A partir de todos estos problemas se ha desarrollado diferentes maneras de iluminar con energía solar empleando: espejos solares, seguidores solares⁵, difusores⁶, tubos solares⁷, celdas fotovoltaicas⁸, etc.; estos dispositivos en su mayoría son costosos, poseen un angosto rango espectral y a su vez se ven afectados por los cambios climatológicos como lo son: la lluvia, el polvo, la bruma⁹, etc., haciéndolos ineficientes en su colección y también en su transmisión. La mayoría de los colectores que trabajan con dispositivos ópticos emplean fibras ópticas como medio de transmisión^{5, 6}.

La fibra óptica tradicionalmente es empleada en las comunicaciones, aunque en la literatura⁵ y experimentación¹⁰ ha demostrado ser una buena opción en la transmisión de energía solar, ya que presenta menos pérdidas, es eficiente en la propagación y transmisión además de soportar la intensidad de calor emitido por los rayos solares^{5,10,11}.

La mayoría de las pérdidas que presenta un sistema de colección de energía solar es la concentración del dispositivo óptico, ya que necesitan concentrar la energía colectada a un punto en específico para que sea dirigida a la fibra óptica y que esta misma logre propagarla, al momento de hacer este proceso se obtienen diferentes pérdidas⁵ como: de sombreado, reflexión⁹, mal enfoque¹¹, etc., a consecuencia de esto la fibra óptica no logra obtener una reflexión total interna de la luz solar por lo que se va perdiendo la propagación de la energía solar.

En este trabajo de investigación se consideró cada una de estas ventajas y desventajas de los sistemas de colección y distribución de energía solar, por lo que se enfocó en un sistema que colecte luz solar en fibras ópticas, se propuso diferentes estructuras en el extremo de la fibra óptica para colectar la luz solar, con un pequeño estudio detallado en los factores que permiten emplear esta tecnología para ser aplicada en la iluminación de espacios en interiores.

Objetivos

El objetivo general es proponer un sistema de colección de luz de día para iluminar espacios interiores mediante fibra óptica.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- Estudiar los factores que permitan implementar esta tecnología: como radiación solar, fibras ópticas, dispositivos ópticos que faciliten enfocar o colectar luz en las fibras ópticas, tipos de materiales, seguidores solares y difusores.
- Realizar cálculos numéricos que permitan obtener la viabilidad del sistema con parámetros reales de iluminación por localización geográfica.

- Modelar un sistema óptico que permita obtener la ganancia o pérdida real con parámetros comerciales.

Metodología

Se propuso un sistema con el fin de iluminar espacios en interiores con luz solar, el cual consistió en coleccionar la luz por medio de la fibra óptica, se consideraron cuatro estructuras diferentes en la cara incidente de la fibra óptica, la primera estructura es la fibra óptica común sin ninguna modificación, la segunda es una abertura cónica en el cual el vértice del cono es de 30° , la tercera estructura es también una abertura cónica pero con el vértice del cono a 60° y por último una estructura biselada es decir, con un corte en diagonal; se analizaron cada una de estas estructuras con óptica geométrica, parámetros y fenómenos ópticos, en el desarrollo de los cálculos se consideraron los valores reales de diferentes materiales y la irradiación solar que existe en Monterrey, N.L.; además en el análisis se estimaron valores de fibras ópticas comerciales que trabajan con longitudes de onda visible correspondientes al espectro de la energía solar, posteriormente se compararon los resultados con el objetivo de obtener o registrar estructuras aptas para el sistema de colección de luz solar.

Los capítulos que se describen en este trabajo de tesis están enfocados tanto a la fibra óptica como a la energía solar, en el capítulo 1 se presenta una breve historia de los antecedentes del estudio de la energía solar y de la fibra óptica, como ambos evolucionaron hasta unirse para un mismo fin. La definición, parámetros, fenómenos, tipos y condiciones de propagación de la fibra óptica se describen en el capítulo 2, es importante entender cada uno de estos conceptos puesto que son esenciales en el funcionamiento de una fibra óptica.

Con respecto al capítulo 3 se presenta el desarrollo del cálculo de incidencia en cada una de las cuatro estructuras propuestas de la fibra óptica y se explica porque se decidió evaluar las cuatro estructuras de las fibras ópticas sin revestimiento. El capítulo 4 describe la energía solar desde el funcionamiento del sol hasta la radiación que llega a la tierra, de aquí se desprende la longitud de onda en que se trabajó el sistema, también se explican los fenómenos que sufre la radiación emitida por el sol cuando atraviesa la atmosfera e incide en las cuatro estructuras de la fibra óptica y es evaluada para diferentes materiales reales, además se muestran los resultados variando el radio del núcleo de cada una de las estructuras de la fibra óptica; en este mismo capítulo se presentan los resultados de las fibras ópticas comerciales monomodo y multimodo.

Por último, en el capítulo 5 se describen los diferentes conceptos de pérdidas que existen en una fibra óptica y el tipo de pérdida que se obtuvo en el sistema propuesto, también se presenta la evaluación de pérdidas de las fibras ópticas comerciales monomodo y multimodo. En el capítulo 6 se explican las conclusiones a las que se llegaron conforme los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y algunas opciones para el trabajo a futuro.

Capítulo 1

Antecedentes

En este capítulo se relata la evolución en el estudio de la energía solar, como desde épocas remotas el ser humano se interesó en el estudio del sol, los fenómenos que lo afectan y como se ha beneficiado el planeta tierra con esta fuente de energía natural, se describe como los investigadores de en ese entonces estudiaban las formas de aprovecharla y ser explotada para diferentes fines; algunos de los sistemas que proponían fueron tan exitosos que llegaron a ser empleados por la Milicia, también se explica los motivos que llevo a este recurso natral a ser considerado como un sustituto de energía eléctrica. Por otra parte se describe la evolución de los dispositivos ópticos implementados en los sistemas de colección de luz solar, al igual que algunos antecedentes de la fibra óptica la evolución y desarrollo de este mismo en otros campos hasta llegar a ser implementando en los sistemas de luz solar.

Los antecedentes que se describen en este capítulo forman parte de este trabajo de tesis, ya que muestra la evolución de los elementos que son fundamentales la fibra óptica, energía solar y los sistemas que han sido estudiados, llevados a la experimentación y algunos que hoy en día ya están implementados.

1.1 Evolución del estudio de la energía solar

En 1915 Knox-Shaw¹² estudiaba la radiación solar por medio de la distancia zenith del sol, tomando en cuenta las variaciones de la intensidad con respecto al medio ambiente como lo son: el aire, el agua, el cambio climatológico, etc., observo cómo estos fenómenos afectaban la radiación solar, comenzó analizando la radiación solar que existe en un día completo, en días, semanas, meses, etc., durante las mañanas se le dificultaba medir la radiación ya que varía mucho con los cambios de transmisión de la atmosfera por las diferentes masas de aire, el vapor del agua, y las demás variaciones del medio ambiente; su estudio comprendió un año en el cual en ciertos meses apreció que la primera distancia en el día era de 70° con una masa de aire de 3.00 y la segunda era cerca de 50° con una masa de aire de 1.67, estos parámetros fueron cambiando para el mes de Noviembre con 20° y una masa de aire de 2.3 y 1.7, observo que la radiación solar que recibía el césped tenía una onda de longitud de 0-56 μ . En los años 20's, comenzaron a ver que los recursos que tenían eran limitados y que la fuente de energía solar era una comida necesaria para las plantas, así que en 1926 Transeau¹³ realizo un estudio de la acumulación de la energía solar por medio de las plantas con el fin de obtener futuras reservas de energía; emplearon las hojas de las plantas como medios absorbentes de energía solar y observo que no era suficiente la cantidad de energía que acumulaban, concluyo que las plantas no son eficientes en la recolección de energía solar por lo que hoy en día a este método se le conoce como la fotosíntesis. Los combustibles líquidos, petróleo y gasolina algún día se acabaran, aunque en la fotosíntesis el proceso de la fotoquímica resultaba ser una buena opción, puesto que les daba una posible esperanza de considerarse como un futuro suministro de energía natural, casi ilimitada y sin duda inagotable. Para 1930, Goddard¹⁴ et al., crearon un aparato el cual por medio

de la energía solar calentaba agua, esta invención proporciono los medios en los cuales la energía radiante del sol fue empleada para convertir un líquido en vapor dentro de un espacio o área limitada. En 1935, R. Estey¹⁵ et al., realizaron un estudio de la transmisión de radiación solar a través de un vidrio absorbente de calor. Para 1940, Parry Moon¹⁶ reporta un estudio más amplio sobre la radiación solar y la curva de irradiación que se obtiene sobre el efecto del mar considerando las diferentes variaciones de la radiación solar, como:

1. Variación del sol mismo.
2. Variación de la distancia Tierra y Sol.
3. Diferentes dispersiones en la atmosfera.
 - a. Por moléculas del Aire.
 - b. Por vapor del Agua.
 - c. Por Polvo
4. Diferencias en absorción atmosférica por O₂, O₃, H₂O, CO₂, etc.

Con la finalidad de que este estudio fuese aplicado en la ingeniería.

En los años 50's, Gardon¹⁷ trabajo en un horno solar con espejos segmentados de alta intensidad en radiación térmica, fabricado con espejos planos, examinó la penetración de la radiación dentro de los materiales, ángulos de incidencia, con una medición desde la superficie normal de la irradiación, requirió de una área grande para la irradiación dado a que debía reflejar los rayos solares; pero la presencia de polvo en los espejos fue un problema en su eficiencia, al final este horno solo sirvió para calentar agua. En 1957, John M. Davies¹⁸ et al., continuaron con el estudio de los hornos solares, en su caso con un horno solar QM (Quartermaster) el cual se compone de espejos esféricos, asegurando que este tipo de espejos esféricos proporcionaría una mejor información de los efectos de radiación térmica de alta intensidad en materiales; este tipo de hornos fue solicitado para fines de la Milicia de los E.U.

En los años 60's se discutía la aplicación de la fibra óptica a la transmisión de la radiación solar, pero en ese entonces Kato¹⁹ et al., realizaron un estudio con dos tipos de fibra óptica: una de fusión de sílice y la otra de cal soldada de vidrio de silicato, donde demostraron que las fibras ópticas de sílice fundido en el núcleo transmiten eficazmente la radiación solar, pero la fibra óptica de cal soldada de vidrio de silicato no logro transmitir debido a su alta atenuación, además la recolección de energía solar se vio afectada por los procesos de dispersión dado por las área, masas, la absorción procesada por el ozono, vapor de agua y otras sustancias químicas que cambian la distribución solar espectral; al final concluyo que la transmisión de la radiación solar a una longitud de 40mts es posible con la fibra óptica de fusión de sílice en el núcleo, debido a que logro transmitir un 80%, a raíz de este estudio se abrió las posibilidades de áreas de aplicación para la fibra óptica y a su vez la posibilidad de ser empleada en sistemas de iluminación.

En los 80's, Cariou²⁰ et al., experimentaron con el transporte de la energía solar en fibras ópticas, implementando un espejo parabólico el cual concentro la energía solar que suministraba 2 watts con una eficiencia superior al 70%, el uso de los espejos parabólicos ayudo a la concentración de la energía solar; estos espejos parabólicos fueron largos con grandes aperturas consideraron las propiedades de ambos elementos; el experimento consistió en usar estos espejos parabólicos como concentradores de rayos solares y en el centro del espejo ubicaron la fibra óptica, la cual recibía toda la energía solar y a su vez la distribuía, los resultados de esta experimentación demostraron la importancia de utilizar un espejo con alta reflectividad, la eficiencia del sistema alcanzo un 84%, pero a causa de la abertura del espejo a la fibra óptica que fue de 15° provocó que la energía de transmisión fuese menor de un 78%. Entre 1984 y 1985, Cariou²¹ et al., presentaron un nuevo enfoque en la fuente de alimentación de los hornos solares, en donde utilizaron la fibra óptica para transportar la energía solar y que alimentara estos hornos solares, en esta experimentación consideraron el número de fibras ópticas que emplearon para el horno esférico, en el cual estudiaron los límites de temperaturas cuando la

irradiación de la receptora fuera uniforme, los resultados que obtuvieron fue la posibilidad de trabajar con la fibra óptica a altas temperaturas y aplicarla en los sistemas de energía solar, sin embargo los problemas con la radiación térmica siguen afectando a la fibra óptica debido a que el aparato con la radiación termo-óptica daño la fibra óptica.

En los años 90's reportaron un estudio más completo sobre la aplicación de la fibra óptica para la transportación de la energía solar, donde Noor Khatri²² et al., analizaron un sistema de captación de energía solar en el cual implementaban las fibras ópticas en la transmisión de la energía a partir de una plataforma y otra doble plataforma tridimensional, incluyeron un CPC (Concentrador Parabólico Compuesto) el sistema fue llevado a la simulación, pero siguieron obteniendo el mismo problema con las altas temperaturas que quemaban los extremos de la fibra óptica causado por las grandes concentraciones de energía solar; por lo cual emplearon concentradores hechos de plástico o vidrio, gracias a esto el rendimiento del sistema mejoró con un aumento en la reluctancia de la superficie, pero a su vez aumentó la longitud de la fibra óptica y disminuyó la eficiencia a causa del aumento de esta longitud de transmisión, además de las pérdidas de absorción en la fibra óptica. En 1999, Feuermann²³ et al., propusieron un nuevo concepto en la concentración de energía solar con una entrega de potencia eficiente y barata, el cual consistió en un conjunto de fibras ópticas con plato solar de 2mts. de diámetro con forma parabólica y está formado por miniplatos, estos miniplatos concentraban la luz solar y las fibras ópticas recibían la energía que estos absorbían; los miniplatos eran de forma parabólica que servían como bloques de edificio para el campo solar, estos platos alcanzaban la apertura de áreas de 400mts².

Para el año 2000, Kribus²⁴ et al., realizaron un estudio con respecto a los costos que se tendría al usar la fibra óptica en la recolección de la energía solar, considerando la baja apertura numérica de la fibra óptica que debido a esto no colecta suficiente energía, su ineficiente absorción, su falta de flexibilidad y por

las propiedades que esta posee, reportando que los miniplatos tampoco son eficientes, al final concluyeron que la mejor opción es utilizar la fibra óptica en los sistemas de concentración térmica solar, por lo que la distribución de fibra óptica para la pequeña planta central receptora es mejor que los campos de miniplatos, sin embargo sigue siendo caro este método. Entre el 2007 y 2008, Lombard³ et al., elaboraron un estudio en donde concientizan el impacto de los recursos de energía no renovable se están acabando debido a su excesivo uso, por lo cual consideraron obtener una reserva, realizó un análisis sobre la luz que se gasta en los edificios, casas, plantas industriales, etc. y observaron el gran aumento del uso de estos recursos en los últimos 20 años.

En el 2013, Sapia¹¹ trabajo con una energía sustentable diseñada para edificios que requieren de un sistema determinado y optimizado donde la energía fluya en todo el edificio es decir, que ilumine en todos los dominios del edificio por lo cual decide trabajar con un direccionamiento híbrido de luz solar y un sistema PV de luz eléctrica, basado en la integración de la luz de día y la luz artificial llevo a cabo el experimento en un laboratorio, el cual era un cuarto sin ventanas y subterráneo, colecto la radiación solar concentrando los discos colectores parabólicos en el techo y transporte la luz por medio de un conjunto de fibras ópticas; el sistema estuvo compuesto de un seguidor de sol de un colector primario parabólico (PPC) cubierto de una película con alta reflectancia, la cual reflectaba la radiación solar al segundo colector reflector óptico plano (SOE), cuya superficie es altamente reflectiva en el rango del espectro visible, mientras que el transparente está cerca del rango del espectro infrarrojo esto permitió la colección de los elementos PV; la radiación reflectada en el segundo colector ahora reducía solo la parte visible y alcanzaba las cabezas del conjunto de fibras ópticas, a partir de aquí la luz viaja a través de las fibras ópticas unos 10mts aproximadamente y llega a los tubulares de la luminaria. En la figura 1, se observa el diseño de este sistema.

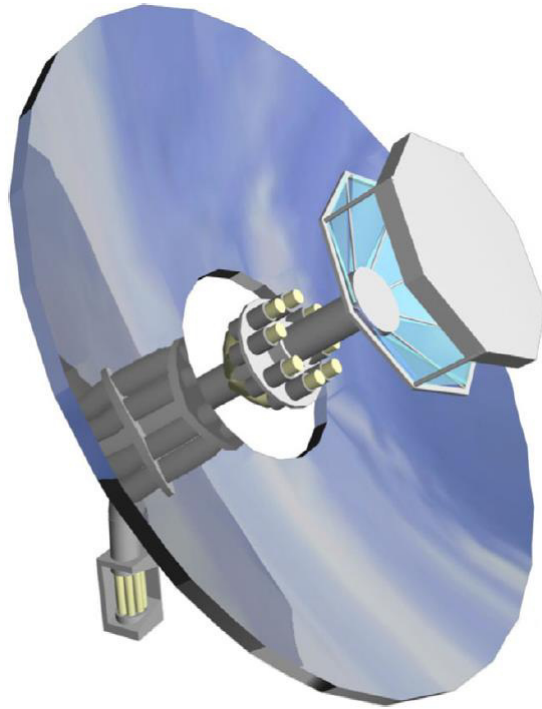


Figura.- 1. Luz de día por fibra óptica: sistema colector. Concentrador PPC, conjuntos de fibras ópticas, frecuencia selectiva (SOE), infrarrojo celda PV¹¹.

La concentración de la radiación incidente no la centra en un solo punto como en otros sistemas ópticos, en este caso la concentra en ocho puntos donde se encuentra el conjunto de fibras ópticas posicionadas como una corona en el centro del eje parabólico. Al final concluyo que desde el punto de vista económico la propuesta de solución no está lista para competir con los sistemas de iluminación tradicional, pero en algún futuro conseguirá a llegar a ser una muy buena competencia para los sistemas tradicionales, el prototipo se ha estado utilizando en una universidad de Italia en donde iluminan cuartos, salones de clases, bibliotecas y laboratorios.

1.2 Evolución del estudio de los dispositivos ópticos y la fibra óptica en la iluminación

Existe una historia donde se cree que un anciano palestino en los primeros siglos B. C., elaboro unos retratos de vidrio hecho de varios dibujos junto con vidrios de colores acomodándolos de una forma como de foto y cortados en secciones, fusionándolos como las fibras que se hacían en los años 60's. Una de las primeras patentes de la fibra óptica surgió en los años 20's, patentaron el manejo de la fibra óptica para la transmisión de imágenes ópticas y fue presentado por J.L. Baird²⁵ en Gran Bretaña. En los 30's, C.W. Hensell²⁶ et. al., solicitaron una patente en la cual describieron un conjunto de fibras ópticas flexibles, más tarde Heinrich Lamm²⁷ describió el uso del conjunto de fibras ópticas flexibles para la transmisión de imágenes ópticas, dejando así fuera los sistemas de lentes y enfocándose en la fibra óptica.

A finales de los años 50's varios investigadores como Van Heel, Hopkins y Kapany empezaron a publicar sus investigaciones acerca de la fibra óptica. En 1954, Van Heel²⁸ et. al., presentaron un nuevo método de transportar las imágenes ópticas sin aberraciones, debido a que cuando trabajaban con fibras ópticas transparentes producían una alta cantidad de pérdidas de luz, ellos propusieron recubrir las fibras ópticas con plata o cualquier otro material de menor índice de refracción para que la luz sufriera una reflexión total y de esta manera disminuyera las pérdidas de luz. En 1959, Kapany²⁹ realizó un estudio sobre el recubrimiento en la fibra óptica por medio del vidrio puesto que posee mucha fuga de luz, al final concluyo con la promesa de que las fibras ópticas recubiertas serian de mejor calidad y el manejo múltiple de fibras ópticas para una transmisión de luz superior. Para los años 60's el mercado de la fibra óptica creció tanto en su fabricación con sus diferentes componentes, siendo aplicada

en la industria y la medicina, la fibra óptica hecha de plástico fue empleada en los automóviles como conductos de iluminación a los paneles de luz, mientras que la fibra óptica de vidrio la aplicaban en los láseres para la identificación de los modos de la guía de onda. Tiempo después Kapany³⁰ reporto otro estudio de la fibra óptica pero esta vez por infrarrojos, componentes de la fibra óptica vidrio arsénico-azufre para la fabricación de diferentes medidas ya sea en el rango espectral y abrió la posibilidad de varias aplicaciones de la fibra óptica por infrarrojos. La fibra óptica también empezó a obtener mayor importancia en las comunicaciones, la primera comunicación a larga distancia se realizó con una fibra óptica de vidrio experimentado por Kao³¹ et. al., para 1968, Robbert J.³² et. al., elaboraron una pequeña reseña sobre la historia y evolución de la fibra óptica en ese tiempo, en el cual se aplicaba en la industria, medicina y se comenzaba a estudiar las propiedades de la fibra óptica, al igual que la implementación de su revestimiento y la fabricación del núcleo con diferentes materiales, apenas realizaban estudios de la fibra óptica múltiple, de absorción, etc.

En los 70's, Franklin³³ invento un sistema de iluminación por medio de fibra óptica, este sistema de iluminación fue aplicado tanto en el campo de la medicina como en las cirugías dentales, este sistema era capaz de iluminar cavidades bucales en comparación a varios instrumentos que en esa época no lograban iluminar espacios tan pequeños y angostos como los de una cavidad bucal, en la industria la fibra óptica fue muy explotada como: señalizador, controlador y detector. Para 1973 Miller³⁴ et. al., experimentaron con la fibra óptica debido a que en ese tiempo el emplear la fibra óptica como dispositivo de transmisión aumento tanto que en los laboratorios Bell trabajaron en la purificación del vidrio y la exploración de materiales puros para su fabricación, con el fin de disminuir los problemas de transmisión en la fibra óptica. En 1978, Hill³⁵ et. al., descubrieron la fotosensibilidad en las fibras ópticas, ellos detectaron la formación de cambios periódicos permanentes en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica dopada con Germanio, experimentaron con esta fibra óptica acoplado el haz de un láser de ion argón con una emisión

de 488nm y observaron el cambio del índice de refracción, por lo cual determinaron que la intensidad de la luz que regresaba reflejada desde la fibra óptica incrementaba significativamente, este incremento en la reflectividad fue el resultado del permanente grabado del índice de refracción siendo inducido en la fibra óptica. En 1979, Hui-pin Hsu³⁶ patentó una fibra óptica monomodo a un canal óptico acoplador de guía de onda end-fire monomodo es decir; se integra una sola fibra óptica dentro del tubo capilar, esta invención fue para los acopladores ópticos y sobre todo en el método de acoplamiento de una monomodo; en ese entonces las guías de onda y haces de la fibra óptica se empleaban para la transmisión de luz y también utilizaban acopladores para acoplar la luz, a causa de esto perdían pocos decibeles por kilómetro, el rendimiento de la óptica integrada iba mejorando los dispositivos como moduladores, interruptores, etc., por lo que la patente se basó en una monomodo que obtuviera pocas pérdidas en cuanto al uso de la óptica integrada en los acopladores.

En los años 80's, John A³⁷. et al., patentaron un sistema para comprimir la intensidad de la luz y enfocarla dentro del conducto de la fibra óptica, el cual consta de una fuente de luz de alta intensidad para un sistema de iluminación de fibra óptica, donde al final del extremo de la fibra óptica colocan un filtro para que la luz se concentre y de esta forma logre ser controlada la longitud de onda de la luz; experimentaron con fibras ópticas de vidrio y plástico, la luz transmitida por el haz de la fibra óptica se empleó para iluminar un instrumento musical tal como una guitarra, observaron que la fibra óptica de vidrio no es eficiente para un sistema de iluminación, esta fibra óptica estaba hecha por filamentos extraídos del vidrio los cuales estaban pegadas unas a otras con una sustancia llamada epoxi, este tipo de fibra óptica es comúnmente empleada en las transmisiones de comunicación, por otra parte; la fibra óptica polimerizada de plástico hecha por diferentes compuestos químicos al momento de sufrir un deterioro el cambio físico de los químicos provoca que la luz transmitida a través del conducto de luz se reduzca en la iluminación del sistema, por lo que aumenta el costo de su mantenimiento, de manera que la fibra óptica de

plástico polimerizado no es eficiente, así que los sistemas de Iluminación de la fibra óptica deben emplear una lámpara u otra fuente de luz que consuma menos de 150watts de electricidad, ya que producen demasiada energía calorífica, lo ideal son 120 o 130watts de electricidad y el conducto de la luz debe estar colocado lejos de la fuente de luz y no cerca de la fuente focal, para que la lente no se deteriore por el calor que este irradia; este sistema al final no produjo mucha luz ya que consume más de 500watts de electricidad, pero es posible aplicarlo en lugares donde no requieran mucho consumo de luz y que el calor de este no afecte como en: laboratorios, lugares húmedos que necesiten iluminación como las albercas, aunque en este último es imposible poner cable de electricidad en cambio la fibra óptica es capaz de iluminarlo.

En 1988, Stuart Shaklan³⁸ et. al., realizaron un estudio para calcular la eficacia que se obtiene al acoplar la luz de las estrellas en la fibra óptica monomodo, ellos calculan la eficiencia con la que se acopla el brillo de las estrellas a la fibra óptica monomodo, que es colocada en un plano focal de un telescopio, considerando la visibilidad, longitud de onda, etc., emplearon un programa de ordenador atmosférico frentes de onda para la verificación de la eficiencia del acoplamiento, debido a la distribución Gaussiana que posee el brillo de las estrellas. Para 1989, Cutolo³⁹ et. al., propusieron una estructura cónica en la entrada de la fibra óptica, ellos se enfocaron en el estudio de la minimización de pérdidas como las de retro-reflexión, radiativas, absorción y reflexión, con el objetivo de obtener un diseño óptimo en una fibra óptica dieléctrica cónica con una alta eficiencia en la colección de la luz; calcularon para cualquier longitud de onda y para la luz solar, en el análisis del haz de luz de un láser aconsejan emplear la estructura cónica de la fibra óptica sin revestimiento, y para la distribución de luz solar aconsejan emplear un conjunto de 9 a 10 fibras ópticas con revestimiento, debido a que la luz solar no se mantiene fija y su distribución es gaussiana; al final este tipo de estructura mostro un mayor radio de concentración en un área grande de entrada e incrementó el ángulo de aceptación

En los años 90's existía una gran demanda en la comprensión teórica de las relaciones bio-ópticas, y la necesidad de nuevas herramientas para la medición óptica del océano, Nueschuler⁴⁰ et al., presentó el cable de la fibra óptica para la construcción de un multicanal marino espectro radiómetro, estas se emplearon más como parte de la trayectoria de luz. Para 1993, Toomey⁴¹ et al., se enfocaron en el estudio del pH en la sangre por medio de la fibra óptica. En este mismo año James R⁴² et. al., patentaron un iluminador de vista con un colector de luz que sirve a la fibra óptica, esta invención provisiono la colección de luz y la condujo a una vista de cuerpo para maximizar la colección de luz y a su vez ser transferida a la fibra óptica, este colector está instalado al final de la fibra óptica; el material del colector convierte la luz ultravioleta dentro de la luz visible tan brillante sobre todo antes de que salga el sol, después de la puesta del sol y en bosques frondosos; el colector de luz y los elementos conductores están formados por un polímero con material fluorescente, poseen una proporción relativamente grande a la luz recogida de la superficie y una pequeña zona de borde que emite la luz hasta las líneas de la fibra óptica, estos elementos del colector y de los conductores incluyeron segmentos curvos, así como segmentos cónicos para una adecuada colección de luz de la superficie que emite el área del borde, de esta manera aseguraría la vista brillante de iluminación; una interfaz entre el colector de luz y los elementos conductores incluyeron agujeros formados en el conductor de luz y la realización de los miembros en el que los extremos de la fibra óptica están insertados; el sistema en si consta de una arco de tiro que incluía la fibra óptica para un sistema de iluminación en el cual los extremos opuestos de la fibra óptica actuaban como receptor de luz junto con un colector, en la figura se observa este sistema visto desde la superficie.

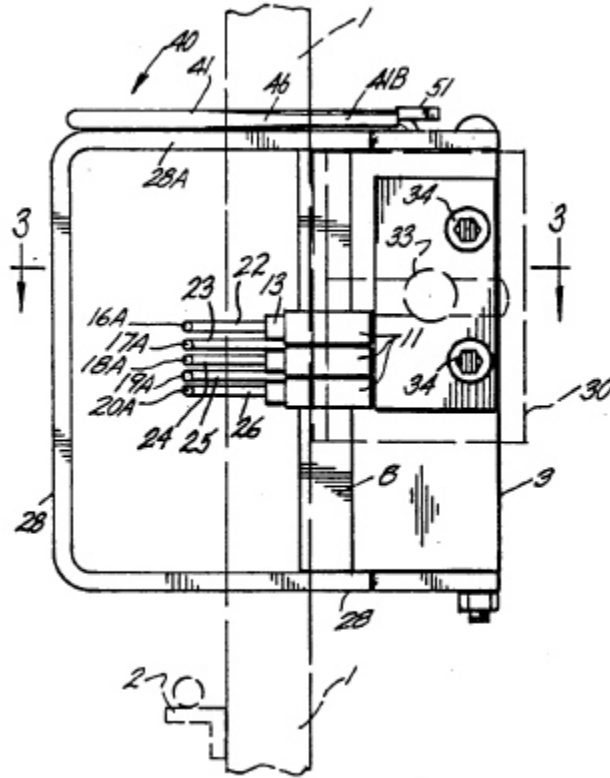


Figura.- 2. Es una vista en alzado posterior de la vista como se ve por un arquero durante el uso⁴².

Para el año 2002, Kirschkoweit-Lopin⁹ presento una nueva tecnología con la cual empleo la luz de día en edificios, con la posibilidad de ahorrar energía de la luz artificial, creo un tipo de sistema estimando ciertos aspectos como el sombreado, la protección del deslumbramiento, vista de fuera, guiado de luz y distribución de esta misma; el sistema de sombreado fue creado para bloquear el sol y que solo acepte la luz difusa pero, el uso convencional de estos sistemas provocan otros problemas como lo son: el sobrecalentamiento o los efectos de deslumbramiento y reducen el uso de la luz de día para tareas visuales en el interior de cuartos, pero en si este sistema fue capaz de re-direccionar la luz difusa hacia el interior causado por el rechazo o por la luz difusa del sol, el re-direccionamiento de luz logro hacer que el sistema de sombreado solo utilizara la luz difusa del cielo. El estudio que realizo Lopin sobre el sistema sombreado primario usando la luz difusa del cielo brillante,

como se explicó anteriormente donde bloquea la luz del sol directa pero a la vez siendo transparente para la luz difusa del cielo, en ese estudio considero las condiciones climatológicas, accesorios y desarrollo un criterio al escoger los elementos ya sea para la protección del deslumbramiento, la vista de fuera, el ahorro de potencia, la necesidad de seguimiento y su disponibilidad, etc., al final concluyo que hay un gran número de diferentes sistemas nuevos y óptimos que permiten de varias formas usar la luz natural, pero que se debe de considerar cuales son los aspectos que se requieren en caso de que se necesite iluminar un edificio, casa, escuela, etc., para evitar los problemas como: el sobrecalentamiento en los cuartos o demasiado deslumbramiento, con los elementos adecuados en el sistema, etc., para minimizar estos problemas.

En el 2006, R. de Luca¹ realizo un estudio de la fibra óptica con una abertura cónica en uno de sus extremos, donde el cono de esta estructura concentraba los rayos de luz, con el objetivo de transferir la máxima cantidad de energía radiante; la geometría del cable de la fibra óptica que el modelo permitió múltiples reflexiones de los rayos de luz en la superficie externa de la guía, cuando su extremo hueco se coloca a la proximidad del punto de luz concentrado en la trampa solar, el sistema consistió en dos espejos uno primario y uno secundario estos necesitaban una guía de luz para recoger los rayos de luz reflejados por el espejo secundario en el vértice del espejo primario y transmitían estos mismos rayos de sol con una pérdida más baja; al final solo redujo las pérdidas reflectantes e incremento la transmitancia del sistema.

Para el 2008, Zivkovic⁴³ et al., realizaron un estudio con la fibra óptica como uno de los compuestos para proyectiles balísticos, en el cual llegaron a la conclusión de la posibilidad de emplear la fibra óptica como sensores.

Para el 2010, Jeong Tai Kim⁷ et al., analizaron dos diferentes sistemas ópticos que capturan la luz del día los cuales son: “Sistemas de tubos de luz” y “Sistemas de espejos solares”, el experimento fue llevado acabo para iluminar un cuarto, construyeron estos dos sistemas que se observan en la figura 3 y 4.



Figura.- 3. Sistema de tubos de luz instalado en el techo⁷.

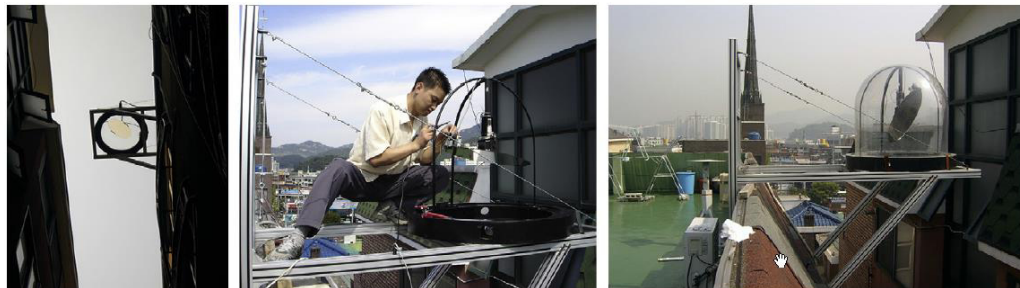


Figura.- 4. Instalación del sistema de espejos solares⁷.

Después de varias experimentaciones concluyeron que estos sistemas ópticos de luz de día provocan una vista confortante y logran ahorrar energía con un diseño muy adecuado; los sistemas de tubos solares consta de tubos que en su interior están segmentados de vidrio los cuales transportan y distribuyen la luz natural o artificial, la luz directa del sol es colectada ópticamente por estos tubos o espejos, el mejor tubo de luz con diámetro largo será el más efectivo, este sistema aún continúan estudiándolo pero ahora para la luz del sol en invierno. En cuanto al sistema de espejos solares demostraron una gran ventaja al lograr controlar la dirección de la luz del sol ya que son capaces de voltear a la derecha o izquierda, hacia arriba o hacia abajo y estos espejos pueden ser planos o curvos, el controlar la dirección de la luz es muy ventajoso ya que a diferencia de los sistema de tubos de luz no logran hacer esto debido a que su instalación es fija.

En ese mismo año, N. P. Puente⁴⁴ et. al, experimentaron con la fabricación de variaciones del índice de refracción a través del núcleo de una fibra óptica multimodo dopado de germanio, para demostrar que los parámetros son posibles de controlar, al final el experimento demostró una manera fácil de fabricar diferentes configuraciones que logran controlar el desorden de las rejillas de Bragg en las fibras ópticas. Un año más tarde reportan otro estudio de la fibra óptica con el diseño de las rejillas de Bragg⁴⁵ utilizando también la luz ultravioleta, la cual erosiona una parte del núcleo de la fibra óptica creando ciertos filtros que permiten cambiar la dirección de propagación de la luz y dejando pasar solo ciertas longitudes de onda, presentaron diferentes tipos de rejillas de Bragg como las: periódicas, aperiódicas, inclinadas, superestructuradas, aleatorias, etc.

En el 2012, Irfan Ulah¹⁰ et al., propusieron un sistema de iluminación con luz de día para iluminar edificios grandes donde normalmente son edificios de compañías que necesitan mucha iluminación para las oficinas de cada piso, para esto deben emplear un gran número de fibras ópticas, el sistema consistió en capturar la luz de día a través de un espejo parabólico y por medio de un arreglo de fibras ópticas iluminen uniformemente, también sugieren emplear lentes que distribuyan uniformemente la luz al interior; al final demostraron que un sistema de luz de día basado en la fibra óptica para edificios con múltiples pisos, logra iluminar cada piso uniformemente con más de 500lux y es capaz de iluminar uniformemente usando lentes al final de cada arreglo de fibras ópticas; este sistema que desarrollaron fue muy bien aceptado debido a la simplicidad de su diseño, facilidad de manejo y su rápida construcción.

Para el 2013, M.N.V. Padma Bhushan⁴⁶ et al., trabajaron con la creación de bloques de concreto translucidos modelados por fibra óptica, donde prometen que a diferencia de la fibra óptica común el bloque tendrá menos dificultad al calentamiento de la radiación solar, una resistencia mayor a como lo que posee una fibra óptica de plástico ya que obtendrá las propiedades del concreto; este tipo de concreto translucido está basado en las propiedades de una luz-

transmisiva, obteniendo los elementos de una incrustación de la luz óptica como los que posee una fibra óptica, con el fin de conseguir construcciones más inteligentes, aunque este tipo de material es caro, solo se aplicaría en la arquitectura de alta clase, como en paredes muy elegantes que lucirían como una pared de concreto normal pero una vez que la luz incida en esta pared brillara y se lograra ver a través de ella ya que es transparente, algunos de sus posibles aplicaciones son: en las prisiones en donde facilitaría el trabajo de los guardias en cuanto a seguridad y supervisión como: en museos, escuelas o casas.

En el siguiente capítulo se describen los conceptos, fenómenos, propiedades, características, etc. de una fibra óptica que son esenciales para los sistemas que trabajan con fibra óptica.

Capítulo 2

Fibra Óptica

El término de fibra óptica hoy en día es muy popular, es parte del estudio en el campo de la óptica debido a sus parámetros y características, en comunicaciones es comúnmente utilizada debido a la rapidez y las pocas pérdidas que presenta en la transmisión. La fibra óptica es capaz de transmitir luz en forma de ondas electromagnéticas; entre los cuales se encuentra: la luz infrarroja, ultravioleta y visible, su grosor varía dependiendo de la finalidad que se le vaya a dar; suele ser fabricada en micrómetros pero si se necesita para otros fines es posible que lleguen a fabricarse en milímetros; este tipo de tamaño es muy conveniente en el área de la medicina, ya que logra ser introducida en la cavidad bucal de la persona para explorar su interior y a su vez revisar el daño del órgano, en odontología les ayuda a iluminar espacios tan pequeños que una linterna o lámpara normal no logra, otra de las características favorables de la fibra óptica es su capacidad de resistencia ante diferentes factores ya sean físicos o climatológicas, aunque para lograr esta resistencia debe ser fabricada con materiales que le ayuden a soportar el calor, doblez, agua e incluso mordeduras de animales e insectos, para evitar todo este tipo de problemas, normalmente la fibra óptica está diseñada con un revestimiento y una cobertura externa.

2.1 Definición

La fibra óptica es como un hilo muy fino casi del grosor de un cabello, las dimensiones varían dependiendo de su aplicación, consta de un núcleo, un revestimiento y una cobertura, cada una de estas partes de la fibra óptica es de diferente material y estos materiales poseen diferentes índices de refracción, el núcleo se caracteriza por su índice de refracción n_1 mayor al índice de refracción n_2 del revestimiento, para que la luz incida en la fibra óptica y sea propagada de manera eficaz, pero también debe cumplir la condición del ángulo crítico. La diferencia entre el índice de refracción del revestimiento con el índice de refracción del núcleo permite que la luz no sea refractada hacia el revestimiento y solamente se refleje dentro del núcleo de la fibra óptica, la cubierta de la fibra óptica debe de ser de un material más grueso y resistente, puesto que debe soportar los cambios de temperatura ambientales y a la vez proteger la fibra óptica de agua, roedores, etc.

El estudio de la fibra óptica surgió debido a la demanda de una nueva tecnología en la transmisión de imágenes ópticas, ya que por mucho tiempo solo las transmitían por medio de un arreglo de lentes el cual en 1927, J. L. Baird²⁵ patentó un sistema para la transmisión de imágenes ópticas a distancia por medio de un arreglo de lentes y amplificadores, en ese mismo tiempo C. W. Hansell²⁶ patentó el conjunto de fibras ópticas flexibles y tiempo después Heinrich Lamm²⁷ describe el uso del conjunto de fibras ópticas flexibles para la transmisión de imágenes ópticas, dejando así fuera los sistemas de lentes para ahora enfocarse en la fibra óptica. Para los años 50's, el campo de estudio de la fibra óptica empezó a obtener más importancia, dado que en ese entonces surgió un gran cantidad de publicaciones, los cuales se enfocaban en las cualidades de transmisión de la fibra óptica, entre estas investigaciones destacaron las de Van Heel²⁸, Kapany^{29, 30}, etc., en donde describen en varios de sus libros el uso del conjunto de fibras ópticas para la transmisión de

imágenes ópticas. Van Heel en 1954, presenta un nuevo método de transportar las imágenes ópticas sin aberraciones, debido a que al trabajar con fibras ópticas transparentes producían una alta cantidad de pérdidas de luz, él propone recubrir las fibras ópticas con plata o cualquier otro material de menor índice de refracción para que la luz logre una reflexión total y de esta manera disminuir las pérdidas de luz. En 1960, la aplicación y fabricación de la fibra óptica aumento en la industria óptica, tanto en la transmisión de las imágenes ópticas, como en el de tubos luminosos para las lectoras de tarjetas perforadas donde tenían que detectarlo, al igual que el uso de fibras ópticas flexibles en medicina las cuales utilizaban como instrumentos médicos para la cistoscopia y gastroscopia; las fibras ópticas de plástico abrieron grandes posibilidades en la industria automotriz, debido a que su fabricación fue para el uso de la iluminación en los paneles y para indicadores ópticos en los bulbos exteriores³², al igual que en la iluminación de las cavidades bucales. Otro de los campos de estudio que empezó a obtener mayor importancia la fibra óptica fue en las comunicaciones, la primera comunicación a larga distancia se realizó con una fibra óptica de vidrio experimentado por Kao³¹, para 1968 las típicas pérdidas en la fibra óptica eran de 1000dB/km, en ese entonces Kao propuso el uso de materiales puros para la minimización de pérdidas en la fibra óptica. Los laboratorios Bell³⁴ empezaron a trabajar con la purificación del vidrio y la exploración de estos materiales puros en la fabricación de la fibra óptica, con el fin de disminuir los problemas de transmisión.

La fibra óptica utilizada en la iluminación ha tenido un gran éxito dado que su aplicación es muy amplia, abarca desde la iluminación de las cavidades bucales³³ de un paciente sin lastimarlo el cual ningún otro instrumento logra hacer, hasta iluminar albercas³⁷ este tipo de iluminación es muy peligrosa si se aplicara con un cable que transmita la corriente eléctrica que iluminara debajo del agua, con la fibra óptica se logra obtener esta iluminación sin ningún riesgo. En 1976, D. Kato y T. Nakamura¹⁹ experimentan con la fibra óptica en la transmisión de la energía solar utilizando dos tipos de material en la fibra óptica, la primera con el material de fusión de sílice y la otra con el material de cal

soldada de vidrio de silicato, donde concluyen que la fibra óptica de fusión de sílice es eficaz en la transmisión de luz solar con un alcance de 40mts y resistente a la radiación solar, este experimento abrió la posibilidad de utilizar la fibra óptica en sistemas de iluminación con luz solar.

Por años se estudió y se explotó el uso de la fibra óptica en el campo de la transmisión, utilizando dispositivos ópticos en la colección de los rayos solares, los cuales la colectan y la concentran en un punto en específico donde está ubicada la fibra óptica para que la transporte; sin considerar que la fibra óptica es capaz de coleccionar y transmitir la luz desde el medio ambiente sin necesidad de dispositivos ópticos.

Al paso de los años la fibra óptica ha ido demostrando su versatilidad en diferentes campos de estudio tales como: energías renovables¹⁹, industria³², medicina³³, comunicación³⁴, e iluminación³⁷, etc.

En este capítulo se presentan los parámetros, condiciones y tipos de fibras ópticas.

2.2 Parámetros

En el estudio de la fibra óptica existen parámetros que se deben incluir en su análisis como lo son: el índice de refracción, el ángulo crítico, ángulo de aceptación, apertura numérica, el parámetro V y la cantidad de modos que es capaz de propagar la fibra óptica, cada uno de estos parámetros mencionados se presentaran en las siguientes secciones.

2.2.1 Índice de refracción

El índice de refracción de un material es el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio⁴⁷:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

donde n es el índice de refracción, c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz del medio, algunos reportes indican la caracterización de los materiales^{47,48} como el cuarzo 1.55, vidrio 1.52, acrílico 1.49, diamante 2.42, etc. Si una luz incidente sea un rayo de sol que viaja en el aire con un índice de refracción $n_o = 1.0$ y este rayo incide en un extremo de la fibra óptica en donde el núcleo posee un índice de refracción $n_1 = 1.49$, como este índice de refracción de la fibra óptica es mayor al del aire, el rayo de sol será satisfactoriamente refractado al núcleo de la fibra óptica.

En la siguiente figura se observa la estructura de una fibra óptica.

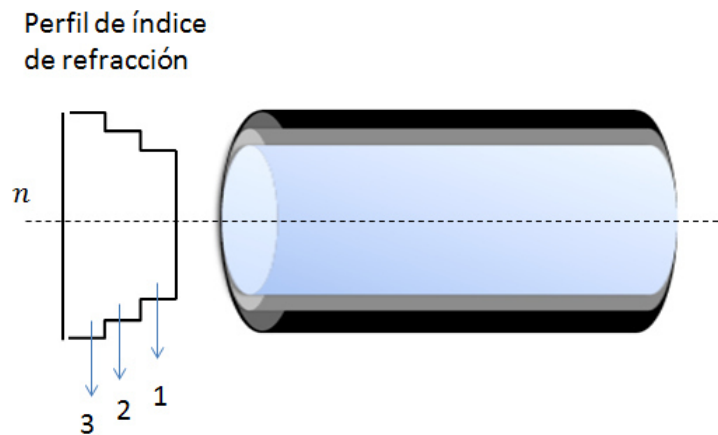


Figura.- 5. Esquema de una fibra óptica con el perfil de índice de refracción n .

De lado izquierdo de la figura se observa el perfil de índice de refracción, donde el número 1 indica que el índice de refracción del núcleo es mayor al número 2, el cual es el índice de refracción del revestimiento y el número 3 es el índice de refracción de la cobertura menor que el del núcleo y del revestimiento.

2.2.2 Ángulo crítico

El ángulo crítico o bien ángulo límite, determina el ángulo en el cual la luz es refractada, reflejada o bien sufre alguna reflexión total interna, el ángulo crítico se da cuando existen dos medios con índices de refracción n_1 y n_2 , si $n_1 > n_2$. Cuando el rayo incidente no logra refractarse y forma un ángulo de 90° respecto a la normal y se desplaza a lo largo de la superficie de separación de los dos diferentes medios, significa que el ángulo de incidencia alcanzó el ángulo crítico, como se observa en la figura 6.

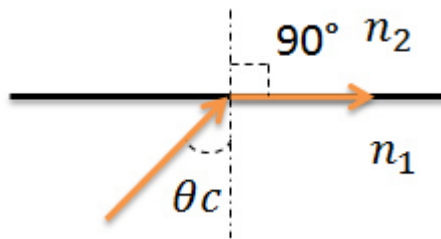


Figura.- 6. Rayo incidente cuando alcanza el ángulo crítico o ángulo límite.

Y el ángulo crítico se calcula de la siguiente manera⁴⁹:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Si el ángulo de incidencia θ es mayor al ángulo crítico θ_c , el rayo ya no es refractado al segundo medio y tampoco se queda paralelo en la superficie como en la figura 6, por lo que hace una reflexión total interna en el primer medio como lo muestra la figura 12.

2.2.3 Ángulo de aceptación

El ángulo de aceptación o bien ángulo de entrada determina los rayos que entraran a la fibra óptica y serán propagados a lo largo de esta, es decir dentro del núcleo al incidir en la pared del revestimiento hará una reflexión total interna, este ángulo de aceptación se forma desde el centro de la fibra óptica donde se encuentra el eje de guía de esta misma, formando así un cono en el exterior como se muestre en la figura 7.

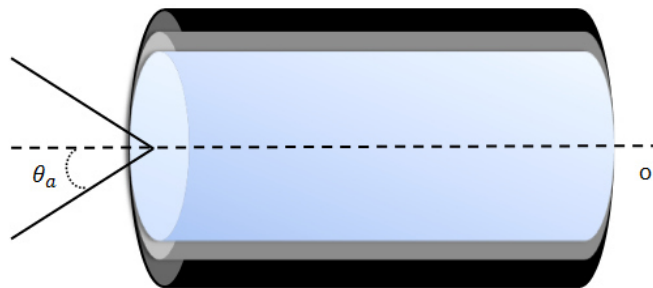


Figura.- 7. Fibra óptica con referencia al ángulo de aceptación (θ_a) donde la línea punteada (o) es el eje de guía de la fibra óptica.

Los rayos de luz que formen ángulos menores o igual al ángulo de aceptación son capaces de entrar a la fibra óptica y son propagados a lo largo de esta, los rayos de luz que formen ángulos mayores al ángulo de aceptación entraran en la fibra óptica, pero serán propagados por corto tiempo y terminaran siendo refractados al exterior, provocando pérdidas de luz en la fibra óptica.

El ángulo de aceptación está ligado al ángulo crítico, puesto que el rayo de luz que incide en la fibra óptica es refractado al núcleo, el cual debe formar un ángulo menor al ángulo crítico; los rayos de luz que entren dentro del rango del ángulo de aceptación serán guiados por la reflexión total interna (véase en la sección 2.4.3). El ángulo de aceptación se calcula de la siguiente manera^{47, 49}:

$$\theta_a = \sin^{-1} NA; \quad (3)$$

donde NA es el número de apertura dado en la ecuación 4.

2.2.4 Apertura numérica

La apertura numérica es un número adimensional, el cual indica la capacidad de captación de luz en la fibra óptica y es calculado con los índices de refracción del núcleo de la fibra óptica y del revestimiento⁴⁷.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4)$$

donde n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica y n_2 es el índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica.

Una vez calculado el valor del ángulo de aceptación de la fibra óptica y la apertura numérica, se debe calcular el parámetro V y los modos, estos dos últimos parámetros que se deben de considerar en el estudio de la propagación de luz en la fibra óptica.

2.2.5 Parámetro V

El parámetro V es un parámetro importante en el análisis de la fibra óptica ya que es la frecuencia normalizada¹, representado por un número adimensional el cual ayuda a identificar el número de modos que hay en la fibra óptica, normalmente este parámetro es una constante en relación a los modos, y está dado por⁴⁷:

$$V = 2\pi \frac{A}{\lambda_0} NA, \quad (5)$$

¹ Normalizar es dividir la cantidad entre la norma de este, para alguna norma conveniente o bien transformar una distribución cualquiera a una distribución normal.

donde A es el radio del núcleo de la fibra óptica y λ_0 es la longitud de onda (véase en el capítulo 4).

2.2.6 Modos

Los modos en una fibra óptica se considera el parámetro V , con este es posible saber la cantidad de luz que se propagara o bien los posibles caminos de las ondas luminosas; los modos suelen indicar el tipo de fibra óptica que se está analizando, aunque con ayuda del parámetro V es fácil saber si es una fibra óptica monomodo o multimodo^{47, 49}.

Cuando se trabaja con la fibra óptica normalmente no se sabe cuántos modos es capaz de propagar, para esto se debe calcular el parámetro V , si este parámetro es mayor a 2.405 se está trabajando con una multimodo, por lo tanto los modos se calculan de la siguiente manera⁴⁷:

$$M = \frac{4}{\pi^2} V^2, \quad (6)$$

en una fibra óptica multimodo de índice escalón, los modos se deben calcular con la siguiente expresión⁴⁷:

$$M = \frac{V^2}{2}, \quad (7)$$

si la fibra óptica multimodo resulta ser de índice gradual, los modos serán calculados con la siguiente expresión⁴⁷:

$$M = \frac{V^2}{4}, \quad (8)$$

en caso de que el resultado del parámetro V sea menor a 2.405, significa que se está trabajando con una monomodo, por lo que el diámetro del núcleo de la

fibra óptica es muy pequeño y el número de apertura también, si es así ya solo depende de la longitud de onda incidente en la que se trabaje. Los modos que no logran ser guiados se van al exterior de la fibra óptica por lo tanto se pierde la energía.

Existen rayos que una vez que están dentro de la fibra óptica se van propagando de manera diferente, por lo que algunos parámetros que se presentaron se calculan dependiendo el tipo de propagación (véase en la sección 2.5).

2.3 Tipos de fibras ópticas

La clasificación de la fibra óptica suele ser dada por: los números de modos como se mencionó anteriormente, perfil de índice de refracción, por su forma de estructura, etc. En esta sección se presentara solo dos tipos de fibras ópticas: monomodo y multimodo, las cuales se distinguen por las diferentes características que poseen.

Fibra Óptica Monomodo: solo propaga un modo debido a que el diámetro del núcleo de la fibra óptica es muy angosto, normalmente llega a obtener diámetros de 8.3 a 10/125 μ m y maneja longitudes de onda de 1550nm, este tipo de fibras ópticas son muy eficientes para transmisiones de larga distancia hasta de 400km ya que presenta menos pérdidas en su trayecto, debido a esto se utilizan más en la transmisión de datos puesto que llegan a transmitir una gran cantidad de bits.

La fibra óptica multimodo se subdivide en dos tipos, que son: la fibra óptica multimodo con perfil de índice de refracción escalón y la fibra óptica multimodo con índice gradual.

Fibra Óptica Multimodo: es capaz de propagar más de un modo es decir, transmiten varios rayos de luz en el núcleo de la fibra óptica, debido a que es más ancho su núcleo, este tipo de fibras ópticas tienden a transmitir en cortas distancias puesto que a distancias grandes empieza a presentar pérdidas de transmisión; debido a que entre más distancia vaya propagando y junto con los materiales que este hecho la fibra óptica, va afectando el aumento en las pérdidas.

1. Fibras ópticas multimodo con perfil de índice de refracción escalonado, se dice escalonado debido que cambia el índice de refracción en forma de escalón. Normalmente esta hecho de material puro y si llegara a variar no se notaría debido al material de dopaje⁴⁷ que insertan y el cambio de índice de refracción es tan pequeño, que se encuentra entre 0.001 y 0.02, los diámetros que maneja este tipo de fibra óptica son de: 8/125, 50/125, 62.5/125, 85/125, 100/140 μm .
2. Fibras ópticas multimodo con perfil de índice de refracción gradual, en este tipo de fibra óptica el índice de refracción del núcleo varia como lo dice su nombre gradualmente, desde el núcleo hasta al revestimiento y con un diámetro de 50/125 μm .

En la literatura se reportan estudios de análisis donde las fibras ópticas multimodo⁴⁷ trabajan con longitudes desde, 850nm hasta 1330nm a una distancia máxima no más de 2km.

2.3.1 Materiales

Las fibras ópticas más comunes son: SOF (fibra óptica de sílice) que poseen un diámetro de 1.47mm, pero no transmiten longitudes de onda mayores a $2.5\mu\text{m}$ y normalmente las pérdidas de atenuación son de .16dB/km, las POF (fibra óptica de plástico) con un diámetro de 1.98mm, estas fibras ópticas poseen unos índices de gel para reducir las pérdidas de aire-luz.

La fibra óptica de sílice altamente pura transmite a unos cuantos metros y trabaja con longitudes de onda que van de entre $1.8\mu\text{m}$ a $2.0\mu\text{m}$, con pérdidas muy pequeñas pero no transmiten el infrarrojo. La fibra óptica de fluoruro de zirconio y otros fluoruros de materiales pesados, permiten una buena transmisión entre las longitudes $1.8\mu\text{m}$ y $7.5\mu\text{m}$, su atenuación es de 4.3dB/km; las fibras ópticas de plástico sufren altos niveles de atenuación y su tolerancia a temperaturas altas es muy baja. Hay fibras ópticas donde su un núcleo es líquido y normalmente son de cuarzo éstas manejan rangos ultravioleta, con un diámetro de 0.5mm.

Las fibras ópticas en la aplicación de la energía solar desempeñan un rol diferente en comparación a las fibras ópticas utilizadas en la transmisión de información, visto que cualquier tipo de fibra óptica sea monomodo o multimodo son capaces de transmitir luz, como se mencionó en el capítulo 1, la fibra óptica es utilizada en la transportación de la luz solar, donde la luz es concentrada en un receptor remoto; con respecto al tipo de material de la fibra óptica que han utilizado en estos estudios sobresale el material de sílice, debido a que posee una alta tasa de transmisión en el espectro solar y soporta la intensidad de la radiación solar, la fibra óptica basada en materiales de cuarzo obtiene una gran ventaja porque no se daña fácilmente en la densidad de altos flux, normalmente las fibras ópticas poseen un revestimiento el cual evita que haya pérdidas de energía Aire-Luz.

Algunas de las capacidades de la fibra óptica en la transmisión de la energía solar es que logran transmitir la radiación solar a 40km y a su vez generar pocas pérdidas. En el campo de la energía solar utilizando la fibra óptica han experimentado con fibras ópticas de sílice, cristal, cal soldada de vidrio, silicatos, sílice manufacturada por cuarzo y revestimiento de resinas de silicón. Normalmente eligen trabajar con las fibras ópticas de plástico debido a que no son muy caras, son flexibles, fácil de trabajar con ellas al momento de cablear en un edificio, poseen un diámetro de núcleo ancho con pocos centímetros, el cual facilita una gran transmisión de luz y logran obtener una reflexión total interna.

La fibra óptica ideal para la experimentación de la luz solar es la del material de cuarzo de vidrio, pero este tipo de material es muy caro, otra opción es la fibra óptica de sílice puro con abertura EFTE (Etileno-Tetrafluoruro Etileno) es un plástico de gran resistencia al calor, a la corrosión y a los rayos UV, soporta hasta 170°C, el EFTE pesa menos que el vidrio y logra transmitir más luz.

2.4 Condiciones de propagación

Las condiciones de propagación en una fibra óptica son: la refracción, reflexión y la ley de Snell, las cuales en las siguientes secciones se describirían y se explicara cómo estas condiciones influyen en la propagación de la luz u ondas electromagnéticas.

2.4.1 Refracción

La refracción es un fenómeno muy importante dentro del campo de la óptica^{47,50}, independientemente de ser un rayo de luz solar o una transmisión de datos es indispensable que ocurra este fenómeno.

El fenómeno de la refracción ocurre cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro, provocando así un desvío en la trayectoria al momento que pasa al segundo medio, esto es posible solamente si los índices de refracción del primer medio es menor al índice de refracción del segundo medio.

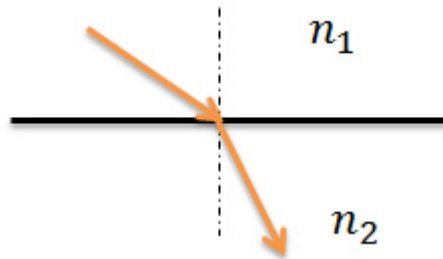


Figura.- 8. Fenómeno de la refracción con los índices de refracción n_1 y n_2 de diferentes medios.

Como se observa en la figura 8, el haz incidente es el rayo de luz el cual viaja en el aire n_1 e incide en la frontera del segundo medio, en este caso el vidrio n_2 , el rayo de luz es refractado al segundo medio y se observa como su trayectoria ya dentro del segundo medio se desvía, la línea punteada es la normal a la superficie.

2.4.2 Reflexión

La reflexión ocurre cuando un rayo de luz incide en la frontera del segundo medio pero no logra pasar a este, por lo que solo incide en la frontera y es reflejado hacia el primer medio, una vez que el rayo de luz es reflejado cambia su dirección como se muestra en la figura 9.

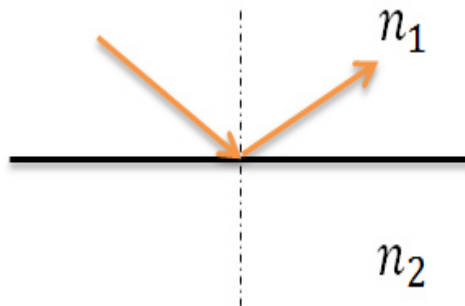


Figura.- 9. Fenómeno de la reflexión donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios.

Se observa que en la figura 9 el haz incidente es el rayo de luz el cual incide en la frontera del segundo medio en este caso vidrio n_2 , pero no logra ser refractado hacia este medio y es reflejado al primer medio el aire n_1 , por lo tanto cambia su trayectoria, la línea punteada es la normal a la superficie.

La reflexión y la refracción son dos fenómenos muy comunes en cuanto al estudio de la propagación de luz⁵⁰ y para eso es indispensable analizarlo con la ley de Snell.

2.4.3 Ley de Snell

La ley de Snell-Descarte consta de dos enunciados⁵¹:

- (a) Los dos segmentos rectos y el vector normal son coplanares y
- (b) Los ángulos θ y θ' entre los segmentos en n y n' y el vector normal satisfacen.

$$n \sin \theta = n' \sin \theta', \quad (9)$$

al referirse entre n y n' se consideran en este ejemplo como n_1 y n_2 , haciendo referencia a los índices de refracción de los diferentes medios en donde el rayo de luz se propague, cuando el rayo de luz viaja por el primer medio con su respectivo índice de refracción n_1 e incide en la superficie del segundo medio n_2 este rayo forma un ángulo θ con respecto a la normal a la superficie, como se observar en la figura 10.

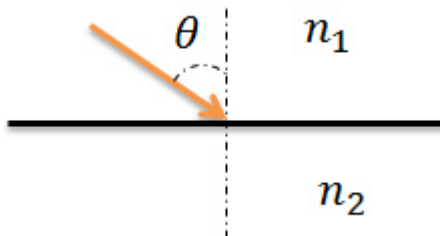


Figura.- 10. Esquema del rayo que incide en la frontera de los dos segmentos rectos y forma un ángulo θ con respecto a la normal de la superficie.

Una vez que el rayo incidente logra refractarse al segundo medio o segundo segmento el rayo desvía su trayectoria y forma un segundo ángulo θ' con respecto a la normal de la superficie como se muestra en la figura 11.

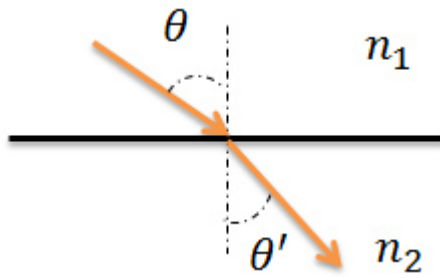


Figura.- 11. Esquema del rayo refractado al segundo medio o segmento formando el ángulo θ' con respecto a la normal de la superficie.

Otro de los fenómenos que ocurren en la óptica cuando se analiza el comportamiento de la propagación en fibra óptica, de la longitud de onda viajando en un medio incidente es la reflexión total interna; el cual ocurre cuando un rayo de luz incide en la fibra óptica independientemente que tipo de luz sea, (solar, infrarroja, no visible,) etc.

La Reflexión total interna ocurre cuando un rayo de luz incide en la superficie del segundo medio n_2 pero este no es refractado, por lo tanto es reflejado hacia el primer medio n_1 en comparación de una reflexión común se dice que es una reflexión total interna cuando cumple las siguientes dos condiciones:

- (1) Que el material o el medio en el que se encuentra el rayo incidente, debe poseer un índice de refracción n_1 mayor que el índice de refracción del segundo medio n_2 .
- (2) Que el rayo de luz que fue reflejado forme un ángulo de reflexión θ' igual que el ángulo de incidencia θ que se formó con el rayo incidente, estos ángulos formados con respecto a la normal de la superficie, pero el ángulo θ' debe ser mayor al ángulo crítico.

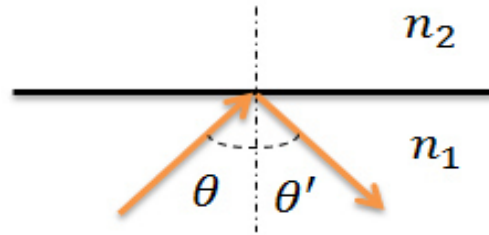


Figura.- 12. Esquema de un rayo de luz cuando sufre una reflexión total interna.

Se explicó los diferentes fenómenos de un rayo de luz emitido por cualquier clase de fuente natural o no natural, como actúa cuando incide en la fibra óptica y el estudio que se desarrolla al calcular los ángulos que va formando este rayo de luz en el núcleo de la fibra óptica; cabe destacar que estos fenómenos no son exclusivos de los rayos de luz, también se presenta en ondas: sísmicas, de radio, sonoras, electromagnéticas, etc.

2.5 Tipos de propagación de rayos

Los siguientes tipos de propagación de rayos que se presentan en esta sección son característicos de la fibra óptica multimodo. Cuando el rayo incide y logra refractarse dentro de la fibra óptica, existen dos maneras en las que se va a propagar y son: de forma meridional o sesgado.

Rayos meridionales: por lo general estos rayos se dan cuando hacen una reflexión total interna dentro de la fibra óptica y van rebotando con el mismo ángulo de incidencia en el que entraron a la fibra óptica^{47,49}, se dice que son meridionales por que entran formando el ángulo en el eje de la fibra óptica, como se muestra en la figura 13.

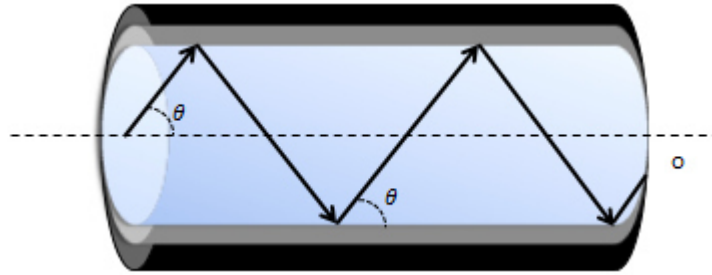


Figura.- 13. Representación de la trayectoria de un rayo meridional que pasa a través del eje de guía de la fibra óptica (o), formando el ángulo de incidencia θ .

Rayos sesgados: Este tipo de rayos sesgados a diferencia de los rayos meridionales pasan paralelamente al eje de la fibra óptica, es decir inciden fuera del eje de la guía (o), este tipo de rayos son más comunes a diferencia de los meridionales puesto que la mayoría de los rayos que inciden en la fibra óptica entran de forma sesgada, provocando una trayectoria en forma de espiral o helicoidal^{47,49}, esto provoca una medición de diferentes ángulos, como se observar en la figura 14.

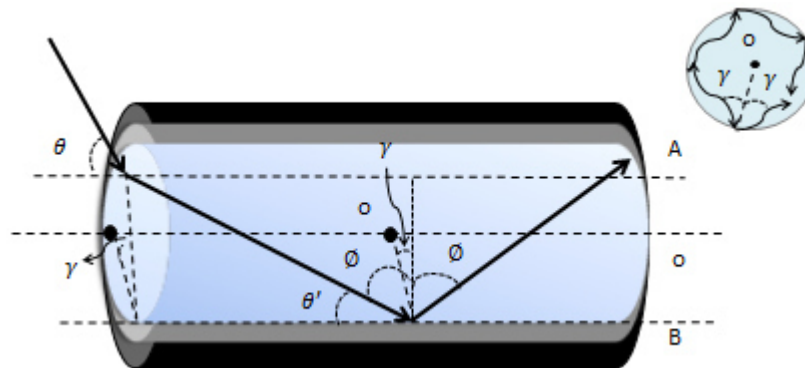


Figura.- 14. Esquema de la trayectoria de un rayo sesgado.

Donde A y B representan el eje de guía de las paredes del núcleo de la fibra óptica, (o) es el eje de la guía de la fibra óptica y en el círculo superior derecho es la representación de la fibra óptica vista desde arriba, se observa como el rayo viaja en forma de espiral o helicoidal y los ángulos γ que forman, donde θ es el ángulo de incidencia y θ' es el ángulo del rayo refractado en la fibra

óptica, γ es el ángulo que se forma entre las paredes de la fibra óptica A y B con respecto a la perpendicular del eje de guía de la fibra óptica (o), por último el ángulo ϕ es el ángulo de reflexión.

Para los rayos sesgados el número de apertura se calcula de la siguiente manera, primero se obtiene la siguiente relación de ángulos:

$$\cos \gamma \cdot \sin \theta = \cos \phi, \quad (10)$$

donde ϕ en el caso de la reflexión se sustituye por el θ_c , debido a la reflexión total interna que ocurre, después se sustituye $\sin \theta$ por su valor, utilizando la ley de Snell y se obtiene la apertura numérica:

$$NA = n_a \sin \theta_a \cos \gamma = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (11)$$

por lo que si, $\gamma = 0$ y $\phi = 0$ entonces sería rayos meridionales.

Los rayos sesgados debido a su trayectoria en espiral no aprovechan toda el área del núcleo de la fibra óptica en su propagación, por lo tanto la transmisión no es eficiente pero se complementa con los rayos meridionales, por lo que se obtiene una mejor transmisión.

A continuación en el capítulo 3 se muestra los tipos de estructuras a evaluar para el sistema, el análisis de incidencia para cada una de las caras colectoras de la fibra óptica.

Capítulo 3

Estructuras en la fibra óptica

La palabra estructura por si sola nos indica un orden o bien los elementos que componen un cuerpo o cosa, ayuda al análisis y comprensión del objeto que se desee estudiar. El término estructura existe en diferentes campos de estudio como lo es en la astronomía, música, ciencias sociales (demografía, social, etc.), química, ingeniería, arquitectura, geografía, óptica, etc. En la ingeniería civil suele ser muy común la palabra estructura ya que desde los cimientos de cualquier tipo de construcción deciden el tipo de estructura que se realizara, debe de soportar y equilibrar el peso en caso de que la construcción sea de grandes dimensiones, una buena estructura evitará el derrumbe de la construcción ocasionado por cambios climatológicos o externos. En óptica las estructuras llegan a beneficiar o perjudicar a los dispositivos ópticos, un ejemplo de esto son los espejos ópticos, si su estructura es circular o parabólica la incidencia de los rayos de luz aumentaría o disminuiría, lo mismo sucede con las fibras ópticas. En si el término de estructura llega a ser tan pequeño como en química cuando se estudia la estructura de un átomo y a la vez tan grande como en la astronomía cuando se estudia la estructura del universo.

3.1 Definición

La palabra estructura en el campo de la óptica siempre ha estado presente y con el paso del tiempo ha sufrido varios cambios, sobre todo en los dispositivos ópticos por mencionar uno de ellos que son los espejos ópticos, los cuales han pasado por diferentes estructuras geométricas, desde circulares, esféricos, parabólicos, cuadrados, etc.; cambios que han sufrido para mejorar su aprovechamiento en diferentes objetivos de la óptica. Otro de los dispositivos que también ha sufrido cambios en su estructura tanto interna como externa ha sido la fibra óptica, la cual consta de una estructura geométrica cilíndrica formada por un núcleo, revestimiento y cobertura como se mencionó en el capítulo 2, en el cableado de la fibra óptica existen dos tipos de estructura: una de ellas es la estructura ajustada⁵², la cual está formada por un tubo de plástico y en su interior se encuentra colocada la fibra óptica, este tipo de estructura es para ambas fibras ópticas tanto monomodo como multimodo, normalmente la estructura ajustada se utiliza para cortas distancias. El otro tipo de estructura es la holgada⁵³, que llega a introducir en su interior más de un conductor de fibras ópticas en comparación a la estructura ajustada, la estructura holgada cuenta con una cubierta más grande que el tubo de la estructura ajustada y recubre todo el conjunto de fibras ópticas con un gel que evita daños externos que afectarían el cableado.

Recientemente los diferentes tipos de estructura en la fibra óptica han sido aplicados en diferentes campos de estudios, pero en el área de las comunicaciones la demanda de obtener una buena estructura para una óptima transmisión ha ido incrementando, debido a que se requiere transmitir datos, voz y video a la velocidad de la luz, este tipo de tecnología es muy importante en todos los aspectos de la vida cotidiana, para lograr esto se debe trabajar con dispositivos de transmisión eficaces y para ello utilizan la fibra óptica, debido a la rapidez que posee en transmitir luz, ondas, etc.

La fibra óptica debido a las exigencias de los diferentes campos de la industria, medicina, comerciales y de estudio, se ha orillado a experimentar con diferentes materiales y formas en su estructura, algunos investigadores han propuesto cambiar la estructura de los materiales con las que fabrican la fibra óptica, algunas con aleaciones de diferentes compuesto y en el núcleo han experimentado con materiales líquidos, el cual han obtenido buenos resultados. Hoy en día se comercializan fibras ópticas de núcleo líquido, este tipo de fibras ópticas han ayudado a obtener menores pérdidas de aire-luz y así mismo facilitando la reflexión de la luz en su interior aunque a veces ocasionan otros tipos de pérdidas, como las pérdidas de Rayleigh que se explican en el capítulo 5. Sin embargo los diferentes cambios en la estructura de los materiales o aleaciones de la fibra óptica no han sido suficientes, por lo que han propuesto estructuras dentro y fuera de la fibra óptica.

Existen estructuras dentro del núcleo de la fibra óptica, un ejemplo de esto son las rejillas de Bragg pero para hablar sobre esto es necesario saber sobre la fotosensibilidad que existe en las fibras ópticas, el descubrimiento de este fenómeno fue en 1978, Hill⁵³ et al. detectaron la formación de cambios periódicos permanentes en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica dopada con Germanio, experimentaron con ella acoplado el haz de una laser de ion argón con una emisión de 488nm, observaron el cambio del índice de refracción y determinaron que la intensidad de la luz que regresaba reflejada desde la fibra óptica incrementaba significativamente, este incremento en la reflectividad fue el resultado del permanente grabado del índice de refracción siendo inducido en la fibra óptica, a este tipo fenómeno lo llamaron fotosensibilidad.

A partir del descubrimiento de la fotosensibilidad en las fibras ópticas surgieron las rejillas de Bragg⁵⁴, las cuales son modificaciones del índice de refracción en el núcleo el cual por medio de una luz ultravioleta erosionan el núcleo de la fibra óptica dopada por algún material, normalmente estas estructuras de las rejillas de Bragg sirven para filtrar diferentes longitudes de onda. En el 2010, N. P.

Puente, et. al⁴⁴, experimentaron con la fabricación de variaciones del índice de refracción a través del núcleo de una fibra óptica multimodo dopado de germanio, para demostrar que los parámetros son posibles de controlar, al final el experimento demostró una manera fácil de fabricar diferentes configuraciones que logran controlar el desorden de las rejillas de Bragg en las fibras ópticas. Un año más tarde reportan otro estudio de la fibra óptica con el diseño de las rejillas de Bragg⁴⁵ utilizando también la luz ultravioleta, la cual erosiona una parte del núcleo de la fibra óptica creando ciertos filtros que permiten cambiar la dirección de propagación de la luz y deja pasar solo ciertas longitudes de onda, presentaron diferentes tipos de rejillas de Bragg como las: periódicas, aperiódicas, inclinadas, superestructuradas, aleatorias, etc., como se muestra en la figura 15.

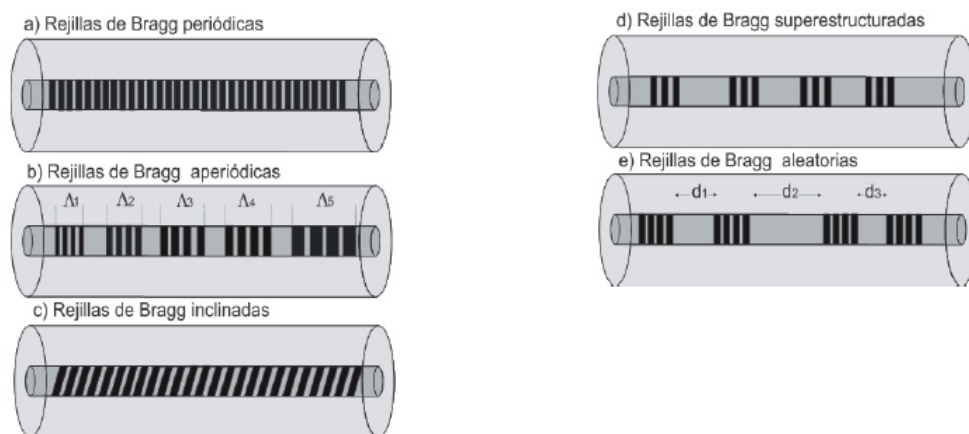


Figura.- 15. Tipos de rejillas de Bragg⁴⁵.

El concepto de las estructuras internas en la fibra óptica ha sido de gran interés en el campo de la óptica como se mencionó anteriormente, pero también las estructuras externas de la fibra óptica han sido un tema muy importante el cual surge desde los años 80's, donde proponen estructuras cónicas externas³⁹ e internas¹ en la fibra óptica, usadas para diferentes fines, uno de ellos es el campo de la energía solar donde Cutolo³⁹ et. al., en los 80's, propusieron una estructura cónica en la entrada de la fibra óptica, ellos se enfocaron en el estudio de la minimización de pérdidas como las de retro-reflexión, radiativas,

absorción y reflexión, con el objetivo de obtener un diseño óptimo en una fibra óptica dieléctrica cónica con una alta eficiencia en la colección de la luz; calcularon para cualquier longitud de onda y para la luz solar, en el análisis del haz de luz de un láser ellos aconsejan aplicar la estructura cónica de la fibra óptica sin revestimiento, y para la distribución de luz solar emplear un conjunto de 9 a 10 fibras ópticas con revestimiento, debido a que este tipo de luz solar no se mantiene fija y su distribución es Gaussiana; al final este tipo de estructura mostro un mayor radio de concentración en un área grande de entrada e incrementó en el ángulo de aceptación. En el 2006, Luca¹ ensaya nuevamente con este tipo de estructura, pero con una abertura cónica que a diferencia del estudio de Cutolo esta abertura cónica que propuso Luca está dentro de la fibra óptica dejando el hueco vacío y Cutolo usa la abertura cónica expandiendo el área de entrada de la fibra óptica a forma de cono. La figura 16, muestra las estructuras cónicas exterior óptica e interior óptica reportadas^{39, 1}.

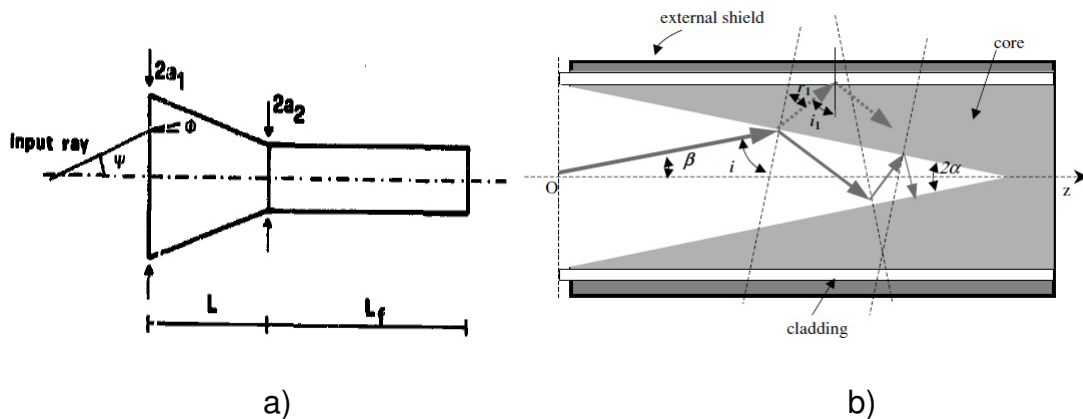


Figura.- 16. Estructuras cónicas en la fibra óptica, a) fibra óptica con estructura cónica externa para ondas planas³⁹, b) fibra óptica con estructura cónica interna para luz solar¹.

Las estructuras en la fibra óptica tanto internas como externas han demostrado a través de la historia que son aptas en diferentes campos de estudio, tanto como en la comunicación óptica e iluminación renovable, etc.

En este capítulo se explicarán las diferentes estructuras que se proponen en la fibra óptica para la colección de la luz solar, se presenta el análisis de incidencia en cada una de estas estructuras el cual está dado por óptica geométrica y algunas condiciones que se explicaron en el capítulo 2.

3.2 Tipos de estructuras

En este trabajo de tesis se propone el cálculo de cuatro estructuras diferentes en la fibra óptica, el primero que se evaluó fue el de la fibra óptica común sin ningún tipo de modificación en su estructura tanto interna como externa, el segundo es una fibra óptica con abertura cónica interna en uno de los extremos de la cara en el cual incidirá la luz solar; dentro de este tipo de estructura se varió la profundidad de la conicidad por lo cual se desprende una tercera estructura y por último se analizó la estructura de una fibra óptica biselada.

3.2.1 Análisis de la fibra óptica común

Una fibra óptica de forma cilíndrica sin ningún tipo de estructura en ninguno de los extremos, por lo tanto la cara incidente es de forma circular, la cual se calcula el área con:

$$A = \pi R c^2, \quad (12)$$

donde R_c es el radio del núcleo de la fibra óptica en el cual se considera con un valor de 2.5cm, por lo que el área de la cara incidente de esta fibra óptica es de 19.36cm^2 . En la figura 17 se muestra la representación de una fibra óptica común es decir sin ningún tipo de estructura, con los diferentes aspectos que se consideraron en su análisis.

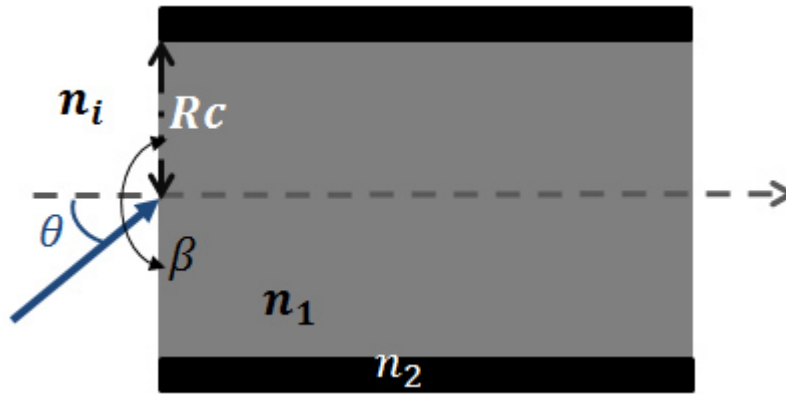


Figura.- 17. Fibra óptica común.

En la figura 17, se observa la fibra óptica común con sus respectivos índices de refracción, n_i que es el índice de refracción del aire, n_1 como el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica y n_2 el índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica, θ es el ángulo de incidencia y R_c el radio del núcleo de la fibra óptica como se mencionó anteriormente.

Para el cálculo de los rayos que inciden en esta tipo de fibra óptica se sigue la siguiente relación:

$$\theta = \beta - 90^\circ, \quad (13)$$

donde β abarca los posibles ángulos que incidan en la superficie colectora de la fibra óptica, la cual va de 0° a 180° conforme la intensidad y movimiento del sol se le va restando los 90° .

A continuación se presenta el análisis de la segunda estructura en la fibra óptica; el tipo de estructura en la cara incidente es geoméricamente diferente al de la fibra óptica común por lo tanto su análisis es diferente al igual que la incidencia.

3.2.2 Análisis de la fibra óptica con abertura cónica

La fibra óptica con abertura cónica será capaz de coleccionar la luz solar, este tipo de estructura consta de un tallado en el interior del núcleo en uno de los extremos de la cara incidente, como se muestra en la figura 18.

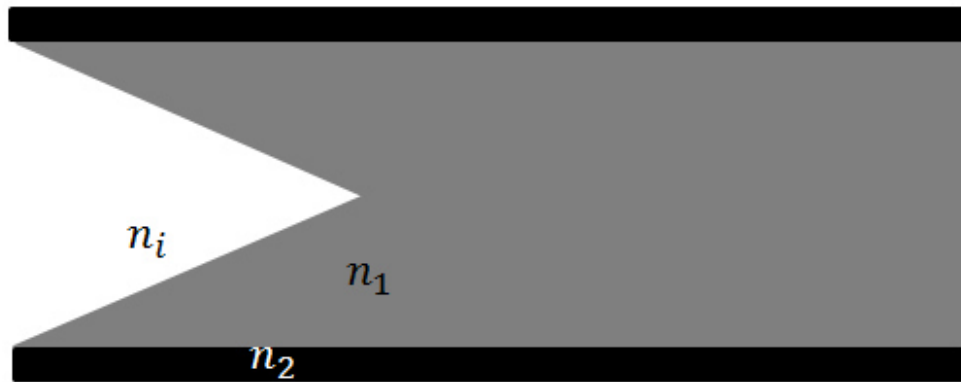


Figura.- 18. Fibra óptica con abertura cónica.

Fibra óptica con abertura cónica, donde n_i es el índice de refracción del aire, n_1 el índice de refracción del núcleo y n_2 el índice de refracción del revestimiento. Suponiendo que un rayo de luz solar incide en esta fibra óptica y logre refractarse en la superficie del núcleo de esta misma, el rayo de luz solar incidirá en la frontera del revestimiento y sufrirá una reflexión total interna, lo cual nos asegurara una propagación a lo largo del núcleo de la fibra óptica sin

pérdidas, el rayo de luz solar al hacer todo este recorrido formara una trayectoria, la cual se calcula mediante los ángulos, índices de refracción y algunos condiciones de la óptica que se presentaron en el capítulo 2, en la figura 19 se muestra la trayectoria ideal de este rayo de luz incidente.

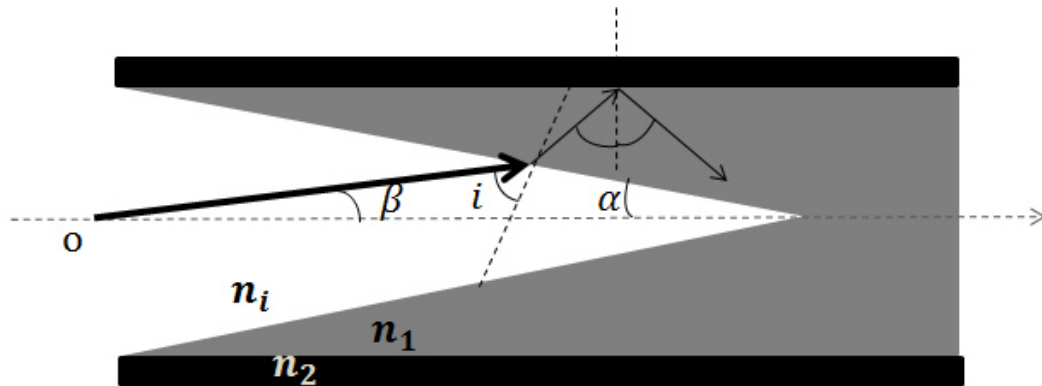


Figura.- 19. Fibra óptica con apertura cónica y la trayectoria ideal del rayo de luz incidente.

Se observa la fibra óptica con su revestimiento e índices de refracción y una trayectoria ideal del rayo de luz solar que incidió, se muestra como el rayo de luz parte del eje de guía de la fibra óptica (o) incidiendo en la pared del núcleo de esta misma formando el ángulo β , en el otro extremo de este mismo rayo incide la pared del núcleo de la fibra óptica con respecto al eje de la superficie de esta misma, formando así el ángulo i , el rayo refractado en el núcleo de la fibra óptica incide sobre los límites del revestimiento y el núcleo, logrando una reflexión total interna, el ángulo α es el que se forma con el eje de la guía de la fibra óptica y la pared de la superficie cónica de la fibra óptica.

Al analizar esta trayectoria se observan los ángulos α , β y el ángulo i , considerando estos ángulos se sigue la siguiente relación de Luca¹:

$$\beta + i + \alpha = \frac{\pi}{2}, \quad (14)$$

Se sigue la relación presentada en [1] con la relación de los ángulos que se muestra en la ecuación 14 y aplicando la ley de Snell ahora con el valor de $n_1 = n_i = 1.0$ para determinar el valor de r_1 , el cual queda despejado de la siguiente manera:

$$r_1 = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\alpha + \beta)}{n_1} \right], \quad (17)$$

después se sustituye r_1 con la relación de la ecuación 16, la relación 17 y junto con la fórmula del ángulo crítico que se presentó en el capítulo 2, se sustituye toda esa relación obteniendo:

$$\frac{n_2}{n_1} < \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{\cos(\alpha + \beta)}{n_1} \right) + \alpha \right], \quad (18)$$

despejando y sustituyendo algebraicamente se llega a esta función:

$$f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta) = n_1^2 \cos^2 \alpha + \cos^2(\alpha + \beta) - 2n_2 \cos \alpha \cos(\alpha + \beta) - (n_1^2 - n_2^2), \quad (19)$$

dando la siguiente condición:

$$f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta) < 0. \quad (20)$$

Esta condición indica el resultado del cálculo completo de la trayectoria de luz, es decir si el resultado es menor a cero el rayo de luz que incide en la fibra óptica sufrirá una reflexión total interna y será propagado a lo largo de esta, pero si es mayor a 0 significa que está sufriendo pérdidas de luz es decir, están siendo refractada hacia al exterior de la fibra óptica y por consecuencia no se propagara a lo largo de la fibra óptica. Esto es válido solo para ángulos agudos en α y β .

En este trabajo de tesis se realizó este análisis para diferentes índices de refracción, de esta manera se determinó si es conveniente utilizar una fibra óptica con revestimiento o sin revestimiento, el cual se muestra los resultados de la función $f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta)$ con respecto los ángulos α y β en la figura 21.

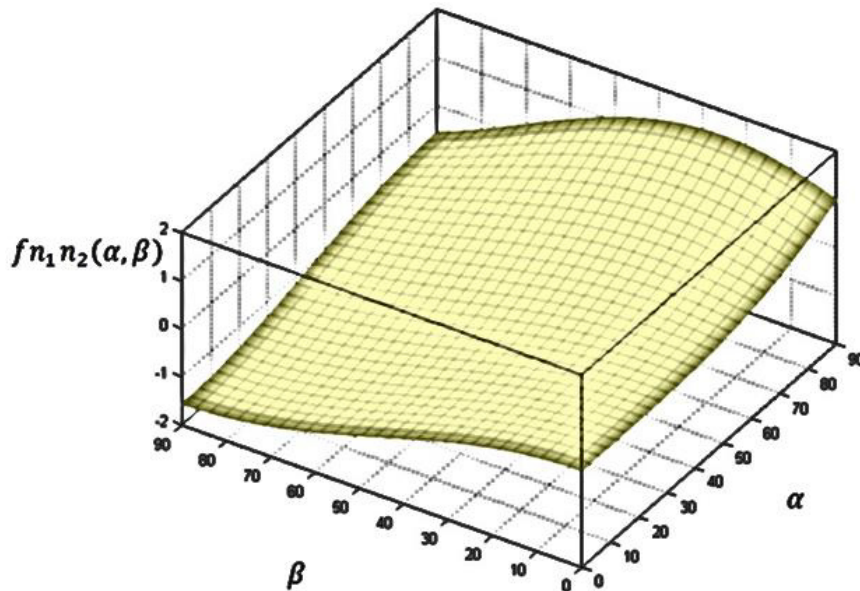


Figura.- 21. Función $f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta)$ para $n_1=1.6$ y $n_2=1.0$.

Se observa el resultado de la ecuación 19, considerando el valor de los índices de refracción $n_1= 1.6$ y $n_2=1.0$ que es el índice de refracción del aire por lo tanto es una fibra óptica sin revestimiento; en todos los ángulos de β se aprecia cómo se cumple la relación de la expresión 20, pero para ángulos de α no todos cumplen esa relación sobre todo los ángulos mayores a 80° aproximadamente, donde alcanzan el valor de 1 en la función $f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta)$ a esos ángulos los rayos de luz no logran obtener una reflexión total interna. En la figura 22 se muestra los resultados de $f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta)$ ahora considerando una fibra óptica con revestimiento.

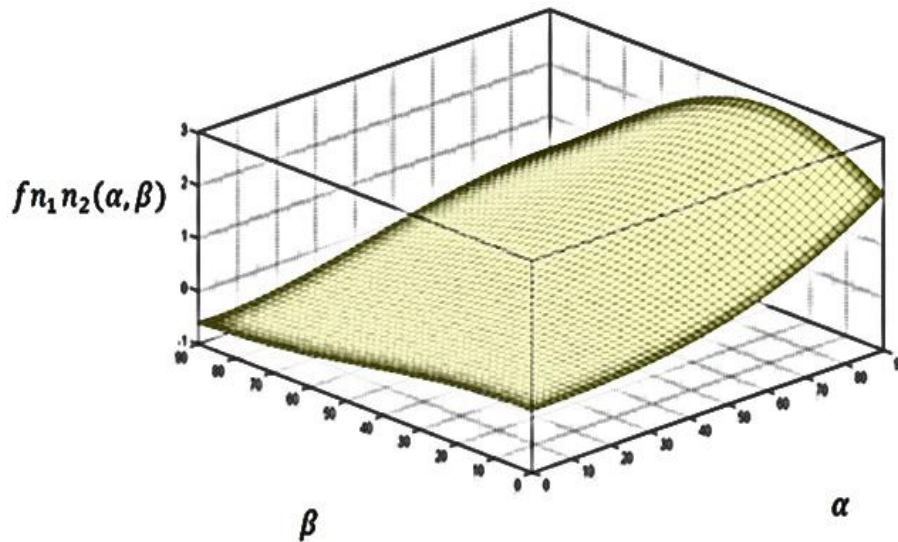


Figura.- 22. Función $f_{n_1 n_2}(\alpha, \beta)$ $n_1=1.6$ y $n_2=1.4$.

Los resultado que se observan en la figura 22 son para diferentes valores de $n_1=1.6$ y $n_2=1.4$ fibra óptica con revestimiento, en los ángulos β se aprecia cómo todos los ángulos cumplen la relación de la expresión 20, pero para ángulos de α la mitad no cumplen esa relación sobre todo los ángulos mayores a 50° aproximadamente, lo que quiere decir que a ángulos mayores de 50° la luz incidente no logra una reflexión total interna.

Esto demuestra que una fibra óptica con revestimiento no es muy óptima para la reflexión total interna en este tipo de estructura y una fibra óptica sin revestimiento en la mayoría de los ángulos α logra la reflexión total interna. Por lo tanto en los siguientes análisis para esta estructura se consideró una fibra óptica sin revestimiento.

Después del análisis de la trayectoria de un rayo de luz que incide en la fibra óptica con abertura cónica, se realizaron variaciones en α que es el ángulo del vértice del cono con respecto el eje de guía de la fibra óptica se varía en 30° y 60° .

Primero se analiza para una abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, aplicando las funciones trigonométricas del teorema de Pitágoras:

$$\text{sen } \alpha = \frac{c.o}{h}, \quad (21)$$

despejando:

$$h = \frac{c.o}{\cos \alpha}, \quad (22)$$

por lo que el cateto opuesto ($c.o$) con el valor de 2.5cm, $\cos 30^\circ$, así que hipotenusa (h) obtiene el valor de 5cm, calculando el área del cono con la siguiente expresión:

$$A_{\text{cono}} = \pi * r(g + r), \quad (23)$$

donde g es la generatriz del cono, pero usando el teorema de Pitágoras $c=(a^2+b^2)^{1/2}$, se sustituye por la hipotenusa, puesto que el valor de g vendría siendo la altura del triángulo, la cual aún no se sabe pero si el ángulo del vértice de cono es:

$$A_{\text{cono}} = \pi * r(h + r), \quad (24)$$

Considerando el radio (r) de 2.5cm, $h=5$ cm, por lo que el A_{cono} (área del cono)=15.35cm².

Por lo tanto el radio del núcleo (R_c) de la fibra óptica con abertura cónica, se considera que es el valor de la hipotenusa, así que la fibra óptica con una abertura cónica donde α es de 30° , obtiene la siguiente forma:

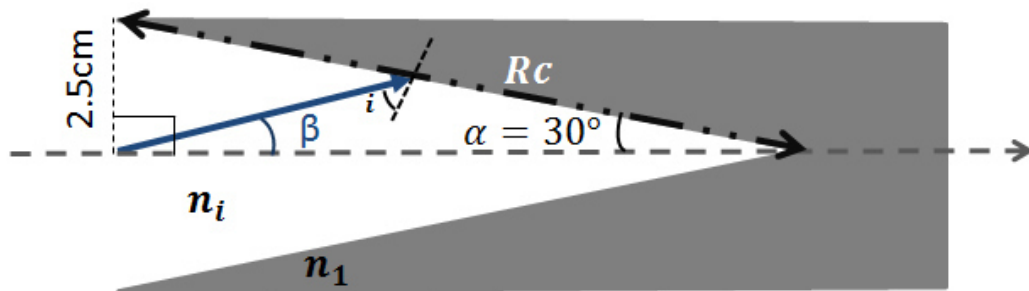


Figura.- 23. Fibra óptica con abertura cónica a 30° .

En la figura 23 se observa la fibra óptica con abertura cónica $\alpha=30^\circ$ en uno de sus extremos, el cual se analizó para la colección de energía solar en el capítulo 4, β es el ángulo que forma el rayo de luz solar con respecto al eje de guía de la fibra óptica, i es el ángulo que se forma con el rayo de luz solar que incide en ese extremo de la cara de la fibra óptica con respecto a la normal de la superficie, $Rc=5\text{cm}$ (resultados de la hipotenusa, el cual se considera la hipotenusa como el radio del núcleo de la fibra óptica debido a que es la mitad de la cara incidente, si se multiplicara por 2 sería el diámetro).

La siguiente estructura que se analizó es la de la fibra óptica con abertura cónica donde $\alpha=60^\circ$, se sigue el mismo análisis que la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, en la ecuación 21 y 22 se sigue considerando los mismos valores para el cateto opuesto a 2.5cm , ahora con $\cos 60^\circ$, por lo que el resultado de la hipotenusa es de 2.88cm , también se calculó el área de esta conicidad con la ecuación 24, quedando así un área $(A_{cono})=42.30\text{cm}^2$. En este caso se considera el radio del núcleo (Rc) de la fibra óptica con abertura cónica con el valor de la hipotenusa (h), por lo que la fibra óptica con una abertura cónica donde $\alpha=60^\circ$, obtiene la siguiente forma:

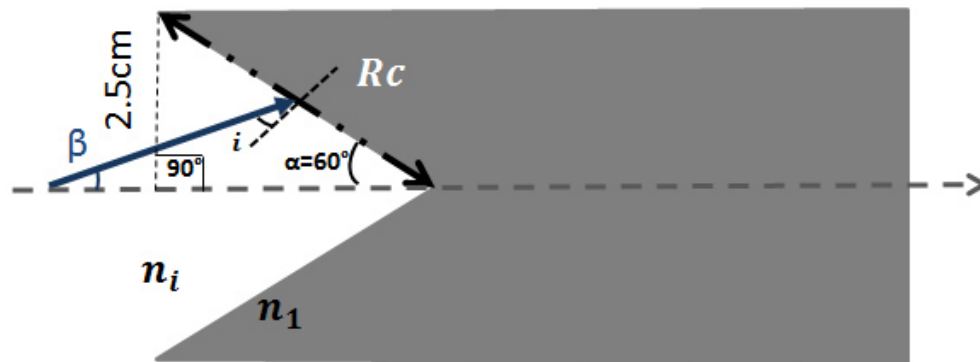


Figura.- 24. 24 Fibra óptica con abertura cónica a 60° .

En la figura 24, se observa cómo queda la estructura de una fibra óptica con abertura cónica con $\alpha=60^\circ$, es más angosta en comparación a la estructura de

la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, también se observa el ángulo β que se forma por el rayo de luz solar con respecto el eje de guía de la fibra óptica y el ángulo i que incide con respecto a la normal de la superficie, el ángulo recto de 90° el cual ayuda para el análisis de la hipotenusa convirtiéndose en el radio del núcleo de esta fibra óptica (Rc), se muestra los índices de refracción n_i índice de refracción del aire y n_1 índice de refracción del material del núcleo de la fibra óptica.

A continuación se presenta el análisis del último tipo de estructura en la fibra óptica, la cual esta biselada en la cara incidente, debido a que es una estructura completamente diferente a las anteriormente presentadas, requiere de un análisis diferente.

3.2.3 Análisis de la fibra óptica biselada

Se analiza este tipo de estructura la cual debe ser capaz de coleccionar la luz solar, a continuación se muestra la figura 25 con la representación de la estructura biselada en la cara incidente de la fibra óptica, junto con los aspectos que se consideraron en su análisis.

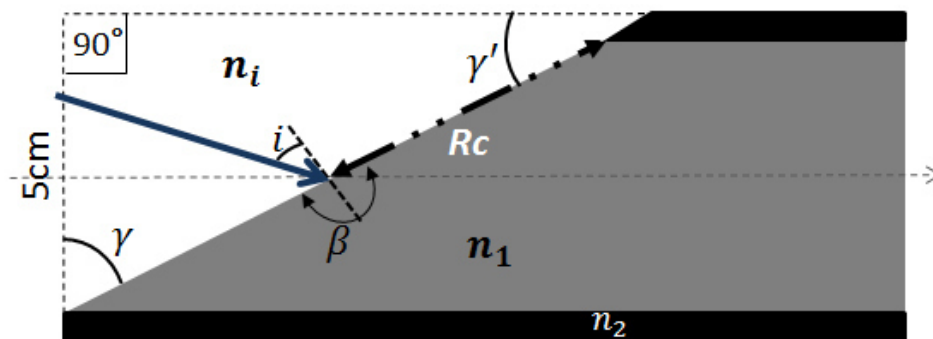


Figura.- 25. Fibra óptica biselada.

Se observa la estructura de la fibra óptica biselada, en la cual muestra los índices de refracción donde n_i es el índice de refracción del aire, n_1 el índice de refracción del núcleo y n_2 el índice de refracción del revestimiento, Rc el radio del núcleo de la fibra óptica biselada y los ángulos γ y γ' los cuales definen los grados que se biselo el extremo de la cara incidente de la fibra óptica, el ángulo β y por último el ángulo i que es el ángulo incidente, determinado por la siguiente relación:

$$i = \beta + 1 - \gamma - \gamma', \quad (25)$$

donde β abarca los posibles ángulos que incidan en la superficie colectora de la fibra óptica la cual va de 0° a 180° , originalmente con el valor de -1 pero al despejar +1 que es lo que se va moviendo el rayo de luz en toda la superficie colectora y los ángulos γ y γ' que son los que definen los grados biselados.

Con la ayuda de las funciones trigonométricas del teorema de Pitágoras, se pudo determinar el valor del radio del núcleo (Rc) de la fibra óptica biselada:

$$\cos \gamma = \frac{c.a}{h}, \quad (26)$$

despejando:

$$h = \frac{c.a}{\cos \gamma}, \quad (27)$$

donde $c.a=5\text{cm}$ y $\cos \gamma= 0^\circ$ a 90° , dividiendo la hipotenusa entre 2 para determinar el radio del núcleo (Rc) de la fibra óptica biselada:

$$Rc = \frac{h}{2}, \quad (28)$$

y el área de colección de la estructura biselada que forma una elipse:

$$A_{biselada} = \pi * Rc^2 * c.a. \quad (29)$$

Se calculó el radio del núcleo (R_c) de la fibra óptica biselada variando el ángulo γ de 0 a 90°, en la figura 26 se muestra los resultados del radio del núcleo R_c en centímetros:

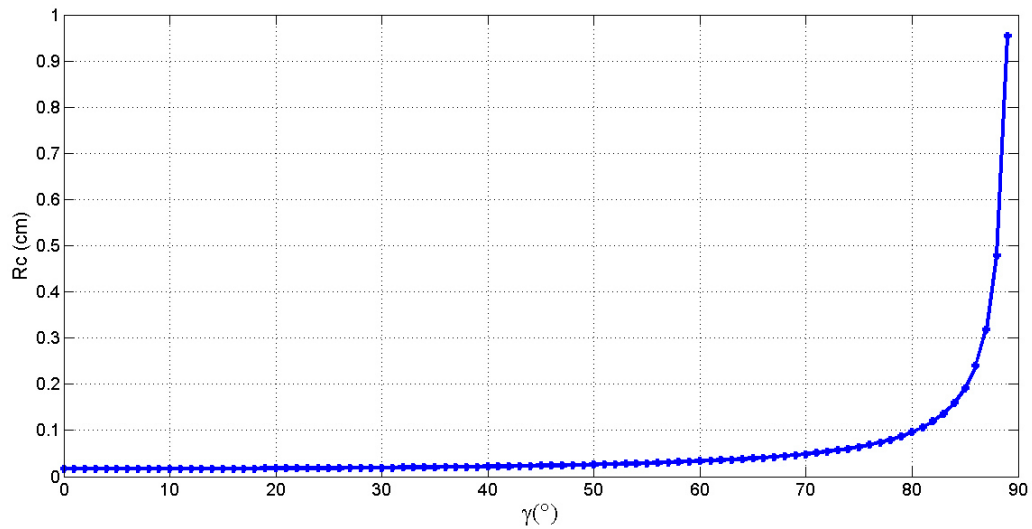


Figura.- 26. Radio del núcleo (R_c) de la fibra óptica biselada y los diferentes ángulos γ .

La grafica de la figura 26, demuestra que a partir de los ángulos de 70° el radio del núcleo (R_c) de la fibra óptica biselada incrementa su valor, dependiendo el ángulo γ se determina el valor de R_c y con este se determinan el valor del área ($A_{biselada}$).

Para los próximos cálculos presentados en los siguientes capítulos se considerara la fibra óptica sin revestimiento en las cuatro estructuras, para así comparar los resultados en cada una de estas estructuras de la fibra óptica

Capítulo 4

Energía Solar

La energía solar es considerada como una fuente de energía renovable, se obtiene de la radiación electromagnética emitida por el sol a la tierra, la cual incluye luz, calor y espectro electromagnético. La energía que es emitida del sol es un factor muy importante en el ciclo del agua, en el desarrollo de la vida de los seres vivos un ejemplo de ello es la fotosíntesis de las plantas; la energía solar posee una gran influencia en la salud de los seres humanos¹³ puesto que la luz solar que proyecta mantiene al ser vivo activo y feliz, si el ser humano no estuviera expuesto a la energía solar y permaneciera en la oscuridad provocaría que el cuerpo secretara dopamina por otras vías provocando sueño y en estados prolongados de oscuridad con pocas horas de día desencadenaría estados crónicos de depresión, debido a esta influencia que posee la energía solar en los seres humanos se ha intentado colectarla. Si se empleara la energía solar como iluminación, como se mencionó anteriormente mejoraría la salud del ser humano, no afectaría al medio ambiente puesto que es un recurso natural y renovable. El análisis de la energía solar es muy amplio dado que comprende muchos aspectos como: el sol, la radiación, el espectro electromagnético, la incidencia de la luz solar en la tierra, los materiales y formas del dispositivo que colecten la energía solar, etc.

4.1 Definición

La energía solar como se mencionó anteriormente es una fuente de energía emitida por el sol y se obtiene por medio de la colección de luz y calor. Este tipo de energía llega a la tierra a causa de las fusiones nucleares emitidas por el sol, las cuales desprenden energía en forma de radiación electromagnética; actualmente la energía solar es empleada como energía térmica y normalmente se utiliza para calentar líquidos o alimentos, este tipo de energía también se observa en la intemperie es decir; cuando los rayos del sol inciden en la superficie terrestre provocan un calentamiento que a su vez este proceso emite una sensación térmica; otro tipo de energía solar que se emplea es la energía fotovoltaica, la cual es comúnmente utilizada en las celdas solares que están hechas por materiales que absorben la energía solar y la transforman en energía eléctrica.

El estudio de la energía solar se ha venido presentando desde hace tiempo por varios científicos e investigadores, por mencionar algunos como Knox-Shaw¹² que en 1915, realizó un estudio de la radiación solar por medio de la distancia zenith del sol, él observó las variaciones del medio ambiente climatológico que ocurrían durante el transcurso de un día, varios días, semanas y meses; en las cuales concluyó que las variaciones climatológicas afectan la radiación solar. En 1926, Transeau¹³ reportó un estudio utilizando las hojas de las plantas como un medio para absorber la energía solar y así obtener futuras reservas de energía, al final concluyó que la absorción de energía solar por medio de este recurso es ineficiente. Por otra parte en 1935, R. Estey¹⁵ propuso transmitir la radiación solar a través de un vidrio absorbente de calor esta idea la siguió Gardon¹⁷ a principio de los años 50's, utilizó un horno solar con espejos segmentados de vidrio, al final solo sirvió para calentar agua y no para la

recolección de energía solar. Para los años 60's, el mercado de la fibra óptica había crecido tanto que era empleada en muchos áreas de trabajo al igual que su estudio en diferentes campos de la ciencia, uno de ellos fue la distribución de la energía solar debido a las características que posee de transmisión y resistencia al calor, Kato¹⁹ et al., realizaron un estudio con dos diferentes materiales en la fibra óptica: una con el material de fusión de sílice y la otra con el material de cal soldada de vidrio de silicato, el cual demostró que la fibra óptica con material de fusión de sílice transmite eficazmente la radiación solar a una distancia de 40mts. En los años 80's, Cariou²⁰ et al. experimentaron con un espejo parabólico para coleccionar la luz solar y que a su vez que fuese transportada por la fibra óptica, al final demostró que el sistema era eficiente en un 84% en la colección de la luz solar, pero obtuvo un mínimo porcentaje en la transmisión; al paso de los años los investigadores siguieron proponiendo este tipo de sistema pero con diferentes dispositivos ópticos para la colección de la luz solar y diferentes fibras ópticas en el uso de la distribución solar, hasta que en el 2013, Sapia¹¹ experimento con un sistema híbrido en el cual utilizo colectores parabólicos ubicados en el techo, los cuales coleccionaban la luz solar y por medio de un conjunto de fibras ópticas era transportada, en este sistema híbrido integra la luz de día y la luz artificial para iluminar edificios.

En este capítulo se describe el sol como la fuente de energía solar, el espectro electromagnético, los tipos de radiación solar, los conceptos de transmitancia y reflectancia; también se presenta el cálculo del sistema² propuesto en este trabajo de tesis para cada una de las estructuras en la fibra óptica presentadas en el capítulo 3, el cálculo que se realizó con diferentes materiales y parámetros reales, al igual que con parámetros y fibras comerciales.

² Conjunto de elementos o partes coordinadas que ordenadamente se relacionan entre sí, el cual por medio de normas y procedimientos contribuyen a un determinado objetivo final.

4.2 El Sol

La tierra intercepta la dos mil millonésima parte de la energía que emite el sol lo cual equivale a $1.8 \times 10^{14} \text{ kW}$, es decir la energía de un rayo de luz que incide en una superficie perpendicular es de aproximadamente 1367 W/m^2 , la temperatura de la atmosfera terrestre es de 25°K y de la superficie es de 288°K , mientras que el sol mantiene una temperatura media de 6000°K debido a que en su interior constantemente está sufriendo de reacciones de fusión nuclear, la cual produce una masa que se va transformando en energía que es liberada y transmitida como radiación solar⁵⁵.

La radiación en el sol es de $63,450,729 \text{ W/m}^2$, la radiación que recibe del sol a la atmosfera de la tierra es de aproximadamente 1367 W/m^2 como se mencionó anteriormente y es conocida como constante solar⁵⁶, la radiación que recibe la tierra por el sol es muy intensa y es transmitida por medio de ondas electromagnéticas⁵⁷ que son de onda corta, abarca aproximadamente desde los $0.4 \mu\text{m}$ hasta $0.7 \mu\text{m}$ comprende una pequeña parte de los rangos infrarrojo y ultravioleta; el rango espectral que es detectado por el ojo humano es conocido como luz visible y forma parte del espectro electromagnético, como se muestra en la figura 27.

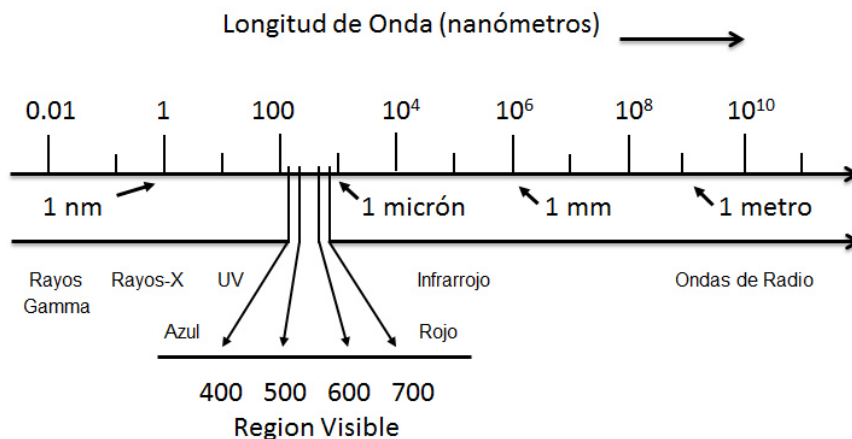


Figura.- 27. Espectro electromagnético⁵⁷ (mod. Mata. M. T. N.)

4.2.1 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético está compuesto por ondas electromagnéticas, que consta de ondas cortas medias y largas, las bandas del espectro electromagnético van desde los rayos gamma hasta las microondas, cada una de estas bandas cuenta con su propio rango de frecuencia y longitud de onda, como se observa en la figura 28.

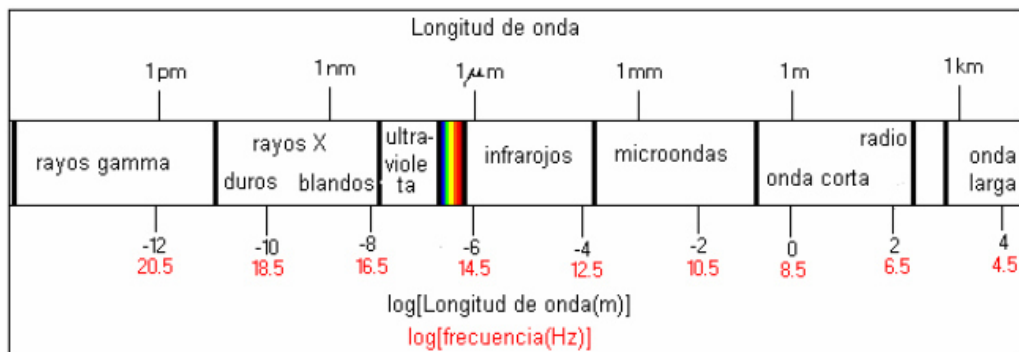


Figura.- 28. Espectro electromagnético con sus longitudes de onda y frecuencia⁵⁸.

La radiación solar es emitida como radiación electromagnética, las cuales se encuentra en el rango del ultravioleta, visible e infrarrojo, en el siguiente subtema se presenta las características de estas radiaciones.

4.2.2 Tipos de Radiación.

Los tipos de radiación que emite el sol forman parte del espectro electromagnético, ciertos tipos de radiación solar pueden ser dañinos para el cuerpo humano pero algunos otros favorecen a la salud mental, física y emocional del ser humano, a continuación se describen los tipos de radiación solar:

Radiación Ultravioleta (UV): es la radiación electromagnética proveniente del sol, se dice ultravioleta dado a que proviene de longitudes de ondas muy cortas, los seres humanos la ven de color violeta, este tipo de radiación es dañina causa manchas y pigmentación en la piel; esta radiación depende de la latitud, altitud, época del año, hora del día, contaminación, nubosidad, etc. La radiación UV tiene una longitud de onda que va desde los 150nm hasta los 400nm, la cual a su vez se subdivide en tres tipos, A, B y C:

Radiación Ultravioleta A (UV-A): este tipo de radiación tiene una longitud de onda que va desde los 300nm hasta los 400nm aproximadamente, aunque varía debido a las diferentes capas de la atmosfera terrestre las cuales no permiten pasar este tipo de rayos ultravioleta.

Radiación Ultravioleta B (UV-B): tiene una longitud de onda que va desde los 290nm hasta los 320nm, al igual que la radiación (UV-A) varía a causa de las diferentes capas de la atmosfera.

Radiación Ultravioleta C (UV-C): tiene una longitud de onda que va desde los 150nm hasta los 200nm, en comparación de la radiación (UV-A) y (UV-B) la radiación (UV-C) no logra atravesar la capa de ozono lo cual es muy conveniente para los seres humanos, puesto que este tipo de radiación (UV-C) es la más peligrosa de todas por que ocasiona graves quemaduras en la piel.

Radiación Visible: esta radiación corresponde a la zona visible y abarca una pequeña cantidad del ultravioleta y el infrarrojo, debido a que su longitud de onda aproximadamente abarca desde los 360nm (ultravioleta) hasta los 760nm (infrarrojo), este tipo de radiación a causa de la energía que lleva posee una gran influencia en los seres vivos, algunos estudios han demostrado que a nivel cerebral afecta a ciclos circadianos los cuales regulan el ciclo del sueño-vigilia mediante los núcleos supraquiasmáticos que reciben información sobre el ciclo luz-oscuridad, esta evidencia sugiere que los núcleos supraquiasmáticos tienen dos picos de actividad circadiana que se relaciona con la observación de la exposición a la luz brillante a la hora del día y secretan serotonina, el cual es un neurotransmisor que se estimula con la luz del día, por lo que mantiene al ser vivo activo y feliz; en el caso de los humanos estos núcleos mediante el estímulo de la oscuridad secretan dopamina por otras vías que provocan sueño y en estados prolongados de oscuridad con pocas horas de día provocan estados crónicos de depresión⁵⁹. La radiación visible atraviesa perfectamente la atmósfera siempre y cuando no le impida el paso las nubes o las diferentes masas de polvo, ya que suele ser absorbida o reflejada.

Radiación Infrarroja: la radiación infrarroja es parte del espectro electromagnético y forma parte de la radiación del sol, abarca un rango de 700nm a 1000µm que corresponden a longitudes de onda larga, gracias a la atmósfera solo llega a la tierra una parte de esta radiación, que incide en el suelo y se transforma en radiación térmica, la otra parte es absorbida por otros materiales, este tipo de radiación infrarroja se subdivide en tres, cercano, medio y lejano.

Estos tres tipos de radiación son emitidos por el sol, atraviesan la atmósfera e incide en diferentes objetos y a consecuencia de la dispersión que existe en la atmósfera provocan una fragmentación a la cual hace que se distingan dos

tipos de radiación solar⁶⁰, la radiación directa y la radiación difusa estas radiaciones corresponden a una medida del flujo de energía recibida por unidad de área del objeto, normalmente sus unidades son (W/m^2). A continuación se describen cada una de estos tipos de radiación solar:

Radiación Solar Directa: es la radiación solar sin que se haya dispersado por la atmosfera.

Radiación Solar Difusa: es la radiación solar que se recibe desde el cielo cuya dirección ha sido modificada por la dispersión de la atmosfera, como: densidad atmosférica, partículas, etc.

Radiación Solar Total: es la suma de la radiación solar difusa y directa en una superficie.

La medida de radiación normalmente la hace la irradiancia, irradiación, dos tipos de medición que se explican a continuación:

Irradiancia: es la que mide la energía de radiación que incide en la superficie por unidad de área, sus unidades son (W/m^2).

Irradiación: mide la irradiancia pero en un tiempo determinado ya sea mes, día u hora, sus unidades son (kWh/m^2 o Wh/m^2).

Haz directo de irradiación: es el flujo de la densidad de energía de la radiación solar, normalmente se utiliza para dispositivos ópticos donde su superficie es perpendicular a los rayos del sol, sus unidades son (W/m^2).

En los dispositivos ópticos es importante calcular la reflectancia de los materiales, para eso en la siguiente sección se describe los conceptos de transmitancia y reflectancia que existe en un dispositivo óptico cuando incide la luz solar.

4.3 Transmitancia y Reflectancia

El sistema que se propone es coleccionar la energía solar por medio de la fibra óptica y que se utilice como iluminación a espacios en interiores, para esto se debe calcular la transmitancia y la reflectancia que se obtiene de la energía solar en una fibra óptica.

Transmitancia: es un concepto diferente a la transmisión ya que transmisión como la misma palabra lo dice está transmitiendo de un objeto a otro o en el mismo objeto, ambiente, sustancia, luz, ondas, energía, etc., la cual no logra determinar la cantidad de lo que se está transmitiendo en cambio la transmitancia indica la cantidad de lo que se está transmitiendo.

Existen varios conceptos de transmitancia en diferentes campos de estudio como, en química donde la transmitancia es la cantidad de luz transmitida a través de una solución y la energía transmitida a través de un solvente, en el campo térmico la transmitancia es la cantidad de energía que atraviesa algún tipo de superficie como: cuerpo negro, opaca, opacas grises, opacas multiespectrales y difusas, caras planas o elemento, etc., en el campo térmico la transmitancia es normalmente usada para calcular la concentración de calor y pérdidas energéticas, en óptica mide la cantidad de luz incidente a una determinada longitud de onda que pasa a un dispositivo óptico, en el caso de la espectroscopia la transmitancia es visible ya que la luz que incide en el dispositivo óptico es parte del espectro electromagnético dentro del rango de la luz visible.

La reflectancia es un concepto diferente a la reflexión, aunque es derivado de este, dado a que es un fenómeno que surge a partir de la reflexión.

Reflectancia: La reflectancia a diferencia de la reflectividad mide la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interfase y su valor siempre lo da en números reales positivos, la reflectancia se

da a consecuencia de las reflexiones internas por lo que el espectro de la reflectancia o curva de esta misma viene siendo la reflectividad en función de una determinada longitud de onda, mientras que en el campo de la óptica acústica⁴⁷ el fenómeno de la reflectancia es la relación de la intensidad de la onda óptica reflejada a la de la onda óptica incidente, en los dispositivos ópticos biestables la reflectancia de un modulador es proporcional a la intensidad de la iluminación de la luz, en un espejo esférico la reflectancia se presenta debido a la reflexión de un haz de luz con forma de una distribución gaussiana por lo que la amplitud de la reflectancia es exponencial, también se usa la reflectancia al calcular las pérdidas de los resonadores.

Reflectancia Polarizada: la reflectancia sigue siendo el mismo significado lo único que cambia es el tipo de polarización de la luz que incide en el objeto ya que sus componentes eléctricos y magnéticos oscilan en una sola dirección.

Reflectancia no Polarizada: en este caso la reflectancia no está polarizada debido a que los componentes eléctricos y magnéticos del rayo de luz incidente oscilan en todas direcciones.

Coefficientes de Fresnel: Los coeficientes de Fresnel calculan las ondas incidentes que son transmitidas o refractadas y la señal más baja que es la reflejada, los coeficientes de reflexión y refracción o transmisión⁶⁰ ayudan en el análisis del comportamiento de la luz que se desplaza entre dos medios diferentes, cuando un rayo de luz incide en el segundo medio sucede los fenómenos que se explicaron en el capítulo 2, el rayo es refractado y a la vez reflejado por lo que deja formado sus coeficientes de reflexión y refracción o transmisión.

La energía que se utilizó en este sistema es el sol y una de las características del rayo solar es que sus componentes eléctricos y magnéticos oscilan en todas direcciones, en la siguiente sección se presenta el análisis de la reflectancia no polarizada que se realizó en las cuatro estructuras de la fibra óptica propuestas (véase en el capítulo 3).

4.4 Reflectancia no polarizada en el sistema.

El estudio de la reflectancia no polarizada es elemental para el sistema que se propone el cual consta del uso de la fibra óptica como colector de energía solar, este estudio se realizó para las cuatro estructuras de la fibra óptica que son: común, abertura cónica $\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$ y biselada, (véase en el capítulo 3), en la sección anterior se describe que los rayos solares obtienen una reflectancia no polarizada, por lo que el rayo de luz solar incide como una guía de onda plana en el núcleo de la fibra óptica.

4.4.1 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica común.

En el cálculo de una fibra óptica común se consideró la reflectividad de todo el tren de ondas luminosas del rayo de luz, basándose en el modelo de Modest⁶⁰ modificado por Jaramillo² y adaptándolo a este trabajo como una reflectancia no polarizada:

$$pf = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin \theta \right) - \theta \right]}{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin \theta \right) + \theta \right]} + \frac{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin \theta \right) - \theta \right]}{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin \theta \right) + \theta \right]} \right), \quad (30)$$

la reflectancia no polarizada pf , donde n_i es el índice de refracción del aire, n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, θ ángulo de incidencia efectuado por el rayo de luz solar.

Con la ecuación 30, se calcula la reflectancia no polarizada para una fibra óptica común, se consideró diferentes tipos de materiales para el valor del índice de refracción n_1 los cuales se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1.- Índices de refracción de materiales reales⁴⁷.

Material	Índice de Refracción (n_1)
Tetraclorosilano	1.411
Cuarzo	1.55
Diamante	2.417
Zirconia cúbica	2.15
Arseniuro de galio	3.927
Germanio	4.01

En la figura 29, se presenta los resultado que se obtuvieron del cálculo de la reflectancia no polarizada en una fibra óptica común, con los valores de cada uno de estos índices de refracción de los materiales presentados en la tabla 3 y considerando a n_i como el índice de refracción del aire 1.0.

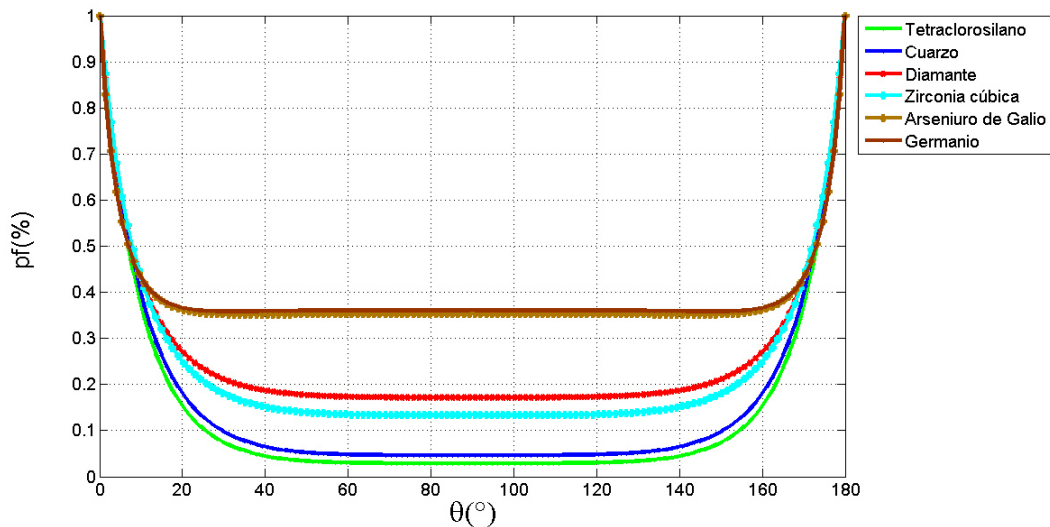


Figura.- 29. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica común con diferentes materiales en el núcleo.

Se observa como para ángulos menores de 20° incrementa la reflectancia no polarizada en todos los materiales, después decrece y a partir de los 160° vuelve a incrementarse, dejando así el material de Germanio y Arseniuro de galio como una reflectancia no polarizada del 38% aproximadamente.

4.4.2 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica con abertura cónica.

La siguiente estructura que se propone de la fibra óptica es la abertura cónica, modificando el ángulo del centro de su vértice cónico α en 30° y 60° (véase en el capítulo 3).

Para el cálculo de la reflectancia no polarizada se considera la reflectividad de todo el tren de ondas luminosas del rayo de luz basándose en el modelo de Modest⁶⁰, modificado por Jaramillo² y adaptándolo a este trabajo como la reflectancia no polarizada:

$$pf = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) - i \right]}{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) + i \right]} + \frac{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) - i \right]}{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) + i \right]} \right), \quad (31)$$

la reflectancia no polarizada pf , donde n_i es el índice de refracción del aire, n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, i es el ángulo de incidencia efectuado por el rayo de luz solar.

Dada la ecuación 31 y la relación del rayo de luz incidente presentada en el capítulo 3 de este tipo de estructura para obtener el valor del ángulo incidente i , y con los materiales de la Tabla 1 se obtienen los resultados que se muestran en la figura 30 para una fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$.

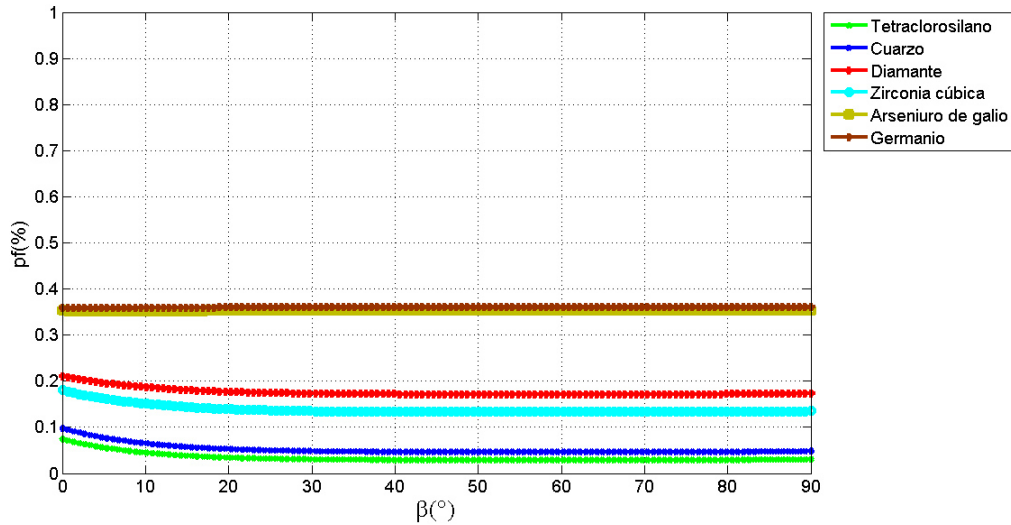


Figura.- 30. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica con una abertura cónica $\alpha=30^\circ$, con diferentes materiales en el núcleo.

Con este tipo de estructura en la fibra óptica la reflectancia no polarizada es mínima a cualquier ángulo de β , quedando como máximo con un 37% aproximadamente los materiales de Germanio y Arseniuro de galio, los materiales de Tetraclorosilano y cuarzo son los más bajo ya que se encuentran por debajo del 10%.

Siguiendo el análisis de la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, pero ahora para la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=60^\circ$, con los mismos materiales de la Tabla 1 y n_i como el índice de refracción del aire, se calcula la reflectancia no polarizada obteniendo los resultados que se ilustran en la figura 31.

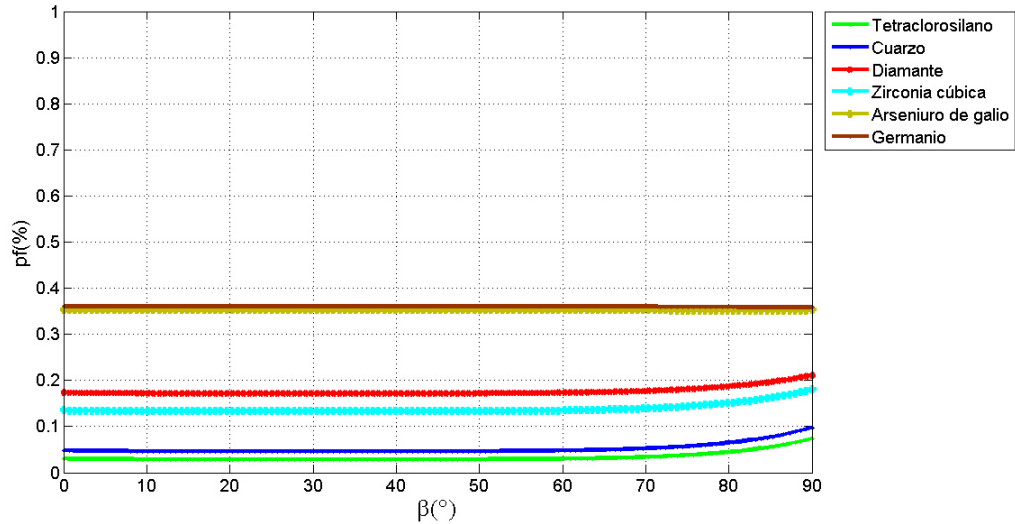


Figura.- 31. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica con abertura cónica a 60°, con diferentes materiales.

Se observa que la reflectancia más alta lo obtienen los materiales de Germanio y Arseniuro de galio con un 35% aproximadamente y el más bajo es el Tetraclorosilano por debajo del 10%, dejando así los materiales de Diamante con un máximo de 20%, Zirconia cúbica con un 19% y el Cuarzo con un 10%.

4.4.3 Reflectancia no polarizada en una fibra óptica biselada.

Para el cálculo de la reflectancia no polarizada de una fibra óptica biselada, básicamente se consideró la misma reflectividad de todo el tren de ondas luminosas del rayo de luz, como en las otras 3 estructuras propuestas basándose en el modelo de Modest⁶⁰ modificado por Jaramillo² y adaptándolo a este trabajo como una reflectancia no polarizada:

$$pf = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) - i \right]}{\tan^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) + i \right]} + \frac{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) - i \right]}{\sin^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_i}{n_1} \sin i \right) + i \right]} \right), \quad (32)$$

la reflectancia no polarizada pf , donde n_i es el índice de refracción del aire, n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, i es el ángulo de incidencia efectuado por el rayo de luz solar, para poder obtener el valor de i se sigue la relación presentada en el capítulo 3 para una fibra óptica biselada.

Considerando la ecuación 32, los valores de los materiales de la Tabla 1, n_i como el índice de refracción del aire 1.0, para una fibra óptica biselada a 45° se realizó el cálculo de la reflectancia no polarizada se obtuvieron las curvas que se muestran en la figura 32.

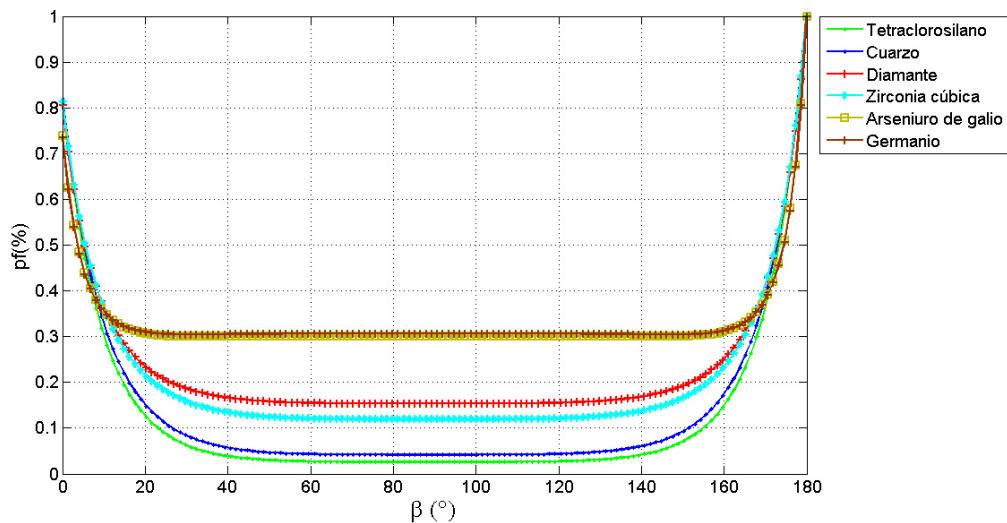


Figura.- 32. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica biselada, con diferentes materiales.

Se logra observar como la reflectancia no polarizada alcanza el 100% en el ángulo de 180° con todos los materiales, pero en 0° estos materiales alcanzan entre el 70% y 80%, en los ángulos intermedios los materiales se mantienen estables en su porcentaje dejando al Tetraclorosilano con la reflectancia no polarizada más baja de aproximadamente 5%.

En las cuatro estructuras la reflectancia no polarizada es más alta cuando el índice de refracción del material es mayor y si el índice de refracción es menor como en este caso lo fue el Tetraclorosilano con 1.411 se obtiene una mínima reflectancia no polarizada.

Una vez obtenida la reflectancia no polarizada en las cuatro estructuras se procede a determinar la energía del sistema en cada una de las cuatro estructuras de la fibra óptica.

4.5 Energía del sistema.

Se presenta el análisis de la energía solar que incide en los cuatro tipos de estructura de la fibra óptica, una vez que se obtiene el valor de la reflectancia no polarizada se procede a calcular la transmitancia, que en este caso es una transmitancia no polarizada debido a la característica del rayo de luz solar donde sus componente oscilan en todas direcciones, para calcular la transmitancia no polarizada se usa la siguiente expresión:

$$T = 1 - pf, \quad (33)$$

Los valores de la transmitancia no polarizada y la reflectancia no polarizada, definen la conservación de la energía que fluye en la fibra óptica de cualquier tipo de onda que haya sido reflejada y transmitida por una onda incidente⁴⁷.

La energía que incide en la fibra óptica en forma de una distribución Gaussiana es calculada por medio del modelo de Jaramillo², pero adoptándolo a este sistema como:

$$Q = (1 - pf) \frac{ae^{-a}\left(\frac{r}{R_c}\right)^2}{\pi(R_c)^2[1 - e^{-a}]}, \quad (34)$$

Donde r es el haz de irradiación solar, R_c el radio del núcleo de la fibra óptica, a es el coeficiente de la distribución de amplitud.

Se calculó la energía incidente para una fibra óptica común, donde R_c es de 2.5cm, r el haz de irradiación solar en Monterrey⁶¹ de .32Wh/cm² y a como el coeficiente de distribución de amplitud a 3, se obtuvieron los resultados que se observan en la figura 33.

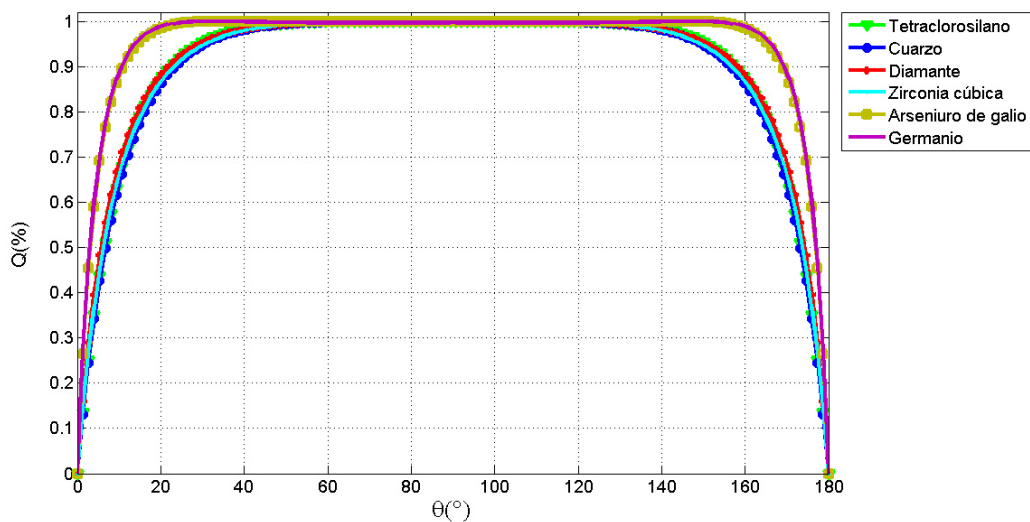


Figura.- 33. Colección de luz solar en una fibra óptica común con diferentes materiales en el núcleo.

En la figura 33, se ilustran los resultados de la energía solar incidente en una fibra óptica común con los diferentes índices de refracción en el núcleo de la Tabla 1, demostrando así que cualquiera de estos materiales alcanzan el 100% pero el material de Germanio y Arseniuro de galio alcanzan el 100% a ángulos a partir de 21° aproximadamente y 160°, mientras que los demás materiales alcanzan su punto máximo a partir de los 40° y decreciendo a partir de los 140°.

Ahora se presenta el cálculo de la energía incidente en la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, considerando los siguientes parámetros: r el haz de irradiación solar de $.32\text{Wh}/\text{cm}^2$, $R_c=5\text{cm}$ radio del núcleo de la fibra óptica obtiene ese valor debido al tipo de estructura (véase en el capítulo 3) y la reflectancia no polarizada de cada uno de los materiales calculados anteriormente, en la figura 34 se ilustra los resultado que se obtuvieron.

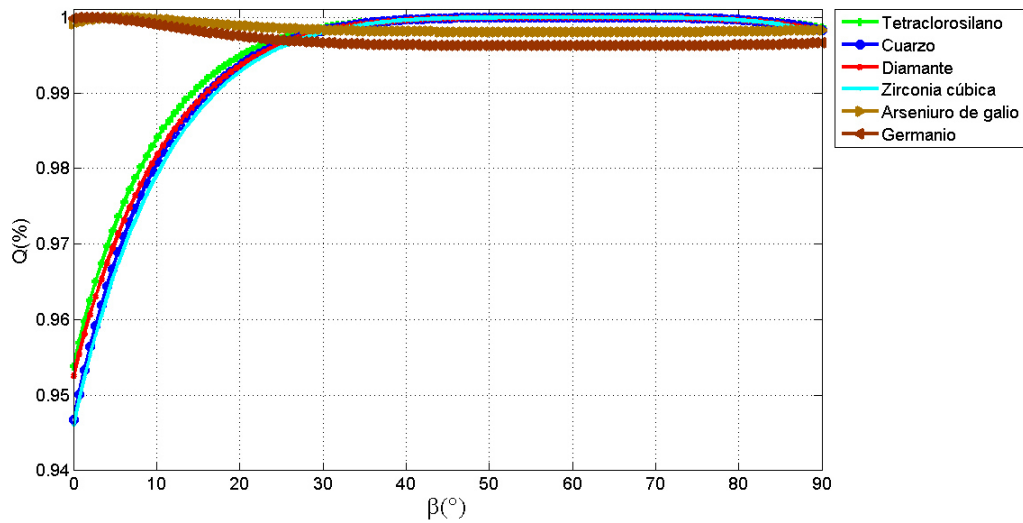


Figura.- 34. Colección de luz solar en la fibra óptica con abertura cónica con $\alpha=30^\circ$, en diferentes índices de refracción de los materiales.

En la figura 34, se muestra que los materiales de Germanio y Arseniuro de galio son los que colectan mayor cantidad de luz a ángulos menores de 10° y a partir de este ángulo hay un mínimo decremento, demostrando así que el material de Arseniuro de galio es el más alto, los demás materiales muestran una curvatura de incremento en ángulos de 0° a 40° hasta alcanzar el 100% de colección en los ángulos mayores a 35° aproximadamente.

A continuación, se calcula la energía incidente en la fibra óptica con una abertura cónica de $\alpha=60^\circ$, donde R_c es de 2.88cm (véase en el capítulo 3) y r como el haz de irradiación solar de $.32\text{Wh}/\text{cm}^2$, la reflectancia no polarizada de

cada uno de los materiales calculados anteriormente y utilizando la ecuación 34, se obtienen las curvas de la figura 35.

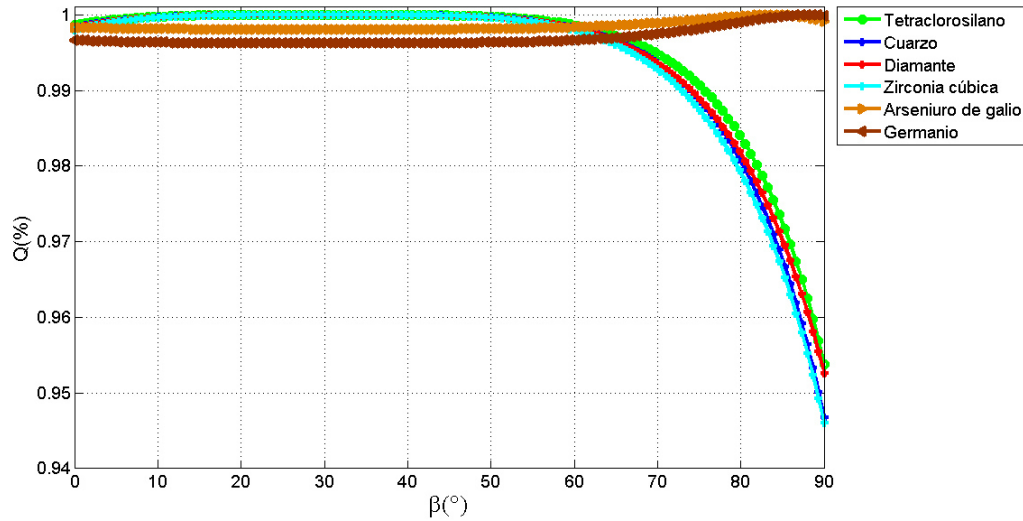


Figura.- 35. Colección de luz solar en la fibra óptica con abertura cónica con $\alpha=60^\circ$, en diferentes índices de refracción de los materiales.

Se observa que a partir del ángulo β de 10° hasta 55° aproximadamente los materiales de Tetraclorosilano, Cuarzo, Diamante y Zirconia cúbica alcanzan el 100% en la colección de luz solar y a partir de los 56° muestra un decremento; pero los materiales de Arseniuro de galio y Germanio a ángulos menores de 80° alcanzan el 98% y 99% de la colección pero a partir de los 80° incrementan su colección de luz incidente hasta el 100%.

Por último, se realizó el cálculo de la energía incidente en la estructura de la fibra óptica biselada, donde $R_c=4.75\text{cm}$ (véase calculo en el capítulo 3), r como el haz de irradiación solar $.32\text{Wh}/\text{cm}^2$, con la ecuación 34 y los valores de los materiales de la Tabla 1, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 36.

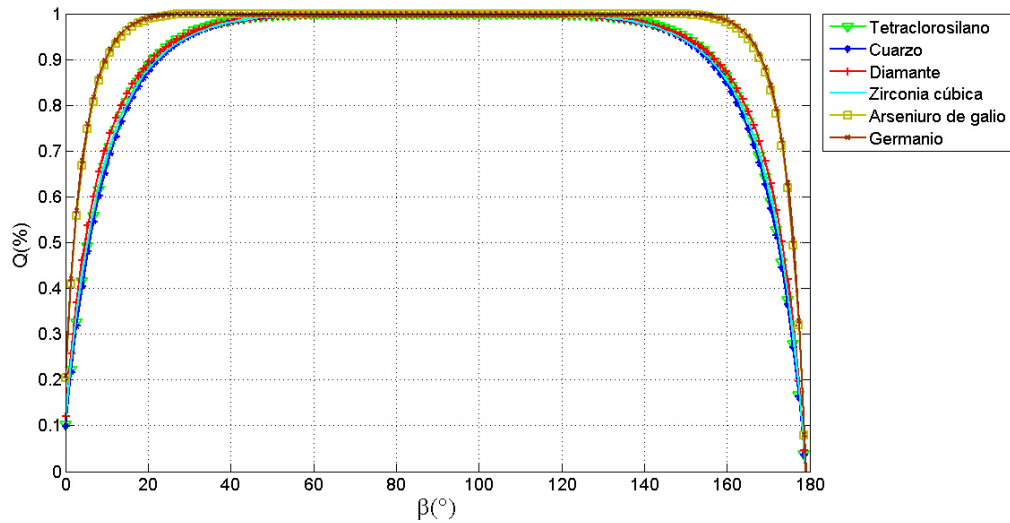


Figura.- 36. Colección de luz solar en la fibra óptica biselada, a diferentes índices de refracción de los materiales.

Se observa que el material de Germanio y Arseniuro de galio son los que obtienen una mayor colección de rayos solares incidentes, dejando al material de Cuarzo como el más bajo, en general todos los materiales muestran un incremento de la colección de luz solar incidente a partir de los 0° pero después de los 140° los materiales de Tetraclorosilano, Cuarzo, Diamante y Zirconia cubica disminuyen su colección de luz solar incidente mientras que el Arseniuro de galio y el Germanio disminuyen a partir de los 160°.

En cada una de las cuatro estructuras, los materiales de Germanio y Arseniuro de Galio fueron los más altos en cuanto a la colección de energía solar incidente. Los materiales presentados para el núcleo de la fibra óptica no están actualmente en el mercado de la fibra óptica, pero es posible mandar a fabricar una fibra óptica con cualquiera de estos materiales.

Se varió el radio del núcleo de la fibra óptica de 0cm a 30cm, con un índice de refracción de 4.01 del Germanio y Cuarzo de 1.55, para cada uno de las

estructuradas en la fibra óptica presentadas anteriormente y el resultado que se obtuvo en una fibra óptica común se muestra en la figura 37.

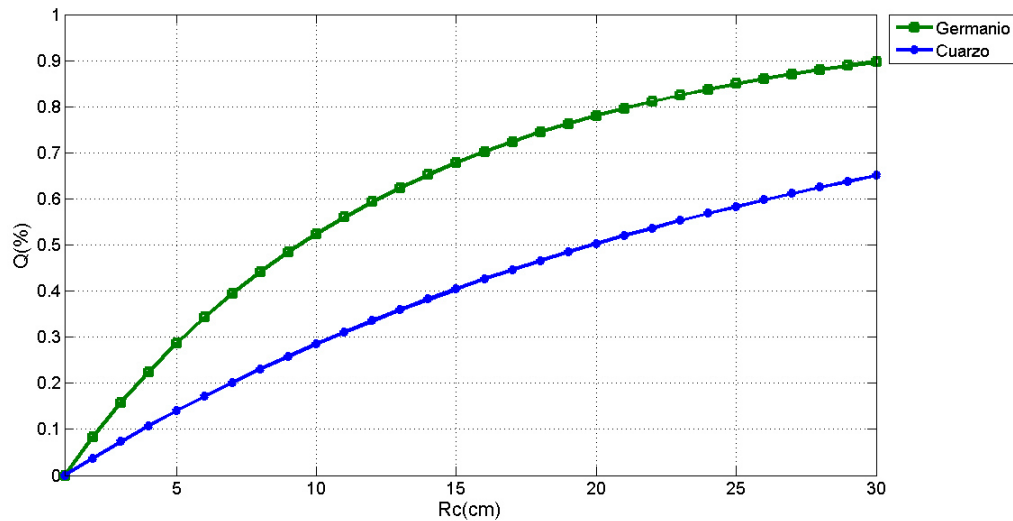


Figura.- 37. Energía incidente de la fibra óptica común en diferentes radios del núcleo Rc.

El material de Germanio obtuvo un máximo de 90% de eficiencia en la colección de luz solar incidente y de 0cm a 30cm va aumentando, pero en el material de Cuarzo se obtiene un 65% aproximadamente de eficiencia en la colección e igual que el Germanio conforma aumenta el radio va incrementando su colección de luz solar, es decir entre más grande sea el radio del núcleo Rc de la fibra óptica mayor eficiencia se obtendrá.

A continuación se muestra la energía incidente que logra coleccionar la fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, variando el radio del núcleo, con el material de Germanio que fue uno de los materiales más altos en la colección de la luz solar incidente y el material de Cuarzo que fue uno de los materiales con menor colección de luz solar incidente en las cuatro estructuras de la fibra óptica calculadas anteriormente, los resultados se muestran en la figura 38.

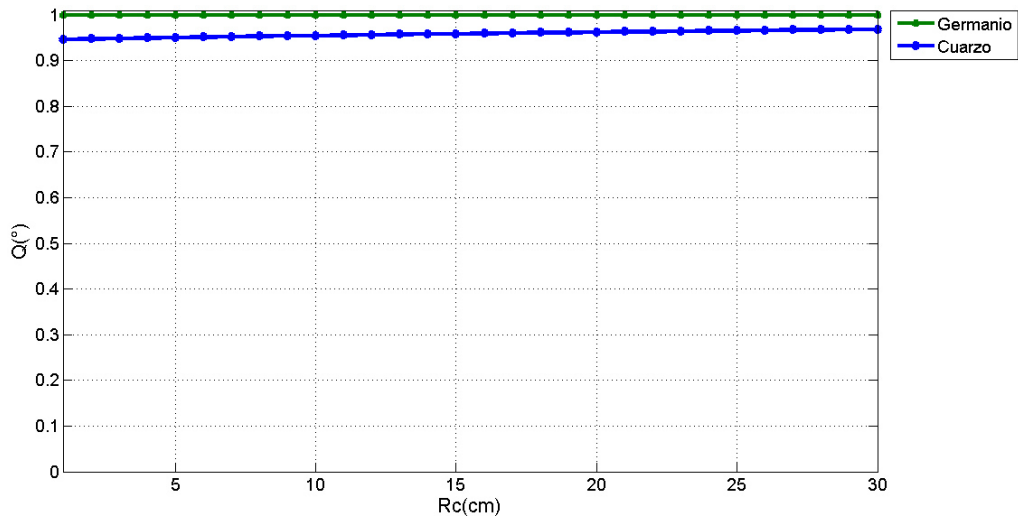


Figura.- 38. Energía incidente de la fibra óptica con apertura cónica donde $\alpha=30^\circ$ en diferentes radios del núcleo Rc.

Se observa que el material de Germanio obtiene el 100% en la colección de la luz solar incidente y se mantiene estable a cualquier valor del radio del núcleo, en cambio para el material de Cuarzo no alcanza el 100% de la colección solar.

En la figura 39 se muestran los resultados de la colección de la energía incidente de la fibra óptica con apertura cónica de $\alpha=60^\circ$ variando el radio del núcleo, con el material de Germanio y Cuarzo.

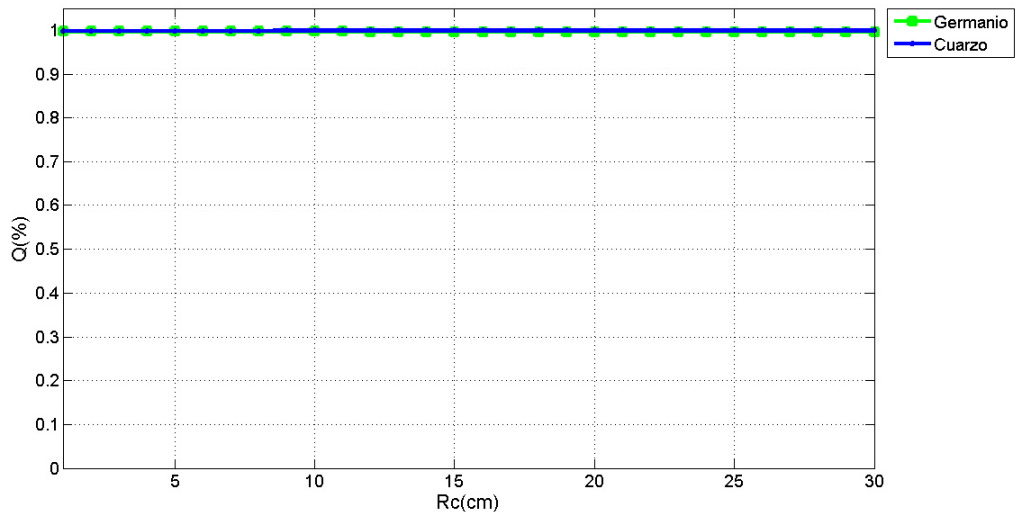


Figura.- 39. Energía incidente de la fibra óptica con apertura cónica donde $\alpha=60^\circ$ en diferentes radios del núcleo Rc.

A diferencia de una fibra óptica con abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, en $\alpha=60^\circ$ se obtuvieron resultados más favorables es decir, en ambos materiales se obtiene el 100% de la colección de luz solar incidente y se mantiene estable a cualquier valor del radio del núcleo de la fibra óptica, mientras que en $\alpha=30^\circ$ solo el Cuarzo no logra el 100%.

Por último en la figura 40, se muestran las curvas de la energía incidente en la fibra óptica biselada variando el núcleo del radio, con el material de Germanio y Cuarzo.

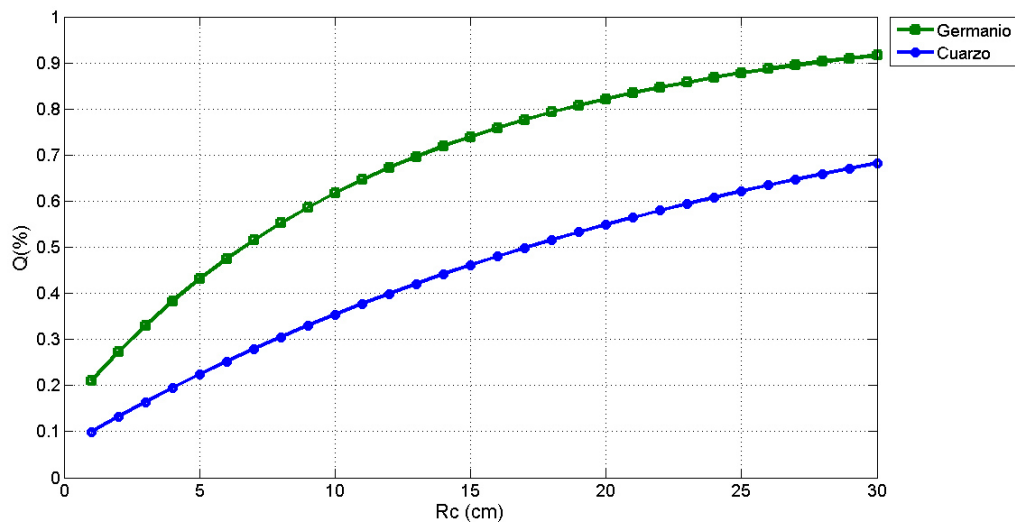


Figura.- 40. Energía incidente de la fibra óptica biselada en diferentes radios del núcleo Rc.

Se observa como el material de Germanio es el que colecta más luz solar a comparación del Cuarzo, a partir de 1 cm empieza la colección y va incrementando; el Germanio alcanza su máxima colección un poco arriba del 90% y el Cuarzo su máximo aproximadamente es de 69%.

Los resultados demuestran que en la estructura de la fibra óptica con abertura cónica el radio del núcleo no influye en la colección de la luz solar incidente, ya que se mantiene con un porcentaje alto y solamente en el valor de $\alpha=30^\circ$, el material de Germanio es el que alcanza el 100% en la colección; en la fibra óptica común y en la fibra óptica biselada si influye el radio del núcleo ya que

entre más grande sea el radio del núcleo de la fibra óptica va aumentando la colección de la luz solar incidente.

Una vez calculado la incidencia de colección en las cuatro diferentes estructuras de la fibra óptica con materiales reales, se procedió a realizar el cálculo con parámetros comerciales, es decir con fibras ópticas existentes y los resultados que se obtuvieron se muestran en la siguiente sección.

4.6 Energía del sistema con fibras ópticas comerciales

Anteriormente se presentaron los cálculos del sistema para una fibra óptica con parámetros reales, en esta sección se presentara el mismo análisis pero ahora con fibras ópticas comerciales, las cuales son aptas para trabajar con el rango de la longitud visible del sol, primero se realizó el cálculo para fibras ópticas multimodo para posteriormente compararlas con fibras ópticas monomodo.

La primera fibra óptica comercial es de la serie⁶² PM-S405-XP cuyo material del núcleo es de Sílice puro, esta fibra óptica multimodo trabaja con las longitudes de onda de 400nm a 680nm; la segunda fibra óptica comercial que se consideró en el análisis es de la compañía Thorlabs⁶³ es una fibra óptica multimodo cuyo material es de fluoruro de circonio (ZrF_4) y trabaja con longitudes de onda que va desde los 300nm hasta los 4500nm, con la capacidad de absorber rangos mayores al espectro visible es decir, también absorbe el infrarrojo; se realizó la evaluación de la reflectancia no polarizada y la energía incidente, con los cuatro tipos de estructura propuestos en la fibra óptica: común, abertura cónica de

$\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$ y biselada, los cuales obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.- Fibras ópticas comerciales multimodo.

Fibra óptica Estructura	Fibra óptica de Sílice Puro		Fibra óptica de ZrF_4	
	pf	Q	pf	Q
Fibra óptica Común	5%	100%	4%	100%
Fibra óptica con abertura cónica $\alpha=30^\circ$	41%	95%	46%	94%
Fibra óptica con abertura cónica $\alpha=60^\circ$	41%	95%	46%	94%
Fibra óptica biselada	3%	100%	3%	100%

Las estructuras con abertura cónica obtienen una reflectancia no polarizada de 41% en la fibra óptica de Sílice puro y un 46% en la fibra óptica de ZrF_4 , por lo tanto se obtiene una disminución de 5% y 6% en la colección de luz solar incidente, en cuanto a la estructura de la fibra óptica común se obtienen una reflectancia no polarizada debajo del 10% provocando una alta colección en la luz solar incidente en ambas fibras ópticas, la última estructura que es la biselada en ambas fibras ópticas obtienen un 3% en la reflectancia no polarizada dejando la colección de luz solar incidente en 100%, lo que indica que entra más baja sea la reflectancia no polarizada se obtendrá mayor colección de luz solar. Las dos fibras ópticas multimodo comerciales son aptas para este sistema, ya que en cualquiera de las cuatro estructuras que se proponen obtienen resultados favorables, en cuanto a la fibra óptica comercial con material de ZrF_4 corre el riesgo de que absorba y transmita los rangos mayores al espectro visible, en ese caso se consideraría implementar algunas

rejillas de Bragg para que desprecie esas longitudes de onda u otra opción es que se destine este tipo de fibra óptica para la alimentación de los aparatos eléctricos, en vez de iluminar espacios en interiores.

Las fibras ópticas comerciales monomodo que se consideraron para el análisis cumplen los requisitos del sistema que se propone es decir, trabajan en el rango espectral visible, la primera fibra óptica monomodo es de la compañía Thorlabs con la serie⁶⁴ S405-XP con el material de Sílice puro, trabaja en rango de 400nm a 680nm, es de la compañía Newport modelo⁶⁵ F-SA, trabaja con ondas de longitud de 488nm a 633nm y de material de Cristal, se realizó la evaluación de la reflectancia no polarizada y la energía incidente, con los cuatro tipos de estructura propuestos en la fibra óptica: común, abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$ y biselada, los cuales obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.- Fibras ópticas comerciales monomodo.

Fibra óptica Estructura	Fibra óptica de Sílice Puro		Fibra óptica de Cristal	
	pf	Q	pf	Q
Fibra óptica Común	3%	100%	4%	100%
Fibra óptica con abertura cónica $\alpha=30^\circ$	41%	95%	44%	94%
Fibra óptica con abertura cónica $\alpha=60^\circ$	41%	95%	44%	94%
Fibra óptica biselada	2%	100%	3%	100%

Con las estructuras de la fibra óptica común y biselada la reflectancia no polarizada de la fibra óptica de Sílice puro y de Cristal obtienen porcentajes por debajo del 5% causando una colección de luz solar incidente del 100%, pero en las estructuras de la fibra óptica con abertura cónica en la de material de Sílice puro llega a una reflectancia no polarizada de 41% causando una disminución del 5% en la colección y en la de Cristal la reflectancia no polarizada es de 44% provocando un disminución del 6% en la colección, lo cual indica que las mejores estructuras en la colección de luz solar son la común y biselada en ambas fibras ópticas comerciales.

En conclusión las fibras ópticas comerciales monomodo y multimodo son aptas en la colección de luz solar incidente, si operan en los rangos de la longitud de onda visible, la fibra óptica multimodo y monomodo de Sílice puro en las cuatro estructuras obtuvo porcentajes altos en la colección en comparación de los otros materiales.

Capítulo 5

Pérdidas

Existen diferentes clases de pérdidas pero el significado es el mismo en cualquier situación que se encuentre, normalmente las pérdidas determinan el monto que se está perdiendo. La palabra pérdida existe en cualquier área de investigación como en el área médica la pérdida suele ser parcial o total de algún miembro del cuerpo humano dañado; otro ejemplo de pérdida es cuando ocurre una catástrofe climatológica y haya dejado daños en la ciudad tanto de personas como de estructuras, en el área de ingeniería es muy común que la palabra pérdida esté relacionada con algún sistema que genere ganancias; por mencionar un ejemplo está el motor de inducción monofásico que se encuentra en los abanicos, los cuales son convertidores de energía es decir, la energía eléctrica o magnética la convierte en energía mecánica y el proceso de esta conversión genera pérdidas ya que desde la entrada del extractor al rotor de entrada está sufriendo pérdidas de energía eléctrica o electromagnética conforme va pasando el proceso sufre pérdidas de energía mecánica, hasta finalizar en las astas que producen la ventilación. En comunicaciones, las pérdidas suelen ser muy común ya que existen pérdidas desde la transmisión por ejemplo, la antena es un aparato transductor capaz de convertir las ondas electromagnéticas en energía eléctrica y como en el ejemplo del motor del abanico existen pérdidas en su proceso, al momento de enviar la información

viaja ya sea en la intemperie o dentro de una fibra óptica existen muchos obstáculos que hacen que la señal se pierda, cuando la señal de información viaja por medio de ondas electromagnéticas en el exterior suele obtener pérdidas debido a los cambios climatológicos, montañas, edificios altos, etc., si llega a la antena y se transmite la señal de información por medio de impulsos eléctricos a una fibra óptica obtiene otros tipos de pérdidas como: absorción, acoplamiento, atenuación, etc.

Una de las pérdidas en la fibra óptica aparte de las que se mencionaron cuando se usa en la transmisión de datos, es la atenuación el cual ha sido uno de los problemas principales en la transmisión de luz solar, en 1982 Cariou²⁰ et al. realizaron el cálculo y la experimentación del transporte de energía solar mediante las fibras ópticas, en uno de sus prototipos observaron que la concentración de rayos solares en la fibra óptica quemaba el revestimiento de esta y por lo tanto se pierde el núcleo a causa de la fibra óptica que usaron fabricada de plástico, al final optaron por una fibra óptica de Sílice donde el núcleo es una fusión de Cuarzo y Sílice, el revestimiento es de una resina de Silicón para que soporte el calor de los rayos solares, esta fibra óptica demostró una atenuación media a cada 10mts. Actualmente se fabrican fibras ópticas con menor atenuación, la más alta de una fibra óptica está entre 20dB/km y 30dB/km.

En este capítulo se presenta la definición de pérdidas, los diferentes tipos de pérdidas que existen en una fibra óptica, también el análisis de las pérdidas que se obtuvieron del sistema en cada una de las cuatro estructuras de la fibra óptica comerciales tanto para multimodo como monomodo.

5.1 Definición

Las pérdidas son la forma de expresar las cantidades de lo que se esté transmitiendo que no logran llegar al destino que se requiere, en algunas ocasiones las pérdidas son provocadas por factores externos, las cuales suelen ser calculadas dependiendo del sistema en el que se esté trabajando, por decir si se trata de la fibra óptica existen muchas pérdidas con respecto a la luz de la longitud de onda que se transmita sin olvidar la atenuación que surge en su transmisión.

5.2 Tipos de pérdidas

Cuando se trabaja con fibras ópticas existen diferentes tipos de pérdidas y cada una de estas pérdidas depende de diferentes factores como: el material del que está hecho la fibra óptica, la estructura donde será colocada que cause alguna curvatura en la fibra óptica y desvíe la transmisión, etc. A continuación se describe los tipos de pérdidas que sufre la fibra óptica:

Pérdidas Rayleigh: este tipo de pérdida se da debido a la dispersión de la luz, radiación electromagnética o partículas pequeñas que impide la propagación de lo que se está transmitiendo⁶⁶, en la fabricación de la fibra óptica es muy común este tipo de pérdidas ya que suele quedar microscópicas imperfecciones en el núcleo de la fibra óptica y cuando los rayos son transmitidos inciden en estas imperfecciones provocando que se difracte la luz y por consecuencia cambia la trayectoria.

Pérdidas por Absorción: este tipo de pérdidas suceden cuando las impurezas del material que este fabricado la fibra óptica, absorbe la luz y la convierte en calor este tipo de pérdidas se subdivide en absorción ultravioleta, absorción infrarroja y absorción por resonancia de iones⁶⁷.

Pérdidas por Radiación: este tipo de pérdidas aparecen cuando la fibra óptica sufre algún tipo de doblez provocando un cambio de dirección en la transmisión, existen dos tipos de dobleces y son: microdobleces el cual es una micro imperfección en el eje de la fibra óptica y provoca las pérdidas de Rayleigh, el otro doblez son los dobleces de radio constante que se presentan en su instalación o manejo donde doblan o tensionan la fibra óptica.

Pérdidas por Acoplamiento: este tipo de pérdidas suceden cuando existe una unión de los cables de fibra óptica ya que no suelen alinearse bien una con otra, también sucede por los acabados superficiales imperfectos de cada una de estas fibras ópticas que se pretende unir.

Otro tipo de pérdidas en la fibra óptica es la dispersión y se subdivide en diferentes tipos de dispersión una de ellas son: la dispersión cromática y la dispersión modal, pero primero se describe el concepto de dispersión.

Dispersión: la dispersión es un fenómeno que ocurre debido a la separación de las ondas de distintas frecuencias que atraviesan un material, algunos materiales son más dispersivos que otros, en las fibras ópticas la dispersión va deformando la luz a medida que se propaga a través de la fibra óptica ya que sus componentes van viajando a distintas velocidades⁶⁷, la dispersión en las fibras ópticas se dividen en dispersión cromática y dispersión modal e intermodal.

Dispersión Cromática: ocurre por las diferentes longitudes de onda de luz que se propagan a diferentes velocidades provocando que no llegue al mismo tiempo al extremo opuesto de la fibra óptica.

Dispersión Modal: este tipo de dispersión es común en las fibras ópticas multimodales, la dispersión modal o intermodal se debe a la diferencia de tiempos de propagación de los rayos de luz que hacen que vayan en diferentes trayectorias dentro del núcleo de la fibra óptica.

Una pérdida muy común en las fibras ópticas tanto monomodo como multimodo es la atenuación.

Atenuación: la atenuación es cuando limita la transmisión es decir los fotones, datos u ondas luminosas que transmite la fibra óptica se va perdiendo⁴⁷, este tipo de pérdida se da por diferentes aspectos ya sea la disminución del ancho de banda, la velocidad, absorción o la dispersión, las unidades en que se trabaja la atenuación es en decibeles (dB).

5.3 Atenuación en el sistema

Se evalúa la atenuación de las fibras ópticas comerciales anteriormente presentadas en el capítulo 4, con la siguiente expresión⁶⁸:

$$dB_{per} = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{Q_s}{Q} \right), \quad (35)$$

donde Q es la energía incidente del sistema, L es la longitud de la fibra óptica y Q_s es la energía a la salida del sistema, la cual es calculada por la siguiente expresión²:

$$Q_s = Q \cdot 10^{-\frac{L \text{ dB}}{10}} \quad (36)$$

dB es la atenuación de la fibra óptica comercial, L es la longitud de la fibra óptica y Q es la energía incidente del sistema.

La fibra óptica multimodo con núcleo de Sílice puro⁶² de la serie PM-S405-XP trabaja con longitudes de onda de los 400nm a los 680nm apta para las longitudes del espectro visible, pero es una fibra óptica con alta atenuación de 30dB/km, con este dato se calcula la energía a la salida del sistema para cada una de las estructuras propuestas en la fibra óptica, también se realizó el cálculo para la segunda fibra óptica multimodo comercial de fluoruro de circonio⁶³ (ZrF₄) la cual trabaja con longitudes de onda que va desde los 300nm hasta los 4500nm, con una atenuación de .25dB/mts; una vez obtenido el valor de la energía de salida del sistema se calcula la atenuación en este caso dBw/mts en las cuatro estructuras de la fibra óptica con la ecuación 35, pero expresadas como pérdidas de potencia, en la figura 41 se muestra los resultados que se obtuvieron en estas dos fibras ópticas multimodo comerciales.

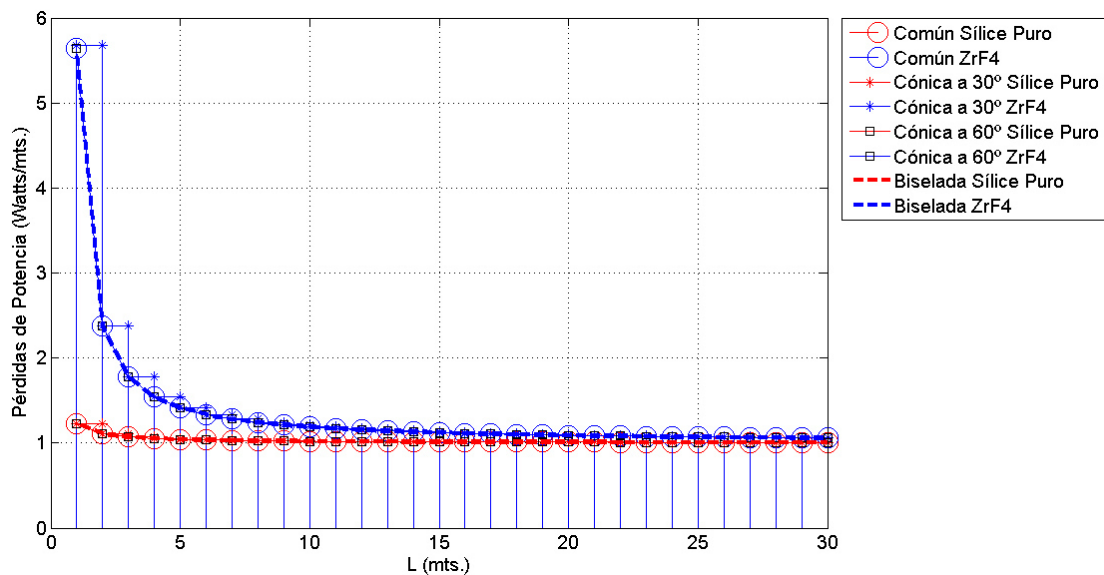


Figura.- 41. Pérdidas de potencia en las fibras ópticas comerciales multimodo.

En la figura 41, se observa los resultados de la pérdidas de potencia de las dos fibras ópticas multimodo comerciales, es decir con la conversión de la atenuación dBw/mts expresada en pérdidas de potencia como Watts/mts, donde se observa que la fibra óptica de Sílice puro es la que obtiene menores pérdidas en la cuatros estructuras de la fibra óptica, mientras que la de ZrF₄ obtiene mayor pérdida de potencia en el primer metro para las cuatro estructuras de la fibra óptica.

Siguiendo el análisis de las fibras ópticas multimodo comerciales, se realizó para las fibras ópticas monomodo comerciales, la primera es de la compañía Thorlabs con la serie⁶⁴ S405-XP con el material de Sílice puro, trabaja en un rango de 400nm a 680nm, con una atenuación de 30dB/km; la segunda fibra óptica es de la compañía Newport modelo⁶⁵ F-SA trabaja con ondas de longitud de 488nm a 633nm, con material es de Cristal y una atenuación de 50dB/km, se realizó la evaluación para los cuatro tipos de estructura propuestos en la fibra óptica: común, abertura cónica de $\alpha=30^\circ$, $\alpha=60^\circ$ y biselada, los cuales obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 42.

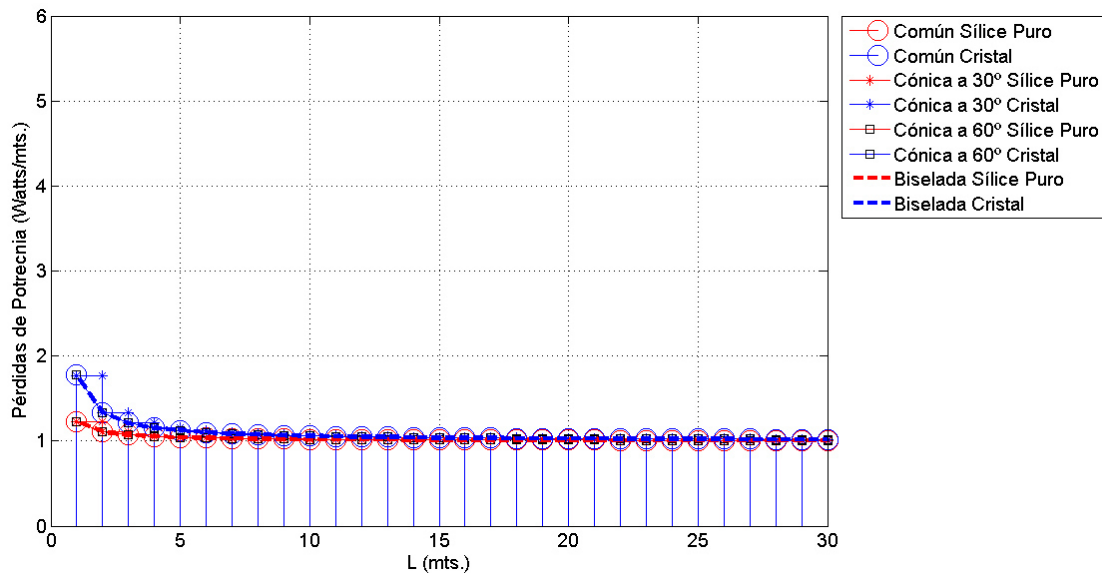


Figura.- 42. Pérdidas de potencia en las fibras ópticas comerciales monomodo.

Como se observa en la figura 42 las pérdidas de potencia en la fibra óptica de Sílice puro son las más bajas en las cuatro estructuras, pero la fibra óptica de Cristal obtiene una pérdida mayor en comparación a la de Sílice puro, en ambas el primer metro es el que alcanza el máximo de pérdidas.

En conclusión las fibras ópticas comerciales monomodo presentan una menor pérdida de potencia que las fibras ópticas comerciales multimodo, sin embargo el material de Sílice puro en ambas fibras ópticas comerciales multimodo y monomodo presentaron menores pérdidas de potencia en los cuatro tipos de estructuras, por lo que influye mucho el tipo de material que este fabricada la fibra óptica y no el tipo de estructura.

Capítulo 6

Conclusiones

Este capítulo se presentara las conclusiones que se llegó a partir de este trabajo teórico quedando así las opciones abiertas para un trabajo teórico-experimental, también algunas nuevas propuestas que serán muy útiles en este tipo de sistema, dándole más versatilidad al uso de la fibra óptica en la energía solar.

En el capítulo 2 se presentó los parámetros y condiciones que se consideran al trabajar con una fibra óptica, así como una breve explicación sobre los tipos de fibras ópticas que existen que son: fibra óptica multimodo y fibra óptica monomodo, las dos fibras ópticas son eficaces en la transmisión de longitudes de onda, aunque la monomodo transmite a más de 100km solo maneja un modo y la mayora trabaja con longitudes de onda mayores, la fibra óptica multimodo trabaja en rangos de longitud de onda menores en los cuales se encuentra la luz visible, además es capaz de transmitir más de un modo aunque su transmisión es de corto alcance no resulta ser inconveniente para el sistema que se propone el cual busca iluminar con luz solar los espacios interiores como de edificios y casas.

Las estructuras propuestas en la fibra óptica para el sistema de la colección de energía solar se explicaron en el capítulo 3, la primera es la fibra óptica común ya que no se le hace ningún tipo de estructura en la cara incidente, la segunda es la fibra óptica con abertura cónica, variando esta conicidad en 30° y 60° esta última considerada como una tercera estructura, la cuarta estructura es la fibra óptica biselada, se realizó un análisis a la fibra óptica con abertura cónica donde demostró que la fibra óptica sin revestimiento aprovecha y garantiza una mejor colección y propagación de los rayos solares, por lo que se consideró las cuatro estructuras de la fibra óptica sin revestimiento para así ser comparadas.

En el capítulo 4 se presentó el análisis de la reflectancia no polarizada, considerado como pérdidas de reflexión no polarizadas en la literatura; en este caso se calcularon para determinar que material obtiene una alta reflectancia no polarizada, después se realizó el análisis de la energía solar incidente en cada una de estas estructuras de la fibra óptica, demostrando así que los materiales con mayor índice de refracción obtienen mayor reflectancia no polarizada y colectan mayor cantidad de energía solar. También se presentó este análisis pero con fibras ópticas comerciales multimodo y monomodo, las cuales demostraron que cualquier tipo de estructura en la fibra óptica obtienen resultados favorables en la colección de luz solar, pero las estructuras común y biselada aprovechan el mayor rango de ángulos incidentes lo cual lleva el resultado del 100% en la colección de luz solar incidente.

En las estructuras de la fibra óptica si se aumentan los radios del núcleo de la fibra óptica común y biselada aumenta la colección de energía solar; en la fibra óptica con abertura cónica de 30° y 60° no afecta el aumento del radio del núcleo ya que cualquiera de estas dos estructuras su colección no aumenta, ni disminuye, solo se mantiene estable.

Las pérdidas que se muestran en el capítulo 5 son las pérdidas que obtiene la fibra óptica en el sistema; en la literatura los sistema de colección de luz solar obtienen muchas pérdidas pero la mayoría son provocadas por los dispositivos

ópticos que utilizan en la colección y concentración de rayos solar, por lo que estas pérdidas vienen afectando a las fibras ópticas las cuales utilizan como transporte de energía solar, en este caso el sistema que se propone en esta tesis es utilizar la fibra óptica sin ningún tipo de dispositivo óptico, por lo que se descartó las pérdidas provocadas por los dispositivos ópticos y se calculó la atenuación pero convertida en pérdidas de potencia que obtienen las fibras ópticas comerciales multimodo y monomodo, demostrando que en las cuatro estructuras la pérdida de potencia es la misma, es decir en el primer metro de transmisión de la fibra óptica es donde se obtiene mayor pérdidas pero después va decreciendo; la fibra óptica comercial con menor atenuación fue la de Sílice puro en la fibra óptica monomodo y multimodo, recalcando una vez más la importancia del material ya que el Sílice puro tiene un índice de refracción de entre 1.43 a 1.49, el material de Fluoruro de circonio de 1.50-1.55, el Cristal es de 1.52 al 1.62.

Quedando como la opción más óptima la fibra óptica comercial multimodo o monomodo de Sílice puro dependiendo de lo que se vaya a iluminar si es un edificio de varios metros o es simplemente una casa de pocos metros. Con respecto a las cuatro estructuras de las fibras ópticas demostraron ser capaces de coleccionar la luz solar, aunque la fibra óptica común y biselada se caracterizan por su amplia incidencia en los rayos solares incidentes, la fibra óptica biselada obtiene una incidencia media ya que solo alcanza a coleccionar la luz de un solo lado es decir, pierde la mitad del movimiento del sol por su geometría biselada; las fibras ópticas con aberturas cónicas logran concentrar muy bien la luz solar debido a su conicidad, los rayos que incidan a cualquier ángulo no obtiene pérdidas críticas que lleguen al 0% como la estructura de la fibra óptica común y biselada.

Finalmente este sistema logro demostrar teóricamente que la fibra óptica es capaz de coleccionar la luz solar en cualquiera de los cuatro tipos de estructura que se presentaron, cabe aclarar que el estudio es para una sola fibra óptica se

obtendría mayores resultados si se considerara un conjunto de fibras ópticas con cualquiera de estas cuatro estructuras, así aumentaría la colección de la luz solar, este trabajo de tesis queda abierto para llevarse a la práctica. Si se lleva a la práctica se demostraría que la fibra óptica a pesar de que ya la utilizan como transporte de energía solar, es una buena opción al ser utilizada como colector de energía solar y a su vez ahorraría el gasto en los dispositivos ópticos, este sistema llegaría a ser una mejor opción para la economía de las personas y las industrias en el uso de la energía solar por medio de fibras ópticas.

Referencias

- [1] R de Luca. "An optical fiber with a conic aperture." IOPScience, European Journal fo Physics, pp.1233-1240. (2006).
- [2] O. A. Jaramillo, J. A. del Rio, G. Huelsz. "A thermal study of optical fibres transmitting concentrated solar energy." Journal of Physics D: Applied Physics, **32** (9) pp.1-7. (1999).
- [3] Luis Perez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout. "A Review on Buildings Energy Consumption Information." Energy and Buildings, Elsevier, **40** (3) pp.394-398. (2008).
- [4] Travis Longcore, Catherine Rich. "Polución Lumínica y Ecosistemas." American Institute of Biological Sciences, Oct. 2010
http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/longcore_rich.html
- [5] C. Kandilli, K. Ulgen. "Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibers." Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, **13** (1) pp.67-84 (2009).
- [6] Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, Chiu-Feng Lin. "Sun Tracking Systems: A Review." Sensors, **9** pp.3875–90. (2009).
- [7] Jeong Tai Kim, Gon Kim. "Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment." Building and Environment, Elsevier, **45** (2) pp.256-269. (2010).
- [8] Jinyao Tang, Ziyang Huo, Sarah Brittman, Hanwei Gao, Peidong Yang. "Solution-processed core-shell nanowires for efficient photovoltaic cells." Nature nanotechnology, **6** pp.568-572. (2011).
- [9] Martin Kischkoweit-Lopin. "An Overview of Daylighting Systems." Solar Energy, Elsevier, **73** (2) pp.77-82. (2002).
- [10] Irfan Ullah, Seo-Yong Shin. "Development of Optical Fiber-based Daylighting System with Uniform Illumination." Journal of the Optical society of Korea, **16** (3) pp. 247-255. (2012).
- [11] C. Sapia. "Daylighting in buildings: Developments of sunlight addressing by optical fiber." Solar Energy, Elsevier, **89** pp.113-121. (2013).
- [12] H. Knox-Shaw. "Observations of Solar Radiation." Journal Helwan Institute of Astronomy and Geophysics Bulletins, **23**, pp. 237-256. (1915).

- [13] Edgar Nelson Transeau. "The Accumulation of Energy by Plants." *Journal of Science*: **26**, pp. 1-10. (1926.)
- [14] Robert H. Goddard, Worcester, Mass. "Apparatus for Absorbing Solar Energy." United States Patent Office. (1930).
- [15] R. Estey, R. Miller. "Transmission of solar radiation through heat-absorbing glass." *Journal Trans. Illuminating Engineering Soc.* **30**, pp. 403. (1935)
- [16] Parry Moon. "Proposed Standard Solar-Radiation Curves for Engineering Use." *Journal Franklin Institute*, pp.583-617. (1940).
- [17] Robert Gardon. "A Segmented-Mirror Solar Furnace for High-Intensity Thermal Radiation Studies." *AIP Publishing Review of scientific instruments*, **25** (5) pp.1-6. (1953).
- [18] John M. Davies y Eugene S. Cotton. "Design of the Quartermaster Solar Furnace." *Solar Energy*, Editorial Elsevier, **1** (2-3) pp.16-22. (1957).
- [19] Daisuke Kato y Takashi Nakamura. "Application of Optical Fibers to the Transmission of Solar Radiation." *AIP Publishing Journal Applied Physics*, **47** (10) pp.1-4. (1976).
- [20] J. M. Cariou, J. Dugas y L. Martin. "Transport of Solar Energy with Optical Fibres." *Solar Energy*, Editorial Elsevier, **29** (5) pp.397-406. (1982).
- [21] J. M. Cariou, J. Dugas y L. Martin. "Theoretical Limits of Optical Fibre Solar Furnaces." *Solar Energy*, Editorial Elsevier, **34** (4-5) pp.329-339. (1985).
- [22] Noor Khatri, Max Brown, Frank Gerner. "Using Fiber Optics to Tap the Sun's Power." *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Editorial Elsevier, **20** (6), pp.771-781. (1993).
- [23] Daniel Feuermann, Jeffrey M. Gordon. "Solar Fiber-Optic Mini-Dishes: A New Approach to the Efficient Collection of Sunlight." *Solar Energy*, Editorial Elsevier, **65** (3), pp.159-170. (1999).
- [24] A. Kribus, Ory Zik, Jacob Karni. "Optical Fibers and Solar Power Generation." *Solar Energy*, Editorial Elsevier, **68** (5), pp.405-416. (2000).
- [25] J. L. Baird, "Apparatus for transmitting views or images to a distance," U.S. Patente 1 699 279, Jan 15, (1929).
- [26] C. W. Hansell, Port Jefferson, "Picture Transmission," U.S. Patente 1 751 584, Mar 25, (1930).
- [27] H. Lamm. "Flexible Optical Instrument." *Z. Instrumentek*, **50**, pp.579-81. (1930).
- [28] A. C. S. Van Heel. "A new method of transporting optical images without aberrations." *Nature*, **4392** (173), pp.39. (1954).

- [29] N.S. Kapany. "Fiber Optics. VI. Image Quality and Optical Insulation." *Journal of the Optical Society of America*, pp.779-784. (1959).
- [30] N.S. Kapany. "Recent Developments in Infrared Fiber Optics." *Infrared Physics*, Elsevier, pp.69-75. (1965).
- [31] Kao, K. C., Hockham, G. A. "Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies." *Proc. IEEE*, **113** (7), pp.1151-1158. (1966).
- [32] Robert J. Potter, Cecilia E. Basor. "The History and Evolution of Fiber Optics." Xerox Corporation, **0014**, pp.1-21. (1968).
- [33] Franklin G. Reick. "Fiber Optics Illumination System," U.S.A Patente. Nueva York, pp.1-9. (1927).
- [34] S.E. Miller, E.A.J. Marcatili, Li Tingye. "Research toward optical-fiber transmission systems." *Proceedings of the IEEE*, **61** (12), pp.1703-1704. (1973).
- [35] Hill, K. O., Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication." *Appl. Phys. Lett*, **32** (10), pp.647-649 (1978).
- [36] Hui-pin Hsu. "Single Mode Fiber-To-Channel Waveguide through-Line Coupler," U.S.A Patente. Alexandria, Va., pp.1-4. (1979).
- [37] John A. Robbins. "High-intensity light source for a fiber optics illumination system," U.S. Patente. North Hollywood, California, pp.1-22. (1987).
- [38] Stuart Shaklan y Francois Roddier. "Coupling starlight into single-mode fiber optics." *Applied Optics*, pp.2334-2338. (1988).
- [39] Antonello Cutolo, Ivo Rendina. "Coupling efficiency of non-uniform optical fibers for solar energy applications." *Solar energy materials*, Elsevier, **18** (3-4), pp.191-200. (1989).
- [40] David A. Nueschuler, Charles R. Booth, John H. Morrow. "Innovative applications of optical fibers in the measurement of in-situ spectra." *SPIE Digital Library*, pp.1-16. (1992).
- [41] John C. Toomey, Dennis M. Tomisaka. "Miniature fiber optic transducer for continuous intracutaneous pH monitoring." *SPIE Digital Library*, pp.1-6. (1993).
- [42] James R. Sherman. "Illuminated Sight Having a Light Collector Serving a Fiber Optic," United States Patent, pp.1-5. (1993).
- [43] Irena Zivkovic, Katarina Maksimovic, Aleksandar Kojovic, Radoslav Aleksic. "Analysis of Smart Aramid Fiber Reinforced Laminar Thermoplastic Composite Material Under Static Loading." *Scientific Technical Review*, pp.1-7. (2008).

- [44] N. Puente, E.I. Chaikina, S. Herath, A. Yamilov. "Fabrication, characterization and theoretical analysis of controlled disorder in the core of optical fibers." *Applied Optics*, **50** (6), pp.802-810. (2010).
- [45] Norma Patricia Puente Ramírez, Arturo Romero Castañeda, Gustavo Rodríguez Morales, Moisés Hinojosa Rivera. "Fibras ópticas con inhomogeneidad inducida." *Ingenierías*, (14) **56**, pp. 30-37. (2011).
- [46] M.N.V. Padma Bhushan, D. Johnson, Md. Afzal Basheer Pasha, Ms. K. Prasanthi. "Optical Fibres in the Modeling of Translucent Concrete Blocks." *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, pp. 013-017. (2013).
- [47] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, [Fundamentals of Photonics], J. W. Goodman, 272-309 (1991).
- [48] Francis W. Sears, [Fundamentos de Física III Óptica], Addison-Wesley Publishing Company, EE.UU, pp. 3-60 (1960).
- [49] Allan W, Snyder, Colin Pask, D. J. Mitchell. "Light-acceptance property of an optical fiber." *Journal of the Optical Society of America*, **63** (1), pp. 59-64. (1972).
- [50] Rossi B, [Fundamentos de Óptica], Reverté S. A. Publisher, Spain, pp. 7-47 (2003).
- [51] Enrique López Moreno, Kurt Bernardo Wolf. "De la ley de Snell-Descartes a las ecuaciones de Hamilton en el espacio fase de la óptica geométrica." *Revista Mexicana de Física*, **2**, pp. 291-300. (1989).
- [52] Ramírez Tovar, María José. *Diseño de una red de Fibra Óptica de MOVISTAR en la Gran Caracas para aumentar la capacidad de transmisión actual*. (Tesis licenciatura). Universidad Simón Bolívar. (2007).
- [53] Hill, K. O., Y. Fujii, D. C. Johnson y B. S. Kawasaki. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication." *Appl. Phys. Lett*, **32** (10) pp.647-649 (1978).
- [54] Kashyap, R., "Fiber Bragg Gratings." Academic Press. (2010).
- [55] John A. Duffie, William A. Beckman, [Solar Engineering of Thermal Process], A Wiley&Interscience Publication, John Wilet & Sons, Inc., 3-147.(1980).
- [56] CA Mendoza Rodriguez. "Capitulo2. El potencial de la radiación solar." *Energía Solar México*, UNAM, pp.1-29. (2012).
- [57] Erik A. Jutta Schade. 2002. Daylighting by Optical Fiber. Master'sThesis. Lulea University of Technology.

- [58] R. López Luque (2000) "Radiación Solar." Física Aplicada, UCA, pp.1-32.
- [59] Kim E. Barrett, Susan M. Barman, Scott Boitano, Heddwen L. Brooks, [Ganong Fisiología médica], Mc Graw Hill, 236-238 (2010).
- [60] Michael F. Modest, [Radiative Heat Transfer], Academic Press, California, 42-57 (2012).
- [61] Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana (R. Almanza S., E. Cajigal R., J. Barrientos A. 1997) Reportes de insolación de México. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999 <http://econotecnia.com/radiacion-solar.html>.
- [62] Company Nufern, Optical fiber, Coil Winding, Lasers and Amplifiers http://www.nufern.com/pam/optical_fibers/ .
- [63] Company Thorlabs, <http://www.thorlabs.com/index.cfm> .
- [64] Company Thorlabs, <http://www.thorlabs.com/index.cfm>
- [65] Company Newport, <http://www.newport.com/>
- [66] Theodore S. Rappaport, [Wireless Communications principles and practice], Prentice Hall, US.A., 208-212 (2010).
- [67] Wayne Tomasi, [Sistemas de Comunicaciones Electrónicas], Prentice Hall, México, 442-449 (2003).
- [68] Oscar A. Jaramillo Salgado. 1998. Transporte de Energía Solar Concentrada a través de Fibras Ópticas: Acoplamiento Fibra-Concentrado y Estudio Térmico. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de México.

Índice de Figuras

Figura.- 1. Luz de día por fibra óptica: sistema colector. Concentrador PPC, conjuntos de fibras ópticas, frecuencia selectiva (SOE), infrarrojo celda PV ¹¹	18
Figura.- 2. Es una vista en alzado posterior de la vista como se ve por un arquero durante el uso ⁴²	24
Figura.- 3. Sistema de tubos de luz instalado en el techo ⁷	26
Figura.- 4. Instalación del sistema de espejos solares ⁷	26
Figura.- 5. Esquema de una fibra óptica con el perfil de índice de refracción n	33
Figura.- 6. Rayo incidente cuando alcanza el ángulo crítico o ángulo limite.....	34
Figura.- 7. Fibra óptica con referencia al ángulo de aceptación (θ_a) donde la línea punteada (o) es el eje de guía de la fibra óptica.	35
Figura.- 8. Fenómeno de la refracción con los índices de refracción n_1 y n_2 de diferentes medios.....	42
Figura.- 9. Fenómeno de la reflexión donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios.....	43
Figura.- 10. Esquema del rayo que incide en la frontera de los dos segmentos rectos y forma un ángulo θ con respecto a la normal de la superficie.	44
Figura.- 11. Esquema del rayo refractado al segundo medio o segmento formando el ángulo θ' con respecto a la normal de la superficie.	45
Figura.- 12. Esquema de un rayo de luz cuando sufre una reflexión total interna.	46
Figura.- 13. Representación de la trayectoria de un rayo meridional que pasa a través del eje de guía de la fibra óptica (o), formando el ángulo de incidencia θ	47
Figura.- 14. Esquema de la trayectoria de un rayo sesgado.	47
Figura.- 15. Tipos de rejillas de Bragg ⁴⁵	52
Figura.- 16. Estructuras cónicas en la fibra óptica, a) fibra óptica con estructura cónica externa para ondas planas ³⁹ , b) fibra óptica con estructura cónica interna para luz solar ¹	53
Figura.- 17. Fibra óptica común.....	55
Figura.- 18. Fibra óptica con abertura cónica.....	56
Figura.- 19. Fibra óptica con abertura cónica y la trayectoria ideal del rayo de luz incidente.	57
Figura.- 20. Fibra óptica con abertura cónica en el análisis de la reflexión total interna.....	58
Figura.- 21. Función $f_{n_1n_2}(\alpha, \beta)$ para $n_1=1.6$ y $n_2=1.0$	60
Figura.- 22. Función $f_{n_1n_2}(\alpha, \beta)$ $n_1= 1.6$ y $n_2=1.4$	61
Figura.- 23. Fibra óptica con abertura cónica a 30°	62
Figura.- 24. 24 Fibra óptica con abertura cónica a 60°	63
Figura.- 25. Fibra óptica biselada.	64
Figura.- 26. Radio del núcleo (R_c) de la fibra óptica biselada y los diferentes ángulos γ	66

Figura.- 27. Espectro electromagnético ⁵⁷ (mod. Mata. M. T. N.)	70
Figura.- 28. Espectro electromagnético con sus longitudes de onda y frecuencia ⁵⁸	71
Figura.- 29. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica común con diferentes materiales en el núcleo.	78
Figura.- 30. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica con una abertura cónica $\alpha=30^\circ$, con diferentes materiales en el núcleo.	80
Figura.- 31. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica con abertura cónica a 60° , con diferentes materiales.....	81
Figura.- 32. Reflectancia no polarizada de una fibra óptica biselada, con diferentes materiales.....	82
Figura.- 33. Colección de luz solar en una fibra óptica común con diferentes materiales en el núcleo.....	84
Figura.- 34. Colección de luz solar en la fibra óptica con abertura cónica con $\alpha=30^\circ$, en diferentes índices de refracción de los materiales.....	85
Figura.- 35. Colección de luz solar en la fibra óptica con abertura cónica con $\alpha=60^\circ$, en diferentes índices de refracción de los materiales.....	86
Figura.- 36. Colección de luz solar en la fibra óptica biselada, a diferentes índices de refracción de los materiales.	87
Figura.- 37. Energía incidente de la fibra óptica común en diferentes radios del núcleo R_c	88
Figura.- 38. Energía incidente de la fibra óptica con abertura cónica donde $\alpha=30^\circ$ en diferentes radios del núcleo R_c	89
Figura.- 39. Energía incidente de la fibra óptica con abertura cónica donde $\alpha=60^\circ$ en diferentes radios del núcleo R_c	89
Figura.- 40. Energía incidente de la fibra óptica biselada en diferentes radios del núcleo R_c	90
Figura.- 41. Pérdidas de potencia en las fibras ópticas comerciales multimodo.	100
Figura.- 42. Pérdidas de potencia en las fibras ópticas comerciales monomodo.....	101

Índice de tablas

Tabla 1.- Índices de refracción de materiales reales ⁴⁷	78
Tabla 2.- Fibras ópticas comerciales multimodo.....	92
Tabla 3.- Fibras ópticas comerciales monomodo.	93