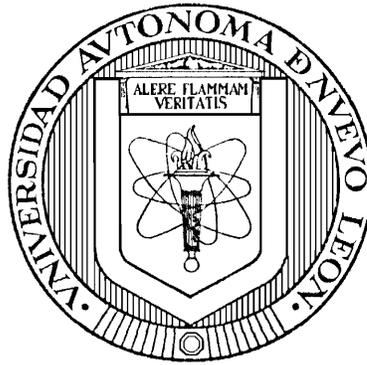


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO DE UN COLECTOR
SOLAR CON FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA LA
ILUMINACIÓN DE INTERIORES

POR

PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO DE UN COLECTOR
SOLAR CON FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA LA
ILUMINACIÓN DE INTERIORES

POR

PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR CON FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA LA ILUMINACIÓN DE INTERIORES», realizada por el alumno PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ, con número de matrícula 1311766, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
Asesor de Tesis

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Co-Asesor

Dr. Iván Moreno Hernández
Secretario

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Subdirector de Estudios de Posgrado
Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio 2014

If you are really doing optics, you get photons under your fingernails

James M. Palmer

*Dedicado a mi familia:
Mamá, papá, ita, ito y mi Nina;
y a Guillermo Sánchez...
sin ustedes nada de esto sería posible.*

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis representa la culminación del trabajo de investigación que realicé durante mis estudios de la Maestría en Ingeniería Física Industrial, pero además, representa la suma de esfuerzos de diversas personas que contribuyeron directa o indirectamente en esta investigación, simboliza también, un acumulado de apoyos académicos, emocionales, económicos y hasta psicológicos que me fueron brindados para lograr cumplir esta importante meta, la de concluir mis estudios de Maestría haciendo una contribución a la sociedad por medio de un proyecto de investigación. Es por lo anterior que durante esta sección intentaré agradecer a las personas que se vieron involucradas de alguna u otra forma en el desarrollo de mi tesis, sin embargo, me atrevo a pedir disculpas adelantadas si por descuido cometo la imprudencia de omitir a alguien.

Me gustaría comenzar agradeciendo a mi asesor, el Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera, por aceptar emprender esta aventura a mi lado, por creer en mí como estudiante, por enseñarme todo lo que estuvo en sus manos y por confiar en mis capacidades, por arriesgarse conmigo a adentrarse en áreas de la Óptica donde muy pocos en el país han decidido entrar, por creer que contábamos con un buen proyecto y contagiarme su entusiasmo para afrontar todos los retos que surgieron. Agradezco sinceramente todos sus conocimientos, consejos, su apoyo, pero sobre todo su paciencia, por permitirme crecer a nivel académico y científico sin prisas, sin presiones, realmente logró que el proceso de la realización de la presente tesis fuera algo sumamente ameno y, además, una muy buena experiencia que guardaré en mi memoria por el resto de mi vida.

Otra persona muy importante, la cual jugó un papel vital en el desarrollo en el presente trabajo, aún antes de que se iniciará, es el Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar, quien supo detectar un área de oportunidad en el área de la Iluminación Sustentable y, como buen emprendedor, decidió incursionar confiando en que trabajando en equipo lograríamos resultados favorables. También, le agradezco todo lo que he aprendido a su lado, desde que comencé a trabajar en su equipo hace más de 3 años, gracias por inculcar con el ejemplo los valores de la responsabilidad, la perseverancia y la tenacidad, por retarme día a día con nuevos proyectos, por brindarme su confianza en la toma de decisiones, en fin, por permitirme crecer y madurar a su lado por medio del trabajo duro, pero sobre todo, satisfactorio.

Además me gustaría agradecer al Lic. Rogelio Juvenal Sepúlveda Guerrero, actual director de mi querida facultad, ya que si él no hubiera creído en nosotros y no nos hubiera brindado su apoyo no se habría logrado concluir tan satisfactoriamente el presente proyecto. Gracias a su confianza en nuestro trabajo y a su gran apoyo logramos asistir a congresos, por el equipo de cómputo que nos brindó y por ayudarnos a adquirir materiales que nos permitieron salir adelante con los retos que se nos presentaban en la investigación.

Asimismo quiero agradecer a la Dra. Dayana Peñalver y al Dr. Iván Moreno quienes han contribuido con su supervisión, sus conocimientos y sus opiniones en la realización de nuestra investigación en Iluminación Natural, su ‘expertise’ ha ayudado mucho en la toma de decisiones y en cada paso dado para concluir el proyecto.

No sólo se aprende de nuestros maestros y superiores, también se aprende y mucho de nuestros compañeros, es por eso que quiero darle gracias en especial a mi compañero, amigo y algo más, a Guillermo Ezequiel Sánchez Guerrero, quien fue pieza clave para mi desarrollo como estudiante de la Maestría desde el inicio, gracias por hacer más sencilla la transición de ser una estudiante de Licenciatura en Ciencias Computacionales a ser una estudiante de Maestría en Física, gracias por apoyarme con mis estudios, por explicarme lo que no entendía, por desvelarte a mi lado haciendo las tareas y por siempre tener tiempo para escuchar mis ideas y planes, por más disparatados que fueran. En especial quiero agradecerte todo el esfuerzo y tiempo que le dedicaste a este proyecto, si bien el desarrollo de la tesis fue mi responsabilidad, tu trabajaste a mi lado en todo lo que representó la implementación experimental, y fue por tu apoyo y tu disposición que el día de hoy podemos presumir de tener un prototipo experimental, que aunque aún necesita mejoras, ya nos arroja resultados favorables, en serio, gracias por todo.

Ahora quiero agradecer a mi compañero y amigo, casi hermano, Gustavo Cárdenas, gracias por ser parte de “Los Sustentables”, gracias por colaborar con ideas y con trabajo desinteresado en todo lo que ha implicado en esta tesis. Sinceramente te agradezco esas tardes en el techo del Centro de Investigación dónde nos acompañaste, a mí y a Guillermo, mientras hacíamos nuestras pruebas bajo el Sol intenso de Monterrey, pero en especial gracias por buscar siempre el animarnos el día, por esforzarte por reducir el estrés de los días extenuantes de trabajo y por siempre tener palabras para alentarnos a pesar de lo desfavorable o difícil que pintara la jornada.

No quiero pasar por alto a ninguna persona, por lo cual quiero agradecer en general a todos los integrantes, pasados y presentes, del Cuerpo Académico de Fotónica y Telecomunicaciones, quienes siempre vieron de buena cara este proyecto y, en todo momento, estuvieron disponibles para brindarme orientación y apoyo con los retos diarios que se presentaron, este trabajo es de todos ustedes, ya que todos aportaron algo de sí para que se pudiera realizar.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ya que fue gracias a su apoyo durante la realización de mi posgrado que yo pude dedicar mi tiempo y mi esfuerzo a la realización de mi tesis, espero y confío que seguirán sus apoyos para que muchos jóvenes, al igual que yo, puedan desarrollarse en el campo científico tal como lo he logrado durante mis estudios de Maestría.

Otra institución importante, quien apoyó mi desempeño académico por medio de una beca a manera de recompensa por mi trayectoria en los campos de la Óptica y la Fotónica, es la SPIE (Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica), gracias por el apoyo y por todo el material que ponen al alcance de estudiantes como yo, por acciones como esa es que los estudiantes mexicanos logramos estar a nivel de estudiantes de países desarrollados.

Gracias, Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial, gracias Facultad de Ciencias Físico Matemáticas por haber sido mi casa durante poco más de 2 años más, gracias por su apoyo incondicional, gracias por hacerme sentir realmente parte de una gran familia que es la FCFM de la UANL, no imagino haber hecho mis estudios de Maestría en algún otra institución, hoy termino

esta tesis diciendo que soy *Orgullosamente Universitaria*, ya que sé que todo el trabajo realizado fue soportado en todo momento por mi Universidad y por mi Facultad.

Antes de terminar quiero agradecer a mis amigos: Mimi, Vicky, Andy, Liz, Aalan, Lucy, Peter y todos los demás; gracias por seguir brindándome su amistad a pesar de que, sobre todo en los últimos meses, he estado muy ausente de sus vidas y los he descuidado tanto, gracias por soportar mis pláticas, que casi nadie entendía, donde explicaba mi tesis y lo que hacía.

Finalmente, pero no por eso menos importante, quiero agradecer a mi familia: mi madre, mi abuelita y mi madrina, ustedes jugaron un papel vital en que se logrará la conclusión exitosa de este trabajo. Gracias mamá por apoyarme siempre en mis estudios, por aceptar mis ausencias y mis desvelos, gracias por animarme, a su manera, a sacar todo adelante y a echarle muchas ganas, he aprendido muy bien de usted a ser la mujer que soy hoy. Gracias abuelita por estar siempre ahí cuando regresaba de la escuela, por escuchar todas mis aventuritas y siempre mostrar gran interés en todo lo que me pasaba y por contagiarse de mis alegrías cuando lograba avances y brindar su hombro como apoyo cuando había retrocesos, gracias por ese calor de hogar que me ayudaba a recobrar las energías para regresar al día siguiente con mucho ánimo a avanzar en mi proyecto. Y gracias Madrina María, gracias porque aunque está lejos me ha apoyado y ha seguido paso a paso mi evolución en mi carrera, gracias por todo lo que ha hecho por mí, gracias por mi laptop, por su apoyo emocional y por hacerme sentir como otro más de sus hijos.

Esperando no haber pasado a nadie por alto, me resta sólo decir: gracias a todo aquel que se ha tomado la molestia de leer el presente trabajo.

PRÓLOGO

El presente documento describe un trabajo de investigación realizado durante mis 2 años de estudio de la Maestría en Ingeniería Física Industrial en el Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, tiempo durante el cual me especialicé en el área de óptica, concretamente con el propósito de investigar un método para coleccionar la luz solar con propósitos de iluminación directa.

Este trabajo contiene el proceso de análisis, modelado, diseño y puesta en marcha de un sistema de iluminación sustentable basado en colección de luz solar por medio del uso de lentes de Fresnel para su posterior distribución en el interior de edificios por medio de fibra óptica plástica.

Hipótesis. Es posible desarrollar un sistema de iluminación solar basado en lentes de Fresnel y Fibras Ópticas Plásticas eficiente si se realiza un estudio previo del acoplamiento de estas componentes empleando elementos como vidrios Pyrex o Cuarzo, la forma geométrica de estos vidrios, así como conocer las tolerancias en su alíneación.

Objetivos. El objetivo principal del presente trabajo de investigación es el proponer un diseño de un sistema de iluminación solar basado en lentes de Fresnel que emplee fibras ópticas plásticas para la distribución de la luz que nos permita obtener la menor cantidad de pérdidas por acoplamiento de los diversos componentes ópticos. Para esto se consideran los siguientes objetivos particulares:

- Realizar un análisis radiométrico completo de los sistemas de colectores con fibras ópticas plásticas que nos permita dimensionar de manera adecuada los componentes de los mismos.
- Desarrollar un análisis matemático y numérico de diversas geometrías de colectores que nos permitan identificar las ventajas de los lentes de Fresnel por encima de otros tipos.
- Establecer una metodología adecuada para los procedimientos de cortado y pulido de fibras ópticas plásticas para disminuir sus pérdidas.
- Diseñar un modelo de un sistema de de iluminación solar que maximice el acoplamiento de sus componentes ópticos e incremente su eficiencia.

Este documento está estructurado en 5 capítulos, en el primero se realiza una breve descripción de las diversas técnicas de iluminación sustentable y se realiza una comparativa de las mismas. Además, se aborda de manera amplia el estado del arte de los sistemas de colectores solares acoplados a fibras ópticas, resaltando sus ventajas y debilidades. Finalmente, se plantean la hipótesis y

los objetivos de esta investigación, las necesidades que se desean cubrir y los beneficios esperados, y se limitan las áreas de acción del problema abordado.

En el capítulo dos se explican aspectos importantes sobre los colectores solares, haciendo un estudio de su clasificación según su geometría por medio de un análisis matemático de cada uno; además, se hace una revisión de sus características y se listan algunas de sus aplicaciones principales. En lo concerniente a las fibras ópticas plásticas, se estudia la matemática detrás de su funcionamiento, se caracterizan sus pérdidas debido a distintos factores, se explican los principales métodos de fabricación y se mencionan sus aplicaciones.

En el capítulo tres se llevará a cabo el modelado numérico del acoplamiento entre un colector solar, un acoplador de vidrio y la fibra óptica plástica para obtener un mínimo de pérdidas, para esto se integrarán la teoría y matemática de cada factor involucrado en el sistema. Asimismo, se realizará un análisis sobre pérdidas y sobre diversas técnicas para la disipación del calor concentrado por el colector solar.

El cuarto capítulo describe de manera detallada la implementación experimental del sistema diseñado en la sección anterior, haciendo énfasis en los resultados obtenidos en lo concerniente a las tolerancias de sistema para la disminución de pérdidas. Se muestra una caracterización de la fibra óptica plástica empleada en el sistema y se explican las técnicas empleadas para su manipulación y cuidado. También se hace un dimensionamiento del colector solar de Fresnel que se utilizará y la selección del acoplador de vidrio y los filtros IR que se ajustarán de manera óptima a las necesidades del sistema.

Finalmente, el capítulo cinco aborda las conclusiones concernientes al análisis y selección de los componentes del sistema, los resultados obtenidos en el acoplamiento de la luz y el análisis de las tolerancias. Conjuntamente, se realizan propuestas para la mejora del sistema de colección solar y su acoplamiento a las fibras ópticas plásticas.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
PRÓLOGO	V
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Sistemas de Iluminación Sustentable	2
1.2. Estado del Arte	5
1.2.1. Antecedentes	5
1.2.2. Funcionamiento General	7
1.2.3. Ventajas	14
1.2.4. Beneficios de la Luz Natural en las Personas	15
1.2.5. Áreas de Oportunidad	16
1.3. Motivación	17
1.3.1. Delimitación del Problema y Alcances	17
1.3.2. Estudios Previos	18
1.3.3. Motivación	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Radiometría y Radiación Solar	20
2.1.1. Radiometría	20
2.1.1.1. Espectro Electromagnético	20
2.1.1.2. Tipos de Radiación	21
2.1.1.3. Cantidades Radiométricas Fundamentales	22
2.1.2. Fotometría	23
2.1.2.1. Visión Humana	24
2.1.2.2. Cantidades Fotométricas Fundamentales	25
2.1.2.3. Fotometría e Iluminación	26
2.1.3. El Sol	27
2.1.3.1. Constante Solar	27

TABLA DE CONTENIDO

VIII

2.1.3.2.	Espectro Solar	28
2.1.3.3.	Radiación Solar para Iluminación	30
2.1.3.4.	Radiación Solar en México	30
2.1.4.	Energía Radiante	31
2.1.4.1.	Leyes de la Termodinámica	31
2.1.4.2.	Conservación de la Energía	31
2.1.4.3.	Transferencia de Calor	33
2.1.4.4.	Radiación de Cuerpo Negro	33
2.2.	Colectores Solares	35
2.2.1.	Óptica Geométrica	35
2.2.1.1.	Conceptos Básicos	35
2.2.1.2.	Óptica Anidólica	36
2.2.1.3.	Reflexión y Refracción de la Luz en Superficies Ópticas	37
2.2.1.4.	Sistemas Ópticos.	39
2.2.2.	Análisis Numérico de Sistemas Ópticos	43
2.2.2.1.	Trazado de Rayos	44
2.2.2.2.	Superposición de Ondas.	44
2.2.3.	Tipos de Colectores.	45
2.2.3.1.	Reflectores	45
2.2.3.2.	Lentes	46
2.2.4.	Lentes de Fresnel	47
2.2.4.1.	Conceptos Básicos	48
2.2.4.2.	Usos de los Lentes de Fresnel	49
2.2.4.3.	Pérdidas en Lentes de Fresnel	50
2.2.5.	Colección de Luz y el Espectro Solar	50
2.3.	Fibras Ópticas, Lightpipes y Guías de Onda	51
2.3.1.	Funcionamiento	51
2.3.2.	Fibras Ópticas	52
2.3.2.1.	Clasificación	52
2.3.3.	Fibras Ópticas Plásticas	53
2.3.3.1.	Métodos de Fabricación de FOP	54
2.3.3.2.	Pérdidas de Transmisión	55
2.3.4.	Guías de Onda y Tubos de Luz	56
3.	ANÁLISIS MATEMÁTICO Y NUMÉRICO DEL SISTEMA	58
3.1.	Planteamiento del Problema	58
3.1.1.	Caracterización del Sistema	59
3.1.1.1.	Fuente	60
3.1.1.2.	Óptica del Sistema	60
3.1.1.3.	Unidades	61
3.2.	Análisis Matemático	62
3.2.1.	Modelado del Lente de Fresnel	62
3.2.2.	Análisis Radiométrico	62

TABLA DE CONTENIDO

IX

3.2.2.1.	Densidad de Potencia en el Foco	62
3.2.2.2.	Concentración de Temperatura	64
3.2.3.	Análisis de Apertura Numérica	65
3.2.3.1.	Apertura Numérica de la Óptica del Sistema	65
3.2.3.2.	Optimización del Sistema	66
3.3.	Análisis Numérico	68
3.3.1.	Modelado de la Lente Plano Convexa en <i>OSLO</i> ®	68
3.3.2.	Modelado de los Componentes en <i>ZEMAX</i> ®	70
3.3.2.1.	Fuente	71
3.3.2.2.	Lente de Fresnel	71
3.3.2.3.	Arreglo Fuente - Lente de Fresnel	72
3.3.2.4.	Varilla Disipadora de Borosilicato	73
3.3.2.5.	Fibra Óptica Plástica	73
3.3.2.6.	Detectores	74
3.3.2.7.	Macros	75
3.3.3.	Optimización del Foco	75
3.3.3.1.	Primera Aproximación	76
3.3.3.2.	Segunda Aproximación	77
3.3.4.	Densidad de Potencia del Lente de Fresnel	79
3.3.5.	Dimensionamiento de la Varilla Disipadora	79
3.3.5.1.	Selección por Tolerancia Espacial en 'z'	81
3.3.5.2.	Tolerancias Espaciales en 'x' y en 'y'	83
3.3.5.3.	Caracterización de la Salida	84
3.3.6.	Inclusión de la FOP al Sistema	86
3.3.6.1.	Tolerancias de Alíneación Espacial de la FOP	86
3.3.6.2.	Caracterización de la Salida	87
3.3.7.	Tolerancias de Alíneación Angular	89
3.3.7.1.	Alíneación Angular del Lente de Fresnel	89
3.3.7.2.	Alíneación Angular de la Varilla Disipadora	91
3.3.7.3.	Alíneación Angular de la FOP	95
3.4.	Resultados Finales de los Análisis Numérico y Matemático	96
4.	IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA	98
4.1.	Espectro Solar	99
4.1.1.	Espectro Solar Directo	99
4.1.2.	Espectro solar a través del Acrílico	100
4.1.3.	Espectro solar a través del Disipador	101
4.1.4.	Espectro solar a través de la FOP	102
4.2.	Lente de Fresnel	102
4.3.	Fibra Óptica Plástica	103
4.3.1.	Manipulación de la FOP	103
4.3.1.1.	Cortado de Fibras Plásticas	104
4.3.1.2.	Pulido de FOP	104

4.3.2.	Caracterización de la FOP	107
4.4.	Varilla Disipadora de Borosilicato	107
4.5.	Pruebas de Calor	109
4.5.1.	Concentración de Calor en el Foco	109
4.5.2.	Disipación de Calor por medio de Varillas de Borosilicato	110
4.6.	Armado del Sistema	110
4.7.	Pruebas de Iluminación	111
4.7.1.	Variaciones en la Potencia de la Fuente debido al Desplazamiento del Disco Solar	113
5.	CONCLUSIONES	115
5.1.	Recapitulación	115
5.2.	Contribuciones	116
5.2.1.	Contribuciones a la Investigación en México	116
5.2.2.	Construcción del Sistema de Iluminación Natural	116
5.2.2.1.	Caracterización de Componentes	116
5.2.2.2.	Manipulación de Fibra Óptica Plástica	117
5.2.2.3.	Disipación de Calor	117
5.2.2.4.	Acoplamiento de Colector y FOP	117
5.2.3.	Análisis de Tolerancias	117
5.2.3.1.	Lente de Fresnel	117
5.2.3.2.	Disipador de Borosilicato	118
5.2.3.3.	Fibra Óptica Plástica	118
5.3.	Áreas de Oportunidad y Trabajo a Futuro	118
5.3.1.	Áreas de Oportunidad	118
5.3.2.	Trabajo a Futuro	119
A.	MACROS DE ZEMAX[®]	125
A.1.	FresnelFoco1.zpl	125
A.2.	FresnelFoco2.zpl	126
A.3.	Disipador.zpl	126
A.4.	FOPMov.zpl	129
A.5.	FOPMovY.zpl	129
A.6.	TolTiltSource.zpl	130
A.7.	TolTiltSource2.zpl	130
A.8.	PyrexTilt.zpl	131
A.9.	PyrexTilt2.zpl	132
A.10.	PyrexTilt3.zpl	132
A.11.	FOPTilt.zpl	133

LISTA DE TABLAS

1.1.	Sistemas existentes de Iluminación Solar	9
1.1.	Continuación de Sistemas de Iluminación Solar	10
1.1.	Continuación de Sistemas de Iluminación Solar	11
1.2.	Subsistemas de colección Solar	11
1.2.	Continuación de Subsistemas de colección Solar	12
1.3.	Subsistemas de distribución Solar	13
1.4.	Subsistemas de extracción Solar	14
2.1.	Cantidades fotométricas fundamentales	25
2.1.	Cantidades Fotométricas fundamentales	26
2.2.	Procesos de la energía radiante incidente	32
2.3.	Tipos de Colectores basados en Superficies Reflejantes	45
3.1.	Apertura Numérica de los componentes del sistema óptico.	66
3.2.	Dimensiones de varillas de borosilicato y su potencia colectada.	83
4.1.	Análisis de la capacidad de los distintos disipadores para transmitir luz.	109

LISTA DE FIGURAS

1.1. Evolución de las lámparas eléctricas	3
1.2. Esquema básico del funcionamiento de los tubos de luz	5
1.3. Primer diseño de sistemas de iluminación solar, Duguay 1977	6
1.4. Prototipo de Fraas, 1983	7
1.5. Primer prototipo de Oak Ridge National Laboratory	8
1.6. Comparativa de usos de energía solar	9
2.1. Espectro Electromagnético	21
2.2. Ángulo Sólido	23
2.3. Respuestas de Visión Humana	24
2.4. Esquema Tierra – Sol	28
2.5. Distribución Espectral Solar	29
2.6. Estándar CIE D65	29
2.7. Radiación solar en México	30
2.8. Radiación incidente sobre materiales	32
2.9. Ley de Reflexión	38
2.10. Ley de Snell	38
2.11. Refracción y Reflexión según los ángulos de incidencia	39
2.12. Secciones Cónicas	41
2.13. Apertura Numérica en lentes.	43
2.14. Lente de Fresnel	48
2.15. Representación pictórica de la construcción de un lente de Fresnel.	48
2.16. Transmitancia del Acrílico	49
2.17. Apertura Numérica en guías de luz.	52
2.18. Fibra Óptica.	53
2.19. Pérdidas en FOP de PMMA.	55
3.1. Arreglo experimental propuesto.	59
3.2. Sistema Óptico Simple.	63
3.3. Problema de falta de acoplamiento entre los NA del lente de Fresnel y la FOP.	65
3.4. Flujo incidente y flujo de salida de la varilla disipadora.	66
3.5. Dimensiones posibles de un lente de Fresnel para ser compatible con la FOP.	67
3.6. Lentes normales equivalentes al lente de Fresnel	69

3.7. Arreglo experimental Fuente - Lente de Fresnel.	72
3.8. Arreglo experimental para simulaciones de optimización del foco.	75
3.9. Vistas del detector para la optimización del foco.	76
3.10. Ancho de la mancha focal con respecto a la distancia entre el detector y el lente de Fresnel.	78
3.11. Potencia colectada con respecto a la distancia entre el detector y el lente de Fresnel.	78
3.12. Arreglo y vistas del detector usados para la caracterización de la densidad de potencia del lente de Fresnel.	80
3.13. Arreglo que incluye la fuente, la lente de Fresnel y el disipador.	81
3.14. Flujo de radiación a lo largo del disipador de vidrio.	82
3.15. Tolerancia espacial en 'z' de los diferentes disipadores.	83
3.16. Tolerancia espacial en 'y' de los diferentes disipadores.	84
3.17. Caracterización de la salida de las varillas de borosilicato.	85
3.18. Arreglo completo.	86
3.19. Análisis de tolerancias espaciales de la FOP en el eje 'z'.	87
3.20. Análisis de tolerancias espaciales de la FOP en el eje 'y'.	88
3.21. Caracterización de la salida del sistema sin desalineaciones.	88
3.22. Arreglo experimental para el estudio de desalineaciones angulares.	90
3.23. Desviaciones de la mancha focal por desalineamiento de la fuente y el lente de Fresnel.	91
3.24. Potencia captada a la salida del Sistema por desalineamiento de la fuente y el lente de Fresnel.	92
3.25. Potencia captada a la salida del Sistema por desalineamiento de la fuente y el lente de Fresnel.	92
3.26. Incremento del ángulo de salida de la radiación proveniente del disipador debido a la desalineación angular del mismo.	93
3.27. Potencia de salida respecto a la desalineación angular del disipador manteniendo la FOP alineada al eje axial.	94
3.28. Potencia de salida respecto a la desalineación angular del disipador manteniendo la FOP alineada al disipador.	94
3.29. Potencia de salida respecto a la desalineación angular de la FOP.	95
3.30. Resumen de los resultados de los análisis numérico y matemático en el sistema.	96
4.1. Espectro Solar en Monterrey en el mes de Octubre del año 2013 y su comparativa con la fuente D65 de la CIE.	99
4.2. Espectro Solar filtrado por el acrílico.	100
4.3. Espectro Solar filtrado por el borosilicato.	101
4.4. Espectro Solar filtrado por la FOP.	102
4.5. Lente de Fresnel del Sistema propuesto.	103
4.6. Fibra Plástica sin tratamiento de pulido.	104
4.7. Técnicas para el cortado de la FOP.	105
4.8. Resultados paso a paso del proceso de pulido de la FOP.	106
4.9. Caras de la FOP y salida de la misma después del proceso de corte y pulido.	106

4.10. Prueba para conocer el semi cono de aceptación de la FOP.	107
4.11. Arreglo para caracterización de disipadores.	108
4.12. Distintas varillas disipadoras de borosilicato.	108
4.13. Arreglo usado para medir el calor concentrado en el foco y a la salida de los disipadores.	110
4.14. Resultados de las mediciones de disipación de calor de los disipadores.	111
4.15. Sistema de Iluminación Solar de Interiores Propuesto.	112
4.16. Salida final del sistema.	112
4.17. Gráfica de la densidad de potencia lumínica según la distancia entre el detector y la FOP.	113
4.18. Comparativa entre el Sistema de Iluminación Natural y un Foco Dicroico.	113
4.19. Desplazamiento del foco del lente de Fresnel en un lapso de 30 minutos.	114

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido al creciente deterioro de nuestro planeta, se ha vuelto de suma importancia la implementación de procesos más eficientes, el uso de productos más amigables con el medio ambiente, la reducción en la explotación de recursos naturales no renovables, la introducción de fuentes alternativas de energías y la disminución de la generación de contaminantes derivados de las actividades del hombre; todo con el fin de ayudar al planeta Tierra. De lo anterior resalta un factor que, a pesar de no ser fácilmente perceptible, tiene un importante impacto ambiental: los sistemas de iluminación [1, 2, 10, 11, 15, 17, 19, 21, 23, 26, 30, 34, 43].

Un estudio realizado en 2002 reveló que en el año de 1997 la producción mundial de electricidad para fines de iluminación fue de 2016 TWh, esta cifra se torna alarmante si se analiza que es el equivalente a la producción total anual de 1000 plantas eléctricas grandes y representa un gasto de \$230 billones de dólares estadounidenses. Sin embargo, el mayor impacto del consumo de electricidad para iluminación no es el económico, sino el ambiental; ya que el gran consumo previamente mencionado genera alrededor de 1775 millones de toneladas de bióxido de carbono CO_2 [1].

A nivel nacional cabe destacar que según la Secretaría de Energía y la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), el consumo de energía eléctrica para propósitos de iluminación consiste alrededor del 18 % del consumo en México, dicha cantidad resulta mayor que el porcentaje a nivel mundial que se sitúa en aproximadamente un 15 % [15, 19, 21, 23, 26].

Además de lo ya mencionado, es importante resaltar que el 86 % de la energía proviene de combustibles fósiles, por lo cual se tiene como impactos negativos directos lo siguiente [1, 10, 16]:

- Al ser los combustibles fósiles recursos no renovables, estamos provocando que su stock disminuya considerablemente por gastos en iluminación.
- Se genera contaminación del aire provocada por las centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles para generar electricidad.
- Existe una contribución al efecto invernadero debido a la generación de dióxido de carbono (CO_2).
- Debido a que algunas centrales térmicas emplean cuerpos de agua en su ciclo de refrigeración se produce contaminación del agua y contaminación térmica.

Por otro lado, cuando se usan fuentes renovables para generar energía eléctrica, específicamente en el caso de las centrales hidroeléctricas y las centrales térmicas nucleares también existe alteración en los ecosistemas y contaminación de diversos tipos [10, 16].

1.1. Sistemas de Iluminación Sustentable

El calentamiento global ha hecho que el desarrollo de fuentes de energía alternativas se convierta en un foco de atención mundial, una de las fuentes que a captado particular atención es la energía solar; además, con el objetivo de reducir los impactos negativos generados por el consumo de energía por concepto de iluminación, día a día se mejoran y desarrollan técnicas alternativas para los sistemas de iluminación y se buscan otras fuentes de energía diferentes a los combustibles fósiles [16, 64]. En Europa, por ejemplo, se trabaja en disminuir el promedio de $21 \frac{kWh}{m^2}$ por año que se gasta en edificios comerciales a solo $10 \frac{kWh}{m^2}$ por año, lo anterior se pretende por medio de la mejora de sus lámparas, balastos y luminarias, así como por el empleo de técnicas de iluminación natural como apoyo [19]. Es importante resaltar que: si bien es fundamental el ahorro energético, el objetivo del desarrollo de estrategias de iluminación eficiente está orientado a la obtención del mayor nivel de iluminación, acorde a las necesidades visuales de los ocupantes y a los estándares establecidos, para la realización de tareas determinadas con el mínimo consumo energético [11, 26].

El desarrollo tecnológico ha permitido un amplio avance en el desarrollo y producción de lámparas cada vez más eficientes y con diversas características que se ajustan según las necesidades de implementación. Comenzando con las bombillas con filamento incandescente, pasando por las lámparas fluorescentes hasta llegar a los LED (Light Emission Diode) podemos encontrar miles de lámparas diferentes que poseen diversos sistemas para lograr su función principal: iluminar. Estas lámparas a su vez poseen distintos valores de eficiencia los cuales pueden ser vistos en la Figura 1.1 [10, 11, 16, 26]. En esta figura se puede observar la poca eficiencia de las lámparas incandescentes y halógenas en comparación con las demás, así como también se distingue con facilidad el gran avance que han tenido las lámparas LED.

Observando las diversas lámparas existentes en el mercado sobresalen con facilidad las lámparas LED, debido a que poseen una gran eficiencia y se caracterizan por una gran vida útil. Los LED (diodos emisores de luz) son dispositivos semiconductores que emiten luz incoherente de espectro reducido cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica, al ocurrir esto, las cargas positivas y negativas se combinan en la unión PN produciendo fotones [11, 16].

Los niveles de eficiencia y confiabilidad alcanzados por los LED hoy en día están muy por encima de las fuentes tradicionales, las lámparas LED pueden llegar a ser del orden de un 50% a un 90% más eficientes que una lámpara incandescente típica. Sin embargo, existen problemas relacionados con esta tecnología [11, 16, 58, 63]:

- Aún se trabaja en el diseño de luminarias (internas o externas) que apoyen con la distribución uniforme de la luz emitida por el LED
- Se requiere combatir problemas de acumulación de calor en las luminarias LED

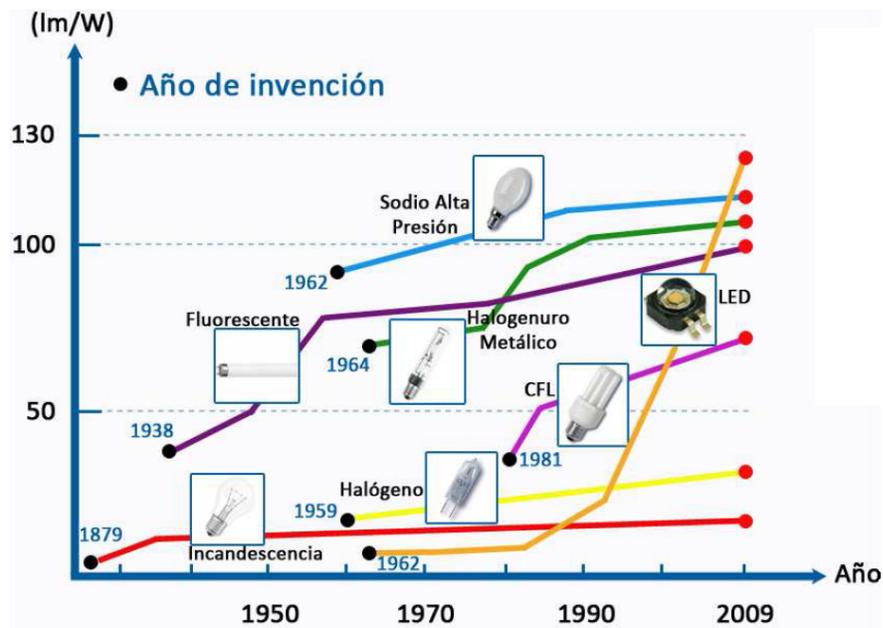


Figura 1.1: Evolución de las lámparas desde la invención de la bombilla [11].

- Su fabricación involucra el uso de diversas sustancias químicas que pueden representar riesgos a la salud o al medio ambiente
- Las lámparas LED se caracterizan por poseer una menor capacidad de la que tienen las lámparas incandescentes de reproducir fielmente los colores de los objetos
- A pesar de su eficiencia, dado su costo, representan una tecnología con una inversión inicial alta y por lo tanto de difícil acceso.

Además de los distintos tipos de lámparas ya mencionados, se han incorporado otras técnicas para la iluminación que van desde la utilización de tragaluces y aplicación de técnicas de arquitectura sustentable, hasta nuevos sistemas basados en la captación de la luz del Sol en el interior de edificaciones por medio de dispositivos ópticos, en esta última clasificación destacan los tubos de luz y los colectores solares [16, 26].

La combinación de la luz natural, proveniente del Sol, con el uso de la tecnología actualmente disponible de iluminación artificial eficiente, conocida por su término en inglés como ‘daylighting’ ha sido reconocida como un recurso útil de ahorro de energía [16, 44]. Además de los ahorros energéticos y económicos generados de la implementación de técnicas de iluminación natural, esta tecnología ha tomado importancia dado a que es considerada como un mejor recurso de luz debido a que, por su buena reproducción de colores y su calidad, es la fuente de luz que más se acerca a la respuesta de visión humana [44]. Además, diversos estudios revelan que una buena iluminación natural puede mejorar el desempeño, productividad y salud de los ocupantes de un inmueble. [43, 44].

La técnica de ‘daylighting’ es el diseño de edificaciones que emplean la luz del Sol como fuente de iluminación de interiores, la energía no se ahorra haciendo uso de ella, sino que se ahorra al implementar mecanismos de regulación de intensidad, así como con apagado y encendido automático de la luz eléctrica que no es necesaria gracias a la iluminación natural. Es por ello que los arquitectos y diseñadores se apoyan del uso de tragaluces, ventanas, apantallamientos, superficies reflejantes, posicionamiento geográfico estratégico y otras técnicas sumadas a una buena instalación eléctrica de la iluminación artificial que regule de manera automática el uso de la electricidad para lograr que una edificación cuente con niveles adecuados de iluminación y, a la vez, logre un ahorro energético [19, 43, 44]. Sin embargo, los edificios que incorporan esquemas de iluminación natural no son muy populares en algunos países dado a la ausencia de datos que indiquen los ahorros actuales de energía y las implicaciones en el diseño [44].

Derivado del uso de técnicas de iluminación natural y buscando un ahorro energético y el aprovechamiento de los beneficios ya mencionados, nace otra técnica de iluminación sustentable: los tubos de luz, mejor conocidos por su nombre en inglés ‘light pipes’. Estos tubos de luz basan su funcionamiento en un simple concepto óptico: la reflexión total interna; explicado de manera más detallada podemos mencionar que dichos sistemas se encargan de captar la luz del Sol al interior de un ducto; la captación de la luz se puede realizar por diversos medios ópticos como paneles o domos, siendo los últimos los más utilizados; posteriormente la luz se refleja por los tubos hasta llegar a su destino, donde es dispersada por medio de una luminaria (Ver figura 1.2). SOLATUBE, entre otras empresas, ha logrado comercializar con éxito este simple concepto, ofreciendo un mecanismo de iluminación pasivo que permite potenciales ahorros energéticos y trae consigo los beneficios de la luz natural, pero que a su vez posee las desventajas de tener un alto costo y no ser muy eficiente, dado que por su tamaño y la poca longitud que pueden tener sus ductos no puede ser usado en áreas muy alejadas del techo y, que además, se caracteriza por tener muy poca estética [25, 60, 70].

Otra importante alternativa para la iluminación sustentable, la cual es el centro de estudio de la presente investigación, consiste en coleccionar y concentrar la luz del Sol para emplearla directamente con fines de iluminación. Estos sistemas emplean colectores solares que dirigen la luz concentrada a guías de onda que la distribuyen al interior de las edificaciones. En la siguiente sección entraremos más a detalle en el estado del arte de dicha tecnología y mostraremos sus ventajas y áreas de oportunidad. Además se mostrará una comparativa entre el proceso de emplear la luz del Sol directamente para iluminar el interior de una edificación y su uso indirecto, es decir el empleo de la radiación solar para alimentar celdas solares que posteriormente alimentarán lámparas eléctricas.

Los usos directos de la iluminación solar con fines de iluminación representan una buena alternativa para las edificaciones durante el día, sin embargo, durante las noches o cuando las condiciones climatológicas no favorezcan la captación solar debe de emplearse la iluminación convencional. Existen diversos sistemas de iluminación natural que han introducido a sus esquemas de funcionamiento sistemas para detectar la cantidad de iluminación existente y, así, hacer funcionar lámparas eléctricas, como las lámparas LED, cuando la luz del Sol no es suficiente. Esta clase de sistemas son conocidos como sistemas de iluminación híbrida [2, 24, 29, 48, 60, 64].

Si bien existen diversas alternativas para la iluminación sostenible, entre las que destacan las ya mencionadas, en nuestro país las alternativas no son muchas, actualmente la SENER y la CONUEE están centrando sus esfuerzos en un plan de ahorro energético concentrado en el cambio de las bom-



Figura 1.2: Esquema básico del funcionamiento de los tubos de luz [60].

billas incandescentes a ahorradoras, la implementación de un sistema de alumbrado público basado en luminarias LED y celdas solares, así como en la introducción del uso de fuentes renovables para la cogeneración de energía [15, 17, 23]. Además de eso existen compañías como SOLATUBE que están siendo introducidas en el mercado nacional gracias a empresas comercializadoras como Everlux [25]. Sin embargo, los sistemas de iluminación sustentable basados en colectores solares y fibras ópticas son una tecnología que no ha sido introducida al mercado mexicano y casi no ha sido investigada por nuestros científicos, esto convierte a la mencionada tecnología en un gran nicho de oportunidad científica, tecnológica, comercial y sustentable.

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Antecedentes

El siglo XX representó una gran evolución en la manera en que se ha aprovechado al Sol como un recurso energético. A principios de este siglo, el Sol era la fuente primaria de iluminación de interiores durante el día. Eventualmente, gracias al avance de la tecnología, la iluminación artificial fue predominando, logrando así que la dependencia que tenían los edificios de la luz del Sol fuera mínima. Durante la crisis del petróleo de la década de los 70s surgió la necesidad de buscar nuevas fuentes energéticas, renovándose así el interés en el uso de la energía solar. Lo anterior sirvió de

pauta para comenzar la investigación en dicha rama teniendo como resultados diversos avances en 'daylighting', calentadores de agua solares, energía fotovoltaica, entre otros [48].

Durante las décadas de los 70s, 80s y 90s se tuvieron diversos intentos de emplear la radiación solar como una fuente de iluminación directa por medio del uso de domos, colectores de lentes de Fresnel, tubos de luz y fibras ópticas, sin embargo la mayoría de los prototipos diseñados se encontraban plagados de pérdidas en los sistemas de colección y distribución, hacían un uso inefectivo de la radiación no visible del Sol y se veían afectados por numerosas filtraciones en la integración de estos sistemas con los sistemas de iluminación eléctricos requeridos para complementar la iluminación solar en días nublados y en la noche [48].

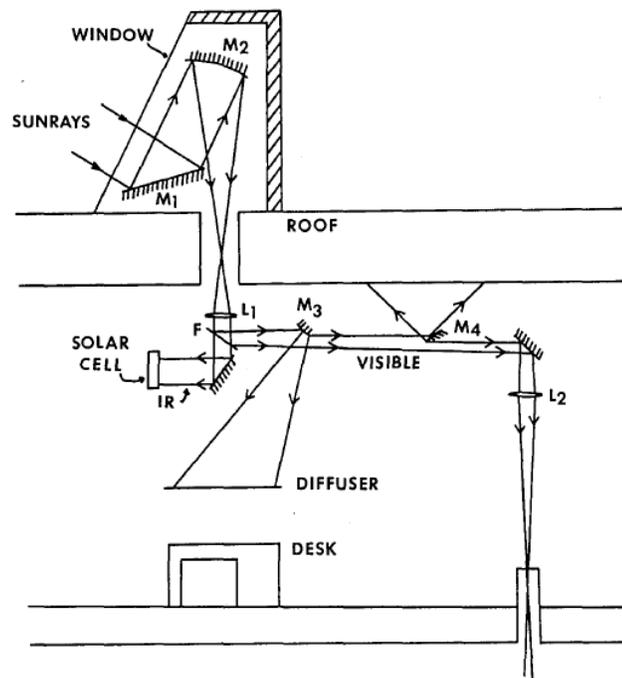


Figura 1.3: Uno de los primeros sistemas de iluminación Solar que empleaba un complejo arreglo óptico para distribuir la luz al interior [21]

Entre los diversos intentos previos, se encuentra en la literatura uno de los primeros sistemas de este tipo reportados en el año de 1977, donde se hacía uso de un colector conformado por una ventana y un heliostato que enviaba la luz colectada a un arreglo óptico, el arreglo hacia viajar la luz por el aire siendo enfocada y distribuida con la ayuda de lentes y divisores de luz (Fig. 1.3). Si bien este sistema no fue del todo eficiente, logró ser un parteaguas que permitió mostrar que la iluminación por medio de la luz del Sol era una alternativa viable esperando ser desarrollada y perfeccionada [21].

A partir del trabajo ya citado se derivaron muchos más, la mayoría siguiendo el mismo esquema de funcionamiento: seguir al Sol y coleccionar la luz para después distribuirla al usuario final; sin embargo, uno de los cambios sustanciales que se observó fue la introducción de una guía de onda que permitiera distribuir la luz de una manera más fácil y eficiente, siendo las fibras ópticas la opción más empleada (Fig. 1.4) [30].

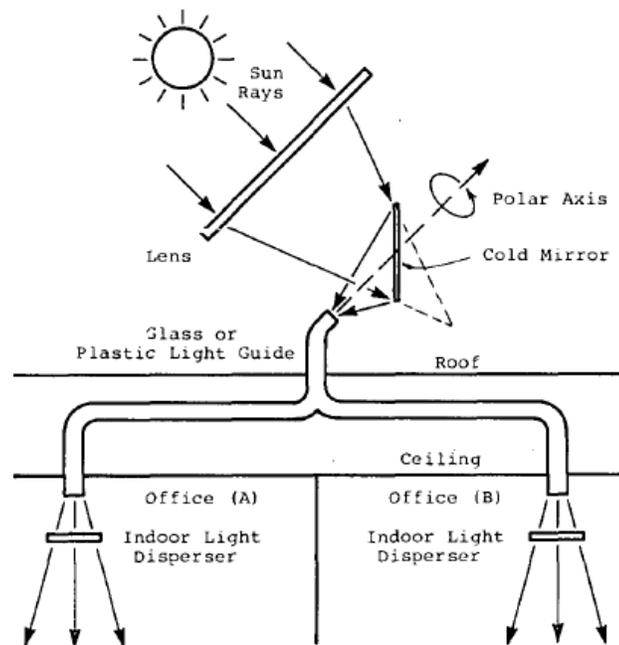


Figura 1.4: Sistema de iluminación Solar diseñado en 1983, el cual emplea guías de onda plásticas o de vidrio para la distribución de la luz. [30]

En 1999, gracias al trabajo de investigadores en el Oak Ridge National Laboratory, surge la posibilidad de implementar una nueva tecnología híbrida de iluminación solar que prometía doblar la eficiencia y el coste de la implementación de energía solar en edificios comerciales, así como eliminar muchos de los atributos negativos de las estrategias existentes de iluminación natural [48]. En la figura 1.5 se observa el diseño de uno de los primeros sistemas híbridos que se encargaba de separar la luz del Sol en sus componentes visible e IR-UV para emplear la fracción visible como iluminación directa y la porción restante con fines de generar electricidad o calentar agua [2].

A partir de los trabajos del Oak Ridge National Laboratory y teniendo como base los trabajos de Duguay y Fraas [21, 30, 48] se han desarrollado diversos prototipos como los de Parans, Himawari, o el proyecto Sollektor y, de la misma manera, los centros de investigación y compañías que trabajan en esta área han buscado mejorar la eficiencia de los sistemas con nuevas técnicas de colección, disipación del calor y distribución de la luz [29, 35, 45]. Algunas de estas alternativas serán brevemente descritas en la sección siguiente.

1.2.2. Funcionamiento General

Como se ha mencionado anteriormente los sistemas de iluminación solar basados en colectores solares y sistemas de distribución por medio de guías de onda siguen básicamente el siguiente algoritmo [2, 12, 29, 48, 64]:

1. *Colección y concentración de la porción visible de la luz solar en uno o varios puntos.*
Generalmente se trata de un concentrador o colector solar montado en el techo que posee un

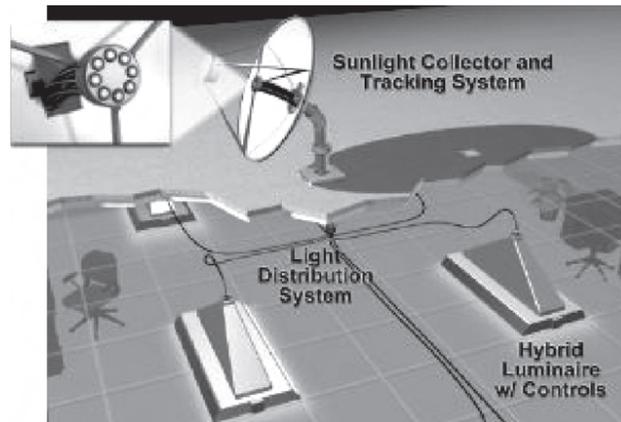


Figura 1.5: Primer sistema de iluminación solar propuesto por los investigadores del Oak Ridge National Laboratory basado en las ideas desarrolladas en décadas anteriores [2].

sistema de seguimiento del Sol.

2. *Distribución de la luz concentrada por medio de guías de onda.* Uno de los medios más comunes para esto es el uso de fibras ópticas.
3. *Entrega de la luz del Sol a las áreas de uso final.* Se emplean sistemas de extracción como difusores, extractores o colimadores.

Si se ponen en comparativa las tecnologías de iluminación solar directa frente al uso de energía fotovoltaica para iluminación se pueden observar de manera clara las ventajas que tiene la primera sobre la segunda. En la figura 1.6 se observa la cantidad de subprocesos que componen ambos sistemas, con esto se logra detectar que existe una mayor pérdida en el sistema fotovoltaico debido a las conversiones de energía y la complejidad del mismo, además de que se sabe que a pesar de los potenciales que tienen lámparas como las LED, el aprovechamiento de la luz del Sol no puede superar la eficiencia de las celdas solares, lo cual no es mayor al 10%, mientras que por iluminación directa, en algunos casos, es posible aprovechar hasta el 50% de la luz del Sol [2, 24, 48, 58].

A continuación se mostrará una tabla comparativa (Tabla 1.1) de diversos sistemas existentes en el mercado que permitirán observar las distintas opciones empleadas hasta el momento, así como sus ventajas y desventajas [29].

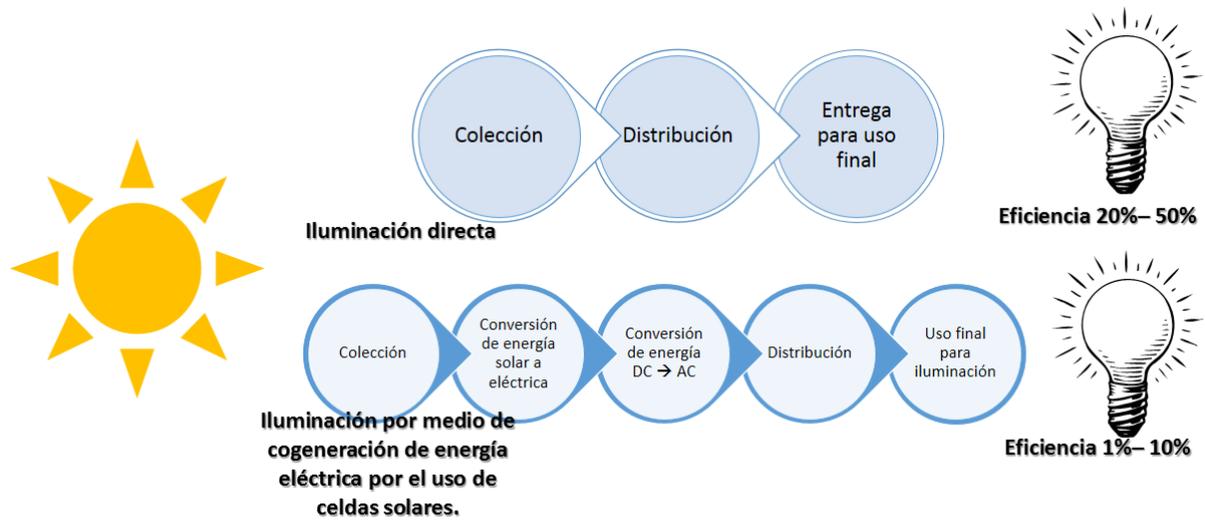


Figura 1.6: Comparativa entre la iluminación solar directa y la iluminación convencional apoyada por energía fotovoltaica [24,48]

Tabla 1.1: Sistemas existentes de Iluminación Solar [29, 35, 45]

Clasificación de sistemas existentes de iluminación solar					
Nombre Comercial	Esquema	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Himawari		Sensor solar, motor de pasos y conjunto de lentes de Fresnel que dirige la luz a través de fibras ópticas. Existen modelos de 6 a 198 lentes.	Máximo aprovechamiento del Sol. Tipología de emisión similar a la de los focos eléctricos	Tecnología y mantenimiento de costo muy elevado. Alto consumo eléctrico.	Espacios interiores, acuarios, iluminación comercial, etc.
Solux		Lente de Fresnel que dirige luz a través de guías con líquido.	Máximo aprovechamiento del Sol. Tipología de emisión similar a la de los focos eléctricos	El líquido se filtra por las guías. En presencia de bajas temperaturas el líquido se congela	German Museum of Technology de Berlín

Tabla 1.1: Continuación de Sistemas de Iluminación Solar

Clasificación de sistemas existentes de iluminación solar Cont.					
Nombre Comercial	Esquema	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Parans		Conjunto de 36 lentes de Fresnel pequeños (65 mm x 65 mm) que dirigen luz a través de fibras ópticas	Máximo aprovechamiento del Sol. Las fibras pueden usarse directamente como fuente de iluminación final.	Para lograr una iluminación adecuada se requieren alrededor de 16 hilos por luminaria.	Iluminación de espacios interiores tanto residencial, como comercial e industrial.
Sungliht Direct		Arreglo de lentes de Fresnel que dirigen luz a través de fibras ópticas con sistema de seguimiento solar por bioreactores	Excelente sistema de seguimiento solar y una buena captación de luz solar.	La fibra no puede superar los 10 metros. Posee un tiempo de vida máximo de 10 años.	Iluminación de espacios interiores tanto residencial, como comercial e industrial.
Sollektor		Arreglo de lentes concentran la luz y le dirigen a través de FOP delgadas	Alta eficiencia. Este sistema evita la concentración de altas temperaturas.	Es un sistema costoso por la gran cantidad de componentes que utiliza. La instalación y el armado son procesos que deben realizarse a mano por su complejidad.	Iluminación de espacios interiores tanto residencial, como comercial e industrial.
Lighttron		Sistema de espejos con motor de pasos que dirige la luz a un punto elegido.	Máximo aprovechamiento del Sol. Ilumina grandes áreas interiores o exteriores.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Alto grado de afectación por el clima.	Aeropuerto de Manchester, Museo Nacional de Corea del Sur.
Kuzelka		Sistema de espejos con motor de pasos que dirige la luz a un punto elegido.	Máximo aprovechamiento del Sol. Ilumina grandes áreas interiores o exteriores.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Alto grado de afectación por el clima.	Edificio de oficinas en el centro de la ciudad de Viena.

Tabla 1.1: Continuación de Sistemas de Iluminación Solar

Clasificación de sistemas existentes de iluminación solar Cont.					
Nombre Comercial	Esquema	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Heliobus		Concentrador parabólico giratorio con forma de cuchara que redirige la luz a un conducto transportador reflexivo	Máximo aprovechamiento del Sol. Rigidez estructural. Buena distribución interior de luz.	Necesidad de mantenimiento de piezas móviles.	Postdam Palace, Berlín. Proyecto piloto en Edificio Escolar, Suiza.

Ahora se analizarán cada una de las tres partes de los sistemas de iluminación solar directa: el colector (Tabla 1.2), el medio de distribución (Tabla 1.3) y el dispositivo extractor (Tabla 1.4). Este análisis se mostrará en las siguientes tablas que explorarán las opciones existentes en el mercado para cada una de las secciones del sistema [29]. Sin embargo es importante destacar que existen más opciones disponibles para cada uno de estos subsistemas.

Tabla 1.2: Subsistemas de colección Solar [29, 35]

Clasificación de subsistemas de colección solar				
Nombre	Descripción	Ventajas	Desventajas	Sistemas asociados
Lente de Fresnel	Se trata de un lente que es obtenido a partir del rebaje con cortes de una lente en anillos circulares consecutivos	Amplifica la potencia de la luz solar. Peso y espesor reducidos.	Alta transmisión de calor. El ángulo de incidencia determina el rendimiento. Movimiento mecánico necesario.	Asociado a sistemas de transmisión por fibra óptica y difusores tipo spot.
Laser cut panel	Panel acrílico con micro cortes colocado entre dos vidrios. Los cortes funcionan como espejos que redireccionan la luz.	Peso y espesor reducidos. Alto rendimiento.	Rendimiento según la profundidad de los cortes y ángulo de incidencia.	Asociado a sistemas de transmisión tipo ducto. Uso en ventanas laterales.
Panel prismático	Panel acrílico moldeado con una cara plana y una cara con prismas o cuñas triangulares	Peso y espesor reducidos. Buen rendimiento. Aprovechamiento de la luz difusa.	Costo de instalación elevado. El ángulo de incidencia solar determina el rendimiento.	Asociado a sistemas de transmisión tipo ducto. Uso en ventanas laterales.

Tabla 1.2: Continuación de Subsistemas de colección Solar

Clasificación de subsistemas de colección solar				
Nombre	Descripción	Ventajas	Desventajas	Sistemas asociados
Micro láminas reflexivas	Láminas transversales y verticales que reflejan la luz incidente. Fabricadas en plástico con metalización de Aluminio.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Exclusión de calor.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. El grado de incidencia solar determina el rendimiento	Asociado a cubiertas anidólicas y sistemas de captación senitales.
Heliostato	Sistema de espejos metálicos que direcciona la luz hacia espacios interiores o abiertos.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Iluminación de grandes áreas.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Generalmente emplean un segundo colector para concentrar y/o distribuir la luz.	Asociado con sistemas de transmisión por sistemas de espejos o con sistemas que emplean otro colector para la concentración de la luz.
Colector parabólico	Estructura de curvatura doble parabólica que concentra la luz captada en distintos puntos según el ángulo de incidencia.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Buena relación costo rendimiento.	Debido a que a mayor superficie, mayor captación también se tiene mayor peso. Acabado de pulido tipo espejo de alto costo.	Asociado a sistemas de captación tipo ducto, fibras ópticas y laterales.
Concentrador anidólico	Sistema de espejos y lentes que concentran la luz elevando el rendimiento de la radiación disponible.	Amplifica la potencia de la luz solar.	Altas exigencias de precisión en la instalación.	Asociado a sistemas de transmisión tipo ducto y fibras ópticas.

Tabla 1.3: Subsistemas de distribución Solar [29, 35]

Clasificación de subsistemas de distribución solar en interiores				
Nombre	Descripción	Ventajas	Desventajas	Sistemas asociados
Fibra óptica	Consiste en varias hebras delgadas de vidrio o plástico con diámetros que van desde unas pocas micras hasta varios centímetros, dichas hebras tienen un revestimiento que rodea y protege el núcleo.	Alto coeficiente de transmitancia. Filtro selectivo de longitudes. En el caso de las de vidrios alta resistencia a temperaturas y pocas pérdidas. En el caso de las plásticas un amplio cono de aceptación y reducción de pérdidas por curvaturas.	Alto costo. Fragilidad del sistema instalado en el caso de fibras de vidrio. En el caso de las plásticas se tiene poca eficiencia.	Asociado a concentradores tipo Fresnel y parabólicos
Guías de luz líquidas	Similares a las fibras ópticas plásticas, pero con su interior relleno de líquido.	Muy bajas pérdidas de transmisión lumínica.	El líquido se filtra por las guías y las bajas temperaturas lo congelan.	Asociado a concentradores tipo lente de Fresnel.
Guías acrílicas sólidas	Prismas o cilindros sólidos de material plástico translucido que transmite la luz por el principio de reflexión total interna.	Alto coeficiente de transmitancia, transmisión de altos flujos de luz según el diámetro. Rigidez estructural.	Dificultad de instalación. Baja resistencia mecánica. Alto costo. Fragilidad del sistema.	Asociado con concentradores tipo lentes de Fresnel.
Ductos reflexivos	Ductos o guías que permiten que la luz viaje en su interior. Existen diversas geometrías y materiales.	Poseen buenos coeficientes de transmitancia y un buen rendimiento de color.	Dificultad en la instalación, pulido y manipulación. Generalmente tienen poca resistencia mecánica.	Asociados con prácticamente todos los tipos de colector.
Sistemas aéreos	Conjunto de lentes o parábolas enfocadas con cierta distancia de separación entre ellos.	Baja intervención arquitectónica para la instalación. Transmite grandes flujos de luz.	Requiere precisión en la orientación de las parábolas para minimizar pérdidas por mal enfoque.	Asociado con concentradores tipo lentes de Fresnel.

Tabla 1.4: Subsistemas de extracción Solar [29]

Clasificación de subsistemas de extracción de luz solar				
Nombre	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Fibra óptica	Consiste en varias hebras delgadas de vidrio o plástico con diámetros que van desde unas pocas micras hasta varios centímetros, dichas hebras tienen un revestimiento que rodea y protege el núcleo.	Posibilidad de aplicaciones tipo spot, líneas de luz periféricas y ramificación de puntos iluminados.	Dificultad para la iluminación de grandes áreas. Alto costo	Residencial, comercial, decoración, publicidad, estetoscopia, iluminación puntal y cultivos vegetales.
Difusores	Pueden ser plásticos, de cristal o metálicos, con diversos acabados como cromados, mate o blancos.	Funciona como una luminaria convencional pero alimentada por luz natural.	Durante periodos de baja iluminación reduce considerablemente el nivel de luz emitida.	Residencial, comercial y grandes ambientes.
Extractores	Sistema de espejos que refleja un porcentaje de la luz incidente, dejando pasar el resto.	Ayuda a mantener niveles de uniformidad en interiores de grandes dimensiones.	Durante periodos de baja iluminación reduce considerablemente el nivel de luz emitida.	Residencial, comercial, grandes ambientes e iluminación en profundidad.

Además de emplear los sistemas mencionados anteriormente para iluminar de manera directa es posible emplear la radiación solar para más de un uso, para lo cual la luz del Sol es separada en diferentes porciones para distintas aplicaciones. La luz visible puede ser usada directamente para iluminar, mientras que la IR puede ser empleada para producir electricidad o generar calor para calentar agua o brindar calefacción. El uso óptimo de los diversos rangos de estas longitudes de onda es fuente de continuos estudios y esfuerzos de mejora [2, 24, 48, 64].

1.2.3. Ventajas

Los sistemas de colección y concentración solar para iluminación directa que distribuyen la luz en el interior de las edificaciones por medio del uso de fibras ópticas destacan por [2, 29, 43]:

- Una reducción significativa en el consumo de energía eléctrica para iluminación, debido a que en las regiones con mayor radiación solar, cuando se tienen días despejados, es posible sustituir el uso de energía eléctrica para iluminación por la luz del Sol.
- Gracias al empleo de fibras ópticas plásticas (FOP) tienen un fácil acceso a diversas zonas de la edificación.

- Se caracterizan por un mayor nivel estético que los tubos de luz.
- Si bien en cierto que en días nublados o por las noches no podrán satisfacer por completo las demandas de iluminación, tienen la capacidad de adaptarse a sistemas de iluminación convencional, conformando así sistemas híbridos.
- Debido a que es removido en gran medida el consumo energético por cuestiones de iluminación, cuando existen las interrupciones energéticas se tendrá una mayor disposición de la energía de respaldo para otras funciones.
- Mejoramiento de la calidad de la iluminación ya que esta proviene de una fuente de luz de amplio espectro que contiene casi en su totalidad la porción visible del espectro EM.
- La luz natural casi no produce calor en el interior de las edificaciones, por lo cual se tiene una reducción de la carga eléctrica destinada a la refrigeración de edificaciones.
- Al consumirse menos energía eléctrica se disminuyen las emisiones de CO_2 y se ayuda a preservar el stock de hidrocarburos.
- La iluminación final producida puede ser empleada de manera directa, a diferencia del caso de las técnicas de iluminación natural donde solo puede ser aprovechada de la manera indirecta.

1.2.4. Beneficios de la Luz Natural en las Personas

Como ya se mencionó el objetivo de la iluminación sustentable es brindar a la edificación los niveles de luz adecuados para el desenvolvimiento de las actividades pertinentes empleando la menor cantidad posible de energía, lo cual es un objetivo alcanzable para los sistemas de iluminación solar, como lo son los sistemas de colectores solares y los tubos de luz, pero además, el uso de la energía solar como una fuente de iluminación directa trae consigo ventajas adicionales al ahorro energético, entre las cuales destacan [22, 43, 53]

- Los ocupantes de la edificación mejorarán su productividad
- Se incrementa la satisfacción en el trabajo
- Se reduce el absentismo, ya que al tener una iluminación de mayor calidad se reducen los malestares como dolor de cabeza, molestias en los ojos, estrés, entre otros.
- Algunas personas asocian la iluminación natural con edificios saludables y ambientes interiores de calidad, lo cual afecta positivamente a la imagen que se tiene de la edificación.
- Los sistemas de iluminación natural distribuyen una luz con el balance adecuado del espectro EM visible, por ejemplo: poseen la parte del espectro visible correspondiente al azul en las cantidades a las que esta adaptado el ser humano, a diferencia de las lámparas incandescentes o ahorradoras que carecen totalmente de ésta o de su contraparte las lámparas LED

que generalmente poseen un exceso de azul que daña a la retina después de una exposición prolongada.

- Se asocia la luz natural con una disminución en la fatiga de los ocupantes del edificio.
- Debido a que los ambientes naturales producen respuestas positivas en nuestro organismo, se logrará una reducción del estrés y la ansiedad, generando con esto una mejora en el humor de las personas.
- Ayuda en diversos procesos biológicos como la producción de vitamina D, regula la pigmentación adecuada de la piel y controla nuestro ritmo circadiano, es decir, nuestro reloj natural interno.
- La luz artificial produce una deficiencia en la secreción de Melatonina, la cual en niveles altos produce somnolencia y problemas emocionales.

Si bien algunas de las ventajas asociadas con la luz natural no han sido corroboradas en su totalidad, si se sabe gracias a estudios y estadísticas que existen mejores efectos en los seres humanos por recibir la luz del Sol, a la cual estamos adaptados por años de evolución, que por recibir la radiación de la iluminación artificial que aún no logra emular el espectro del Sol [22, 30, 43, 53].

Desde la década de los años 70s ya existían estudios acerca de los efectos biológicos negativos derivados del uso de iluminación artificial, la cual no posee un amplio espectro, lo que generará una alteración de las funciones biológicas 'normales' del ser humano [22, 30].

Al final del día, todos los efectos ya mencionados contribuyen con un decremento en el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial necesaria para la implementación de dichas tecnologías [43].

1.2.5. Áreas de Oportunidad

Si bien ya se han mencionado las diversas ventajas de estos sistemas y, además, se han subrayado los beneficios adicionales que se tienen sobre los ocupantes de las edificaciones, también es importante hacer mención de las áreas de oportunidad que aún presenta el diseño e implementación de esta tecnología [29, 48]

- Incrementar la capacidad máxima de transportación de luz de las FOP.
- Remover de manera eficiente la energía térmica residual de las FOP y elementos ópticos secundarios.
- Diseño de los elementos ópticos complementarios que permitan eliminar la necesidad del empleo de sistemas de seguimiento solar y aumenten el acoplamiento entre todos los elementos ópticos del sistema.
- Diseño de sistemas de seguimiento solar más eficientes y de menor costo.
- Asegurar la uniformidad espacial y temporal de la iluminación entregada al usuario final.

- Lograr una reducción en los costos de inversión iniciales de ésta tecnología para hacerla económicamente accesible.

Sin embargo, es probable que éstas áreas de oportunidad para mejorar su eficiencia y reducir sus costos contribuyan a que se conviertan en un área de investigación sumamente interesante para la ciencia y, en especial, para la óptica, que busca mejorar ésta tecnología perfeccionando los componentes ópticos que integran los sistemas de iluminación y logrando un mejor acoplamiento entre los mismos.

1.3. Motivación: Estudio del Acoplamiento de Colectores Solares y Fibras Plásticas

1.3.1. Delimitación del Problema y Alcances

Actualmente se tiene la importante necesidad de implementar nuevas técnicas para reducir el impacto nocivo de las acciones de la humanidad sobre el medio ambiente, por lo cual se pretende optimizar el diseño de los sistemas de iluminación solar de interiores, los cuales, como ya se mencionó en la sección anterior, se caracterizan por su mínimo impacto en el medio ambiente. Para este proceso de optimización se trabajará principalmente en el área de mejorar el acoplamiento de los dispositivos ópticos que son componentes claves en los sistemas de iluminación solar de interiores basados en colectores solares.

Este proyecto de investigación de tesis se centra en modelar y caracterizar los dispositivos ópticos involucrados en sistemas de iluminación basados en colectores solares de Fresnel desde la sección correspondiente al colector, hasta su llegada al sistema de distribución de la iluminación en el interior de las edificaciones, lo anterior con la finalidad de incrementar su eficiencia al mejorar el acoplamiento entre ellos. Dicho problema puede ser dividido para su estudio en los siguientes puntos:

- **Selección del colector.** Si bien la literatura nos ha mostrado que los colectores tipo lente de Fresnel son los más comúnmente utilizados como concentradores de la luz solar con propósitos de iluminación, esta investigación busca identificar las fortalezas y debilidades de los lentes de Fresnel frente a otros concentradores, los cuáles poseen la geometría que ofrece una mayor eficiencia considerando área versus energía solar colectada, para identificar la mejor alternativa para las necesidades de nuestro sistema
- **Disipación del calor.** El colector solar seleccionado nos ayudará a reunir en un área pequeña grandes cantidades de luz, sin embargo, la radiación solar genera calor que debe ser eliminado casi en su totalidad de los sistemas de iluminación. Por lo anterior es necesario el emplear un disipador cilíndrico de algún material que nos permita seguir conduciendo la luz por nuestro sistema pero, a la vez, disminuir las altas temperaturas.
- **Pulido.** Tanto el disipador cilíndrico de calor como la fibra óptica son 2 dispositivos que tendrán la función de ser la guía de onda de la luz colectada, por lo que se debe analizar si

las condiciones de pulido de las entradas y salidas de estos dispositivos son un factor crítico que impacte en la eficiencia del sistema.

- **Tolerancias en el alineamiento.** Es el factor más importante a considerar y punto central del presente trabajo, consiste en analizar es que tan crítico será el papel que jugará la alíneación de los diversos dispositivos dentro de un sistema de colección de luz solar, es decir, qué tanto afecta la precisión del alíneamiento en la salida de luz obtenida en el sistema.

Es importante destacar los puntos que no serán cubiertos dentro de esta investigación:

- Se excluye el estudio del movimiento solar, así como el desarrollo de un sistema de rastreo solar que logre la alíneación del colector solar con el Sol, por lo cual, para los modelados numéricos, las simulaciones y las pruebas experimentales se considerará que los rayos solares llegan en todo momento perpendiculares al colector solar.
- No se incluye el diseño ni la utilización de luminarias, con lo cual se considera que todas las pruebas se realizarán midiendo la salida de luz directamente de la salida de la fibra óptica plástica, sin considerar ningún otro dispositivo final de distribución de la luz.
- En secciones posteriores se realizará un estudio de diversos tipos de colectores, sin embargo solo se estudiarán colectores de superficies reflejantes o lentes, se excluyen colectores fotoluminiscentes o prismáticos ya que exceden las áreas de estudio delimitadas para esta tesis.

1.3.2. Estudios Previos

Como se observó en los antecedentes de la sección anterior los sistemas de iluminación natural de interiores basados en colectores solares y fibras ópticas plásticas que se han desarrollado hasta la fecha han mostrado constantes cambios en su diseño y los dispositivos empleados, en su mayoría utilizaban colectores parabólicos que fueron paulatinamente reemplazados por lentes de Fresnel.

Además, se caracterizan por el uso de técnicas muy precisas y sofisticadas de seguimiento solar, donde destaca el caso de Sunlight Direct, quienes usan sistemas de biomasa que son alimentados de la luz del Sol para efectuar el seguimiento.

En el área de la disipación del calor, sólo es conocido el hecho de que emplean acopladores cilíndricos de cuarzo, sin embargo se desconocen sus dimensiones y, en la mayoría de los casos, el posicionamiento exacto del dispositivo dentro del sistema. También se sabe que sistemas de iluminación como el de Sunlight Direct y el de PARANS usan arreglos de los llamados “espejos frío” y “espejos caliente”, o hot y cold mirrors por sus nombres en inglés, para el bloqueo de los rayos UV e IR.

Por último, es importante mencionar que casi no se encuentra disponible en la literatura información concerniente a las tolerancias de la alíneación de los dispositivos ópticos del sistema, ni la importancia que tiene el pulido de las superficies del disipador ni de la fibra óptica plástica.

1.3.3. Motivación

La necesidad de lograr una iluminación natural de interiores que sea lo suficientemente efectiva como para no sacrificar el confort de los usuarios de una edificación, pero que a su vez consuma el mínimo de energía eléctrica posible, es un problema de vital importancia para apoyar al cuidado de nuestro planeta. Haciendo una búsqueda en la literatura referente a sistemas de iluminación solar de interiores se encuentra el hecho de que los sistemas desarrollados actualmente tienen la característica de ser muy costosos debido a sus sofisticados sistemas de seguimiento solar y/o a la complejidad de sus componentes. Además analizando el mercado de nuestro país observamos que no existe desarrollo de este tipo de sistemas a nivel nacional. Otro factor de motivación importante es el deseo de aprovechar las ventajas geográficas que se tienen en nuestro país, ya que por estar muy cerca del Ecuador contamos con mayor cantidad de horas de luz al día, la velocidad de desplazamiento del disco Solar es menor que en áreas cercanas a los polos y nuestro país, más específicamente nuestro estado, Nuevo León, se encuentra en una zona de radiación solar alta.

Con base a esta investigación, se busca el diseño y desarrollo de sistemas de iluminación natural a nivel nacional que cumplan con la características de ser de menor costo que los otros sistemas en el mercado mundial. Se sabe además, que los sistemas de iluminación natural que han logrado una mayor eficiencia se basan en el uso de colectores tipo lente de Fresnel y, a su vez, emplean fibras ópticas plásticas como medio de distribución de la luz solar captada al interior de las edificaciones. Sin embargo, aún no ha madurado el desarrollo de esta tecnología para hacerla más viable en relación a su costo, por ejemplo, dichos sistemas presentan una gran eficiencia al coleccionar la luz solar aunque presenta tolerancias muy bajas respecto a la alineación, por lo cual requieren sistemas de rastreo solar más avanzados lo cual incrementa considerablemente su costo. Es por ello que se busca mejorar el acoplamiento de los componentes ópticos del sistema para aumentar sus tolerancias de alineamiento manteniendo siempre las pérdidas de luz a un nivel razonable. Esto contribuirá al perfeccionamiento de estas nuevas tecnologías de iluminación sustentables para que sean accesibles y acordes a la realidad de nuestro País.

Además de lo anterior, otro punto importante es que al revisar la literatura resulta difícil encontrar fuentes que nos permitan hacer un análisis completo de esta clase de sistemas, por lo cual se considera de suma importancia la realización de un documento que sirva como apoyo en el diseño y dimensionamiento de sistemas de iluminación natural que sirva de base para futuros proyectos que busquen incrementar la eficiencia o disminuir el costo de los mismos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo contiene los conceptos fundamentales de Radiometría, Fotometría, Óptica geométrica y Óptica Anidólica, los cuales juegan un papel fundamental para conocer el comportamiento de la luz que ingresa a nuestro sistema de captación Solar, desde el momento de su colección hasta su salida de la fibra óptica.

2.1. Radiometría y Radiación Solar

El Sol irradia energía a nuestro planeta, es por eso que para lograr hacer un correcto estudio sobre sistemas de iluminación natural es necesario conocer las características básicas de esta radiación y como ésta es detectada. Para ello se desbribirán brevemente algunos conceptos de Radiometría y Fotometría que son utilizados para analizar la radiación del Sol.

2.1.1. Radiometría

La Radiometría hace referencia a la medición de la energía radiante óptica [51], en otras palabras la Radiometría es la medición del contenido de energía de los campos de radiación óptica electromagnética y la determinación de cómo esta energía se transfiere de una fuente, a través de un medio, y a un detector [8]. Por lo cual emplearemos esta ciencia para hacer acercamientos teóricos sobre la cantidad de radiación óptica que es generada, transmitida y detectada desde el Sol hasta la salida de la fibra óptica [33, 69], considerando un sistema de colección solar por medio de lentes de Fresnel y fibras ópticas plásticas.

Es importante destacar que para el correcto empleo de la Radiometría se deben conocer las bases que la sustentan, y una de ellas es asumir que la propagación de la radiación óptica se estudia a partir de las leyes de óptica geométrica, por esto no es posible aplicar las leyes de la Radiometría en los casos donde los efectos de interferencia o difracción son predominantes [9].

2.1.1.1. Espectro Electromagnético

Para hacer referencia a la radiación óptica es necesario hacer referencia al espectro electromagnético (Fig. 2.1), el cual tiene su porción óptica en el rango de longitudes de onda desde 10 nm a 1000 μm [51]. Dicho rango incluye [33]:

- **Radiación UVC, UVB y UVA** → 200 nm - 400 nm
- **Espectro Visible** → 360 nm - 780 nm
- **Infrarrojo cercano** → 0.780 μm - 1.1 μm
- **IR de onda corta** → 1.1 μm - 2.5 μm
- **IR de onda media** → 2.5 μm - 7 μm
- **IR de onda larga** → 7 μm - 15 μm

Es importante aclarar que la radiación fuera de la porción visible del espectro no es llamada 'luz', dado a que el rango del espectro visible esta entre los 360 nm y los 780 nm, siendo esta sección del espectro la que es perceptible para el ojo humano [33,69].

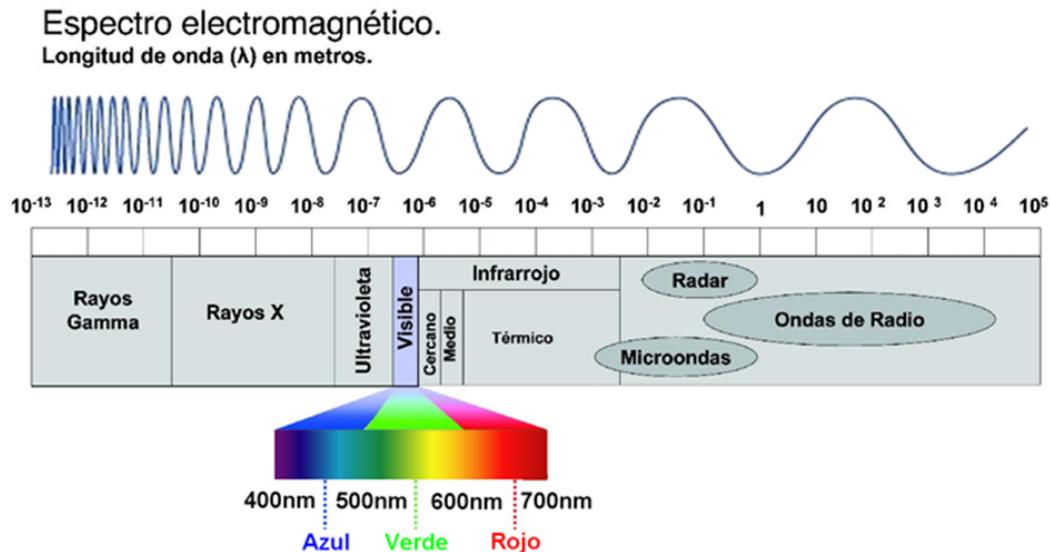


Figura 2.1: Espectro Electromagnético con su clasificación según la longitud de onda [6]

2.1.1.2. Tipos de Radiación

La radiación óptica puede ser clasificada en [9]:

- Coherente
- Incoherente

El problema tradicional de la Radiometría consiste en el estudio de la radiación óptica incoherente, mientras que la radiación coherente puede ser estudiada desde el punto de vista electromagnético empleando las Ecuaciones de Maxwell. De hecho, las leyes tradicionales de la Radiometría se sustentan en la asunción de la incoherencia de la fuente [9].

Complementando lo anterior, se define una fuente de radiación **incoherente** como aquella que no posee coherencia. Existen dos tipos de coherencia [9, 36]:

- **Coherencia Espacial.** Un emisor la posee si el desfase que hay entre dos puntos separados espacialmente entre sí situados sobre un mismo frente de onda del emisor se mantiene constante con el tiempo.
- **Coherencia Temporal.** Existe cuando el desfase que hay en un punto del frente de onda para dos instantes de tiempo diferentes se mantiene constante, esto implica que la onda oscila a una sola frecuencia, es decir, que la onda es monocromática.

2.1.1.3. Cantidades Radiométricas Fundamentales

Energía radiante. Se denomina por el símbolo Q , tiene como unidad fundamental el Joule (J) y es definida como la energía total contenida en un campo de radiación o como la energía total entregada a un receptor por un campo de radiación.

Además, se tiene que la densidad de energía u se define como:

$$u = \frac{dQ}{dV} \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (2.1)$$

donde dQ es la energía radiante contenida en un elemento diferencial de volumen (dV) de la radiación del campo.

Por otro lado, el flujo radiante Φ , el cual es equivalente a la potencia P , se define como:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} [Watts] \quad (2.2)$$

Otro concepto importante y altamente ligado a la potencia es el **flujo radiante espectral** Φ_λ , el cual podemos definir como el flujo radiante a una longitud de onda *específica* [9, 33, 51, 69]:

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (2.3)$$

A continuación se describirán algunos conceptos derivados de la energía radiante, la densidad radiante y la potencia.

Excitancia Radiante (M). Se define como el flujo de energía por unidad de área saliendo de la fuente:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.4)$$

Incidancia Radiante (E). Es la potencia que entra a un detector por unidad de área:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

La diferencia principal entre la excitancia y la irradiancia radica en la referencia que se tome, es decir, en el caso de la excitancia la referencia esta sobre la fuente y no se considera la posición del receptor, mientras que en el caso de la irradiancia es lo opuesto [9].

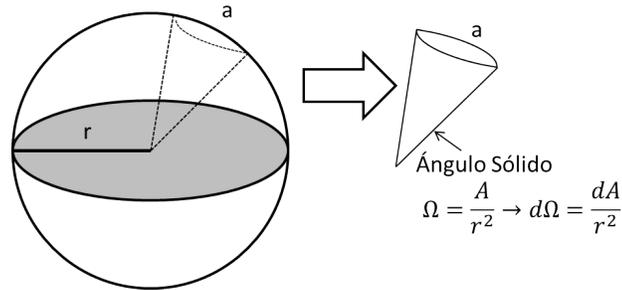


Figura 2.2: Ángulo sólido comprendido por el área a y el radio r de la esfera.

Radiancia (L). También conocida como brillantez o intensidad específica. Se define como el flujo de energía por unidad de área proyectada por unidad de ángulo sólido (ver Fig. 2.2) que sale de la fuente entera en un mismo diferencial de cono de luz:

$$L = \frac{dE}{d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{dA_{proj}d\Omega} \left[\frac{W}{m^2 Sr} \right] \quad (2.6)$$

donde el área proyectada es $dA_{proj} = dA \cos\theta$ y θ es el ángulo normal externo del elemento diferencial de área dA y la dirección de observación, además $d\Omega$ es el diferencial de ángulo sólido con que la fuente puntual ve al elemento de área dA del receptor, es decir, $d\Omega = \frac{dA \cos\theta}{r^2}$ [9, 33, 51, 69].

La intensidad radiante (I) . Se define como el flujo por unidad de ángulo sólido emitido por una fuente completa en una dirección dada, por lo que se puede expresar como [9]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \left[\frac{W}{Sr} \right] \quad (2.7)$$

Así como el flujo radiante tiene su correspondiente análogo en la Radiometría espectral, las otras cantidades básicas radiométricas también poseen sus análogos, los cuales tienen las mismas definiciones que en Radiometría pero corresponden a una longitud de onda específica [7, 9, 33, 69].

2.1.2. Fotometría

Si bien la Radiometría resulta importante para esta investigación, también es necesario considerar la Fotometría y conocer las cantidades fundamentales vinculadas con la misma, dado a que la Fotometría hace referencia a la porción del espectro visible, la luz, y a cómo reacciona el ojo humano con ésta. Por lo tanto, es posible concluir que la salida de la fibra se encontrará relacionada con las cantidades fotométricas, y son estas mismas las correspondientes a los conceptos básicos de iluminación.

La **Fotometría** es el estudio de la radiación óptica únicamente en la porción de la misma que es perceptible al ojo humano, de hecho, para el cálculo de sus cantidades fundamentales se involucra la respuesta visual [9].

2.1.2.1. Visión Humana

La respuesta espectral del ojo está confinada a una región específica del espectro electromagnético: la porción visible, también llamada luz [9, 33].

El sistema visual humano está adaptado a 2 rangos de iluminación o niveles de luminancia, por un lado está el **rango de visión fotópica** o adaptación a la luz. El otro rango corresponde a la adaptación del ojo humano a la oscuridad, el cual corresponde con el **rango de visión escotópica**. Además, existe un nivel intermedio en el cual el sistema visual está adaptado a un nivel de luminancia entre estos 2 rangos, dicho nivel intermedio es llamado **rango de visión mesópica** (Fig. 2.3) [9].

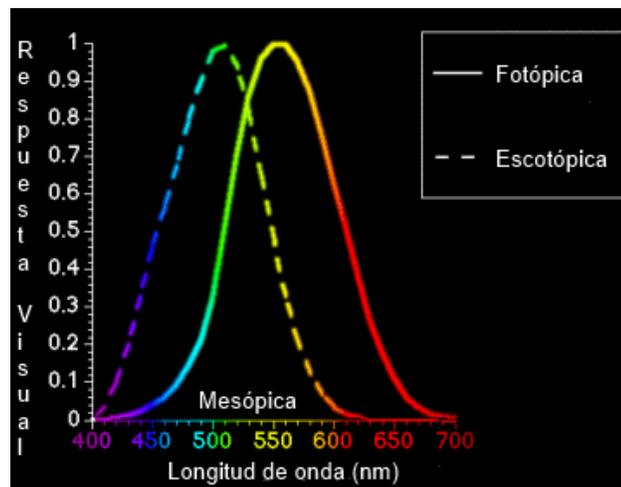


Figura 2.3: Respuestas de visión humana: Fotópica, Escotópica y Mesópica

Las distintas respuestas de visión se deben en específico a 2 tipos de fotorreceptores visuales, los **conos** y los **bastones**, los primeros responden a las condiciones fotópicas y son los responsables de permitirnos distinguir colores, de hecho existen 3 tipos de conos, uno para cada color primario de la luz. Por otro lado, los bastones responden a las condiciones escotópicas y son los responsables de que nuestra visión se adapte a condiciones de poca visibilidad. El área de visión mesópica es donde conos y bastones responden por igual [9, 33].

Dado que en ocasiones es necesario resolver problemas de Fotometría con datos obtenidos de instrumentos radiométricos se tienen definidas ecuaciones que nos permiten relacionar las cantidades radiométricas espectrales con las cantidades fotométricas, un ejemplo es la ecuación de flujo luminoso [33]:

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{760} V(\lambda) \Phi_\lambda d\lambda \quad (2.8)$$

donde $V(\lambda)$ corresponde a la función de la respuesta visual fotópica. Existen formulaciones similares para las otras cantidades fotométricas. Además, es posible emplear la función de respuesta escotópica en lugar de la fotópica según se necesite.

La constante K_m es llamada **eficacia luminosa**, esta constante tiene un valor de **683 $\frac{lm}{W}$** a 555 nm [33]. De manera general la eficacia luminosa puede ser definida como la medida de la capacidad

de una fuente de luz de producir una respuesta visual debido a su potencia, se da en término de lúmenes por watts [7].

2.1.2.2. Cantidades Fotométricas Fundamentales

Al igual que para la Radiometría hablamos de flujo radiante, en la Fotometría se habla del **flujo luminoso** (Φ_v), siendo esta la cantidad más fundamental vinculada a la Fotometría, y puede ser definida como la integral del flujo radiante espectral Φ_λ sobre el espectro visible multiplicado por un factor correspondiente a su visibilidad.

En general, las cantidades vistas anteriormente para Radiometría tienen su análogo fotométrico, el cual es representado por la misma letra que en Radiometría pero es seguido por el subíndice v . Lo anterior es posible ya que la teoría de la Fotometría es formalmente idéntica a la de la Radiometría, por ende, las propiedades o fundamentos de la Radiometría aplican también en la Fotometría [9].

Como ya se mencionó, la principal diferencia entre Radiometría y Fotometría radica a que en la primera se considera la energía del campo de radiación, mientras que para la Fotometría se considera la respuesta *visual* producida por el campo [9].

Dado que ya se conocen las definiciones de las cantidades radiométricas y éstas corresponden a las fotométricas, en la Tabla 2.1 se listan las principales cantidades fotométricas, su símbolo, su definición y sus unidades de medida.

Tabla 2.1: Cantidades Fotométricas fundamentales [7, 9, 33, 69]

Cantidad	Símbolo	Definición	Unidades
Energía Luminosa	Q_v	$\int \Phi_v dt$ (2.9)	$lm \cdot s = talbot$
Densidad de Energía Luminosa	U_v	$\frac{dQ_v}{dV}$ (2.10)	$\frac{lm \cdot s}{m^3} = \frac{talbot}{m^3}$
Flujo luminoso o Potencia Luminosa	Φ_v	$\frac{dQ_v}{dt}$ (2.11)	lm

Tabla 2.1: Cantidades Fotométricas fundamentales

Cantidad	Símbolo	Definición	Unidades
Iluminancia o Incidancia Luminosa	Q_v	$\frac{d\Phi_v}{dA}$ (2.12)	$\frac{lm}{m^2} = lx$
Excitancia Luminosa	M_v	$\frac{d\Phi_v}{dA}$ (2.13)	$\frac{lm}{m^2} = lx$
Luminancia	L_v	$\frac{d^2\Phi_v}{dA_{proj}d\Omega}$ (2.14)	$\frac{lm}{m^2 \cdot Sr} = \frac{lx}{Sr} = nt$
Intensidad Luminosa	I_v	$\frac{d\Phi_v}{d\Omega}$ (2.15)	$\frac{lm}{Sr} = cd$

El Lumen. En 1977, el Comité Internacional de Pesos y Medidas decidió elegir una unidad para el flujo luminoso, en lugar de para la intensidad luminosa, para ser tomada como la unidad primaria fotométrica, dicha unidad estandarizada es el lumen [9].

Lumen. Se define como el flujo luminoso que proviene de una radiación monocromática a $\lambda = 555$ nm y cuyo flujo radiante es igual a $\frac{1}{683}W$ [9].

2.1.2.3. Fotometría e Iluminación

Cuando se habla directamente de la iluminación de espacios es posible establecer un puente entre la Radiometría, la Fotometría y la iluminación; a continuación se describirán algunos conceptos fundamentales de la iluminación.

En general, cuando hablamos de iluminación, las fuentes o emisores que tratamos en Radiometría o Fotometría son específicamente lámparas o fuentes *de luz* y uno de los primeros conceptos se relaciona con la luz producida por dicha fuente de luz, es decir, la **luz emitida** o **flujo luminoso**, el cual se mide en lúmenes.

La cantidad de luz por unidad de superficie se mide en luxes y es conocida como **nivel de iluminación**. Sin embargo, este nivel de iluminación no depende solo de la fuente de luz, sino que además se ve influenciado por los elementos que componen la luminaria donde se encuentra dicha

fuente y por el ambiente.

Cuando se usa un sistema de iluminación dependiente de la electricidad se sabe que no toda la energía que consume se convierte en luz emitida, de esto surgió el concepto de **eficacia luminosa**, el cual nos dice cuánta energía de toda la consumida se emite en forma de luz, este concepto se vió previamente cuando se reviso la constante K_m , pero en el caso de lámparas eléctricas se considera solo la relación entre watts y lúmenes, la relación con el rango del espectro al que se tiene dicha eficacia depende del detector que se emplee para medir los lúmenes. En la figura 1.1 podemos ver la evolución de las lámparas tomando como referencia su eficacia luminosa; además, se sabe que la eficacia luminosa del Sol se encuentra entre 100 y 200 lm/W [16, 48].

Existen más términos relacionados con la iluminación, sin embargo para los fines de esta investigación los ya mencionados cubren los aspectos fundamentales. Ahora procederemos a un breve estudio de la fuente de energía de nuestro sistema de iluminación de interiores, el Sol.

2.1.3. El Sol

El Sol es considerado la fuente principal de energía que tiene el planeta Tierra, debido a que mantiene la vida orgánica en la biósfera y es el causante de los fenómenos meteorológicos, los cuales forman las corrientes y almacenes de agua [41]. Además, como ya se mencionó, existe la posibilidad de aprovechar la luz del Sol de manera directa, siendo uno de sus usos directos, la iluminación, el interés central de esta investigación.

El Sol es una esfera de materia gaseosa que se encuentra a muy altas temperaturas, alrededor de 5800 K. Posee un diámetro de $1.39 \times 10^9 m$ y se encuentra a una distancia de $1.5 \times 10^{11} m$ de la Tierra. Dada su composición físico química se puede considerar que está compuesto por distintas capas, y en cada una varía la temperatura y la radiación generada.

2.1.3.1. Constante Solar

Dado a que la órbita que sigue la Tierra es elíptica la distancia existente entre el Sol y la Tierra varia a lo largo del año, por ello para fines prácticos se considera la distancia media entre el Sol y la Tierra, $1.495 \times 10^{11} m \pm 1.7\%$, con la cual se sustenta un ángulo de $\alpha = 32'$ (Fig. 2.4).

A la energía proveniente del Sol por unidad de tiempo, recibida en un área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación se le conoce como constante solar, G_{SC} . Dicha constante se ha establecido en un valor entre $1353 W/m^2$ y $1367 W/m^2$ y se pudo estandarizar dado el hecho de que la intensidad de radiación emitida por el Sol y recibida por la Tierra es prácticamente constante *fuera* de la atmósfera terrestre [18, 20, 28, 40].

Considerando que la constante Solar puede variar debido a la distancia entre el Sol y la Tierra, se puede emplear la siguiente ecuación para calcular la radiación extraterrestre recibida según el día del año [40]:

$$G_{on} = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.16)$$

donde G_{on} es la radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación para el n -ésimo día del año.

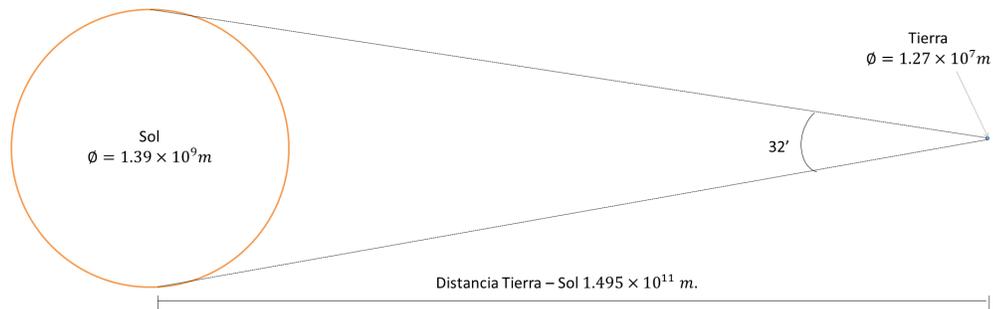


Figura 2.4: Esquema que muestra los parámetros de diámetros y distancias de la Tierra y el Sol (sin escala).

De la energía solar que incide en la atmósfera terrestre, solo un porcentaje alcanza su superficie, ya que una porción se pierde por fenómenos de absorción y reflexión a lo largo de su trayectoria. Además, existen diversos factores que afectan la radiación neta final que incide en algún área determinada de la superficie terrestre; algunas de las variaciones se deben a los cambios en la distancia Tierra-Sol, difusión generada por las partículas de aire, vapor de agua y polvo y por cambios en la absorción atmosférica [18].

2.1.3.2. Espectro Solar

La radiación Solar que llega al planeta Tierra comprende solo una porción del espectro electromagnético, por ejemplo, fuera de la atmósfera terrestre su mayor energía se concentra en el rango de $0.25\mu m - 3\mu m$, por otro lado la energía que alcanza la superficie de la Tierra se ubica en el rango de $0.29\mu m - 2.5\mu m$ [20, 40].

Además de conocer el rango del espectro de la radiación que incide en la superficie terrestre, es importante conocer la distribución espectral del mismo; por ello diversas asociaciones han realizado estudios al respecto y han generado varias aproximaciones con algunas variaciones leves entre sí, ya que la distribución espectral tiene ligeras fluctuaciones dependiendo de la ubicación donde se hace la medición, la época del año, las partículas suspendidas en la atmósfera y las condiciones meteorológicas. La figura 2.5 nos muestra una aproximación realizada por el Laboratorio Atmosférico para Aplicaciones y Ciencia, 'ATmospheric Laboratory for Applications and Sciences - ATLAS', en el año 2002 [20, 28, 62].

Como ya se explicó, la distribución espectral es variable y existen muchos factores que intervienen en ella, por eso diversos organismos han creado estándares que ayudan en los procesos de cálculos y modelados. Uno de los estándares más utilizados es el propuesto por la Comisión Internacional de la Iluminación, CIE, por su nombre en francés: la Commission Internationale de l'Éclairage. La CIE propuso la fuente D65 que intenta representar un día promedio con una temperatura del color correlacionada de aproximadamente 6500 K (el concepto de temperatura de color se definirá más adelante, después de definir que es un cuerpo negro). Se aconseja que dicho estándar sea empleado en todos los cálculos colorimétricos, radiométricos y fotométricos que requieran

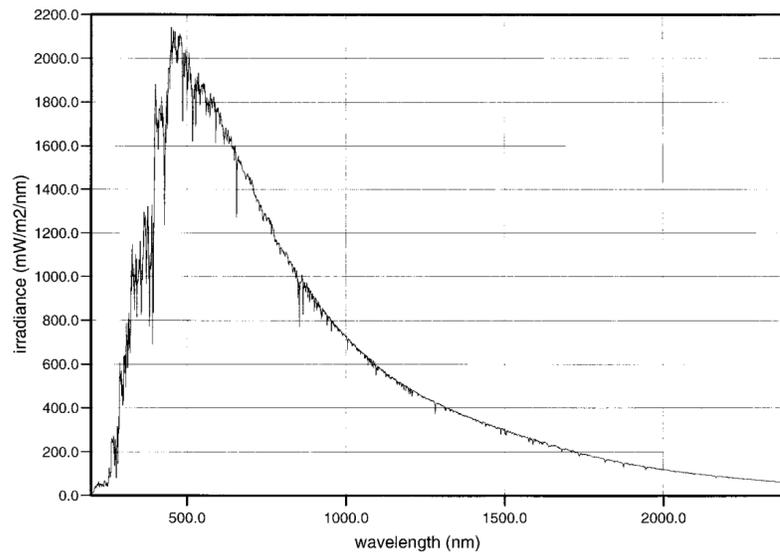


Figura 2.5: Distribución del Espectro Solar según el ATLAS [62].

una representación de la luz de Sol [59, 62].

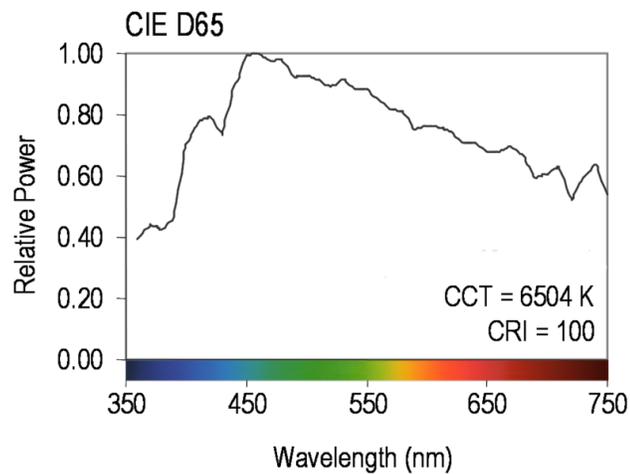


Figura 2.6: Distribución Espectral del Sol en un día promedio según estándar D65 del CIE [62].

En conclusión, para el punto de vista de aplicaciones terrestres de la energía solar, solo la radiación de longitud de onda entre 0.29 y $2.5 \mu m$ necesita ser considerada [20, 40].

2.1.3.3. Radiación Solar para Iluminación

La radiación solar recibida sin que haya sido dispersada por la atmósfera es conocida como **radiación solar directa**, mientras que la radiación que es recibida después de que su dirección ha cambiado por la dispersión en la atmósfera es llamada **radiación solar difusa**. A la suma de ambas se le denomina **radiación solar total** o **radiación global**. El 85% de la luz solar que llega a la superficie terrestre en un día soleado es radiación directa [20, 40].

La porción de luz visible del Sol es más eficiente cuando es usada directamente para iluminación. La eficacia luminosa de la luz Solar directa, es decir, de toda la energía captada, cuanto corresponde a luz, es de 90 a 100 l/W dependiendo de la orientación relativa del Sol a la Tierra, las condiciones atmosféricas, etc. Mientras que la eficacia luminosa de la luz solar filtrada, es decir, libre de la radiación UV e IR cercana, se aproxima a 200 l/W, lo cual excede la eficacia de las lámparas actuales (15 – 90 l/W) [48].

La iluminación solar que emplea solo la porción visible del espectro EM y que no cuenta con componentes en el rango del IR, puede ser considerada como un recurso de luz de alta eficiencia, además, se caracteriza por ser fría al tacto [2].

2.1.3.4. Radiación Solar en México

Nuestro país, México, se encuentra cercano al Ecuador por lo cual cuenta con una posición favorable en cuanto a radiación solar, siendo un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; su zona norte es de las más soleadas del mundo [47].

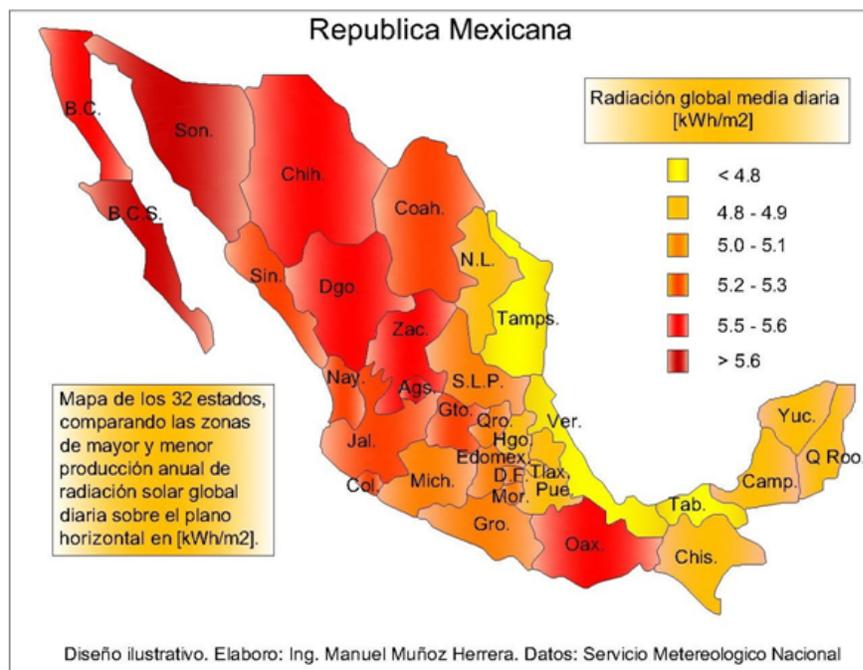


Figura 2.7: Mapa de la radiación solar en los Estados Unidos Mexicanos en kWh/m² [47]

2.1.4. Energía Radiante

La radiación proveniente de la región del espectro electromagnético comprendida entre 0.1 y 100 μm se denomina **radiación térmica**, la radiación Solar en la superficie terrestre se encuentra dentro de este rango, por lo cual se sabe que la luz Solar vendrá acompañada de otra forma de energía: calor [20,40].

2.1.4.1. Leyes de la Termodinámica

Resulta necesario considerar las Leyes de la Termodinámica para entender el comportamiento de la radiación térmica del Sol a través del Sistema de colección Solar [57]:

- **1era Ley de la Termodinámica.** Es también conocida como el principio de conservación de la energía y establece que si se realiza trabajo sobre un sistema, su energía interna cambiará, dicho de otro modo, nos permite definir al calor como la diferencia de energía interna de un sistema producida por la aplicación de un trabajo sobre el mismo.
- **2a Ley de la Termodinámica.** Básicamente, dicta la dirección que deben de tomar los procesos termodinámicos, es decir que el calor siempre transferirá de la zona con mayor temperatura a la zona con menor temperatura.

2.1.4.2. Conservación de la Energía

El flujo de radiación óptica incidente (Φ_i) en un medio puede sufrir cualquiera de los siguientes procesos (Fig. 2.8) [33,51]:

- **Transmisión.** Es definida como el proceso por el cual el flujo radiante incidente deja la superficie del material por otro lado del material distinto al lado de incidencia.
- **Reflexión.** Ocurre cuando una fracción de la radiación incidente es regresada al medio anterior al que la reflejo.
- **Absorción.** Se da cuando una parte de la radiación incidente se convierte en otra forma de energía, como calor, quedando dentro del material en lugar de ser reflejada o transmitida.

En general, los tres tipos de radiación ya mencionados dependen de la naturaleza de la fuente de radiación y de la naturaleza de la superficie del cuerpo. Las fracciones de radiación que sufren cada uno de los procesos ya mencionados nunca son medidas, solo son calculadas, información sobre dichos cálculos es mostrada en la Tabla 2.2 [33,40].

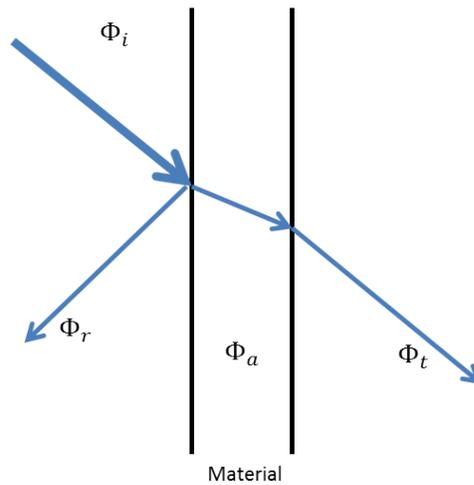


Figura 2.8: El flujo radiante que incide (Φ_i) en el material es dividido en tres tipos: el transmitido (Φ_t), el reflejado (Φ_r) y el absorbido (Φ_a).

Tabla 2.2: Procesos de la Energía Radiante Incidente [9, 33, 51]

Nombre	Definición	Símbolo	Cálculo
Transmitancia	Fracción correspondiente al flujo transmitido Φ_t	τ	$\frac{\Phi_t}{\Phi_i}$ (2.17)
Reflectancia	Fracción de flujo reflejado Φ_r	ρ	$\frac{\Phi_r}{\Phi_i}$ (2.18)
Absorbancia	Corresponde a la porción de flujo absorbido por el material Φ_a	α	$\frac{\Phi_a}{\Phi_i}$ (2.19)

Considerando los 3 tipos de radiación ya mencionados y la Ley de la Conservación de la Energía se tiene que [9, 18, 33, 40]:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (2.20)$$

2.1.4.3. Transferencia de Calor

Calor. Se define como energía que fluye entre un sistema y su ambiente a causa de la diferencia de temperatura que existe entre ellos.

Cuando estudiamos cómo se propaga el calor en un cuerpo, de manera general, se considera la siguiente ecuación:

$$-\nabla \cdot \dot{q} = C_p \rho_D \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.21)$$

donde \dot{q} representa el intercambio de calor por alguno(s) de los medios de transmisión existentes, C_p corresponde al calor específico del material, ρ_D es la densidad del material (usamos D solo para diferenciarlo de la reflectancia), y $\frac{\partial T}{\partial t}$ representa el cambio de temperatura con respecto al tiempo.

Los mecanismos de transferencia de calor son [38, 40, 57]:

- **Conducción.** La conducción sigue la Ley de Fourier para describir su comportamiento, donde k representa la conductividad térmica [13]:

$$\dot{q}_c = -k\nabla T \quad (2.22)$$

- **Convección.** Este tipo de transferencia ocurre cuando un fluido entra en contacto con un objeto cuya temperatura es mayor que la de su ambiente. Para calcular esta transferencia se considera la temperatura del fluido en la superficie del objeto (T_s), la temperatura del fluido lejos de la superficie (T_∞) y el coeficiente de transferencia de calor del objeto:

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.23)$$

- **Radiación.** Intercambio de temperatura entre 2 cuerpos a través del espacio libre, aquí la radiación es absorbida por el cuerpo de menor temperatura de acuerdo a la Ley de Bouyer, la cual hace uso del coeficiente de absorción de dicho cuerpo, α , la longitud del cuerpo, z , y su potencia inicial, \dot{q}_0 :

$$\dot{q}_r = \dot{q}_0 e^{-\alpha z} \quad (2.24)$$

Tanto la conducción y la convección requieren la presencia de un medio para el proceso de transferencia de energía, a diferencia del caso de la radiación donde no se requiere de un medio [40].

2.1.4.4. Radiación de Cuerpo Negro

Los objetos ‘calientes’ emiten radiación que podemos sentir o ver. De manera general, los cuerpos calientes se vuelven luminosos a temperaturas por encima de los 500°, además, cuando existen incrementos en la temperatura, el color de la emisión cambia de color rojo a amarillo, luego a blanco y, finalmente, a azul.

Para un adecuado análisis de los sistemas de iluminación solar es necesario hacer un estudio sobre las características radiométricas del mismo, tales como su distribución espectral, y relacionarlas con la energía que obtendremos y las temperaturas que se tendrán en cada punto del sistema. Lo

anterior es algo difícil de calcular para cualquier fuente térmica arbitraria, pero existe la posibilidad de calcularlo si tomamos en cuenta una fuente como un cuerpo negro, la cual tiene una función universal que le permite relacionar la frecuencia óptica ν y la temperatura T de la fuente [9].

Un **cuerpo negro** es un absorbedor de radiación perfecto, es decir que toda la radiación incidente a éste, en cualquier longitud de onda o dirección, será absorbida. Además, un cuerpo negro es también un emisor perfecto de radiación térmica, es decir, que emite la máxima radiación posible. Se puede intuir fácilmente que el concepto de cuerpo negro es meramente ideal, ya que las sustancias reales reflejan algo de radiación; sin embargo, en la naturaleza existen materiales que se aproximan a su comportamiento [20, 40].

Ley de Planck. La Ley de Planck para la radiación del cuerpo negro es el núcleo de todas las ecuaciones de radiación térmica, dicha expresión relaciona la radiancia con la frecuencia (o longitud de onda) y la temperatura [51]:

$$L_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.25)$$

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.26)$$

donde h es la constante de Planck ($h = 6.62606876 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), ν es la frecuencia de la radiación, c es la velocidad de la luz, k es la constante de Boltzmann ($k = 1.3806503 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$), T es la temperatura total máxima alcanzada y λ es la longitud de onda de la radiación.

Ley de Stefan-Boltzmann. Es posible calcular la potencia total irradiada por un cuerpo caliente integrando la ecuación de Planck sobre todas las longitudes de onda, esto nos da como resultado la Ley de Stefan-Boltzmann [9, 51]:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.27)$$

donde T es la temperatura del cuerpo en grados Kelvin, M es la excitancia radiante y σ es la constante Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$).

Temperatura del color correlacionada. Se define como la temperatura absoluta, medida en grados Kelvin, a la que un cuerpo negro emitirá el mismo nivel de radiación que el cuerpo analizado [16].

Con esto se da por terminada la primera parte del presente capítulo, ahora se procederá a hacer una revisión de la teoría que envuelve a los colectores y concentradores solares, para lo cual será necesario hacer un repaso por los conceptos fundamentales de la Óptica Geométrica, así como dar una breve introducción a los principales términos de la Óptica Anidólica.

2.2. Colectores Solares

Cuando se desea diseñar o implementar un sistema de iluminación solar es necesario establecer cuál será el método de colección de la luz solar, considerando las capacidades de concentración solar de diversos dispositivos ópticos. Para lograr seleccionar una opción adecuada se deben conocer los fundamentos de Óptica Geométrica que son explicados a continuación.

Se define a un **colector o captador solar** como cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el Sol [18].

En la literatura es posible encontrar los términos colector y concentrador empleados como algo distinto, sin embargo, para los fines de este trabajo, el término colector lo usaremos como ya se definió y el término concentrador lo usaremos para referirnos a aquellos colectores que se encargan de enfocar, es decir concentrar, la luz en un punto, línea o mancha determinada, teniendo como finalidad el aumentar la densidad de energía colectada.

2.2.1. Óptica Geométrica

Para cumplir con la tarea de coleccionar, concentrar dirigir la luz del Sol a interiores, es necesario el diseñar e implementar un sistema óptico que cumpla con dichas tareas. La Óptica Geométrica es la herramienta básica para el diseño de prácticamente cualquier sistema óptico, sea formador de imágenes o no [68].

2.2.1.1. Conceptos Básicos

Los fenómenos ópticos pueden ser estudiados desde dos ramas distintas de la Óptica, las cuales son:

- **Óptica Geométrica**
- **Óptica Física**

La Óptica Geométrica es la rama de la óptica que nos ayudará a entender los fenómenos básicos de reflexión de luz y la manera en que funcionan los elementos ópticos simples como espejos, lentes y fibras. No será necesario abordar la óptica geométrica a profundidad.

La luz es representada de manera pictórica como líneas rectas, a la cuales comúnmente nos referimos como rayos de luz [54].

Rayo de luz. Un rayo es representado por un vector: una línea recta indica la magnitud y la dirección de la propagación [51]. Se define al rayo de luz como la línea imaginaria dirigida a través del camino que sigue la luz [36, 54].

Frente de onda. Es una superficie hipotética localmente normal a un rayo. Entonces, un frente de onda puede ser un plano (todos los rayos paralelos, como si provinieran del infinito) o una superficie curva (indicando rayos divergentes, como si emanaran de un punto) [51]. Geométricamente, entonces, un rayo especifica la dirección del flujo de energía en la onda [54].

Velocidad de la luz. Es la tasa a la cual la luz se propaga a través del vacío. Es representada por c y es una constante con un valor aproximado a $3.00 \times 10^8 \frac{m}{s}$, y es la tasa más alta de viaje que en cualquier otro medio [51].

Índice de refracción. Es la relación de la velocidad de la luz en el vacío respecto a la velocidad de la luz en un medio [36, 51]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.28)$$

donde n representa el índice de refracción del medio y v la velocidad de la luz en el medio. Para todos los casos, hasta el momento, c debe ser siempre mayor o igual a v , por lo que el índice de refracción está limitado a valores mayores o iguales a 1. Para el caso del aire y la mayoría de los gases, el índice de refracción está muy cercano a 1, por lo cual para el promedio de los cálculos se considera como $n = 1.0$ y, para otros materiales, su valor supera a la unidad [54].

Interfaz Óptica. Plano geométrico que separa un medio óptico de otro [54].

Habiendo revisado algunos conceptos básicos de Óptica Geométrica, procederemos a revisar una división de la misma conocida como Óptica Anidólica.

2.2.1.2. Óptica Anidólica

La Óptica Anidólica, también llamada Óptica No Formadora de Imágenes (Non Imaging Optics), es la rama de la Óptica Geométrica que estudia la transferencia de energía radiante entre la fuente y el receptor.

El término anidólico surge del hecho de que para obtener una alta eficiencia, NO es necesaria la condición de formación de la imagen. Sin embargo, existen aplicaciones de Óptica Anidólica donde esta condición no es excluida.

La Óptica Anidólica da lugar a la existencia de sistemas ópticos con un menor número de superficies, que son más eficientes y más tolerantes a errores de fabricación, convirtiéndose así en una herramienta fundamental en el diseño de sistemas ópticos para iluminación [14].

Existen 2 problemas de diseño principales en la Óptica Anidólica [3]:

- **“Boumdle-coupling” o paquete de acoplamiento.** Su objetivo es maximizar la potencia de transferencia de luz desde la fuente hasta el receptor.
- **Irradiancia prescrita.** Su finalidad es obtener un patrón deseado en la superficie receptora.

Este proyecto busca la mejor solución posible, con los recursos mínimos, al problema de acoplamiento. Dicho problema de diseño consiste en acoplar dos conjuntos de rayos, los de entrada y los de salida, donde cada rayo de entrada tenga su rayo en el paquete de salida y viceversa, es decir, se conserve la radiación captada hasta la salida del sistema. Sabemos que esto representa un caso ideal, pero se busca analizar y mejorar el sistema para que la mayoría de los rayos de entrada existan en la salida [3].

Ahora que conocemos algunos términos generales de la Óptica Geométrica y de su rama, la Óptica No Formadora de Imágenes, procederemos a revisar conceptos más específicos relacionados con el comportamiento de la luz a través de sistemas ópticos.

2.2.1.3. Reflexión y Refracción de la Luz en Superficies Ópticas

Cuando la luz incide en la interface entre 2 medios ópticos transparentes, pueden ocurrir cuatro cosas a la luz incidente:

- Puede ser total o parcialmente reflejada a la interface.
- Puede dispersarse en direcciones aleatorias a la superficie.
- Puede ser transmitida parcialmente por refracción en la superficie al segundo medio.
- Puede ser parcialmente absorbida en ambos medios.

Para los fines de este trabajo solo consideraremos el caso ideal en el que todos nuestros elementos ópticos que reflejen luz lo harán de manera especular, es decir, de forma regular como si de un espejo ideal se tratara. Además, por el momento, se ignorará la absorción de la energía óptica a través del camino por el que viaja la luz.

Lo primero que se revisará serán las leyes que están relacionadas con los fenómenos de reflexión y refracción de la luz: la Ley de Reflexión y la Ley de Snell.

Ley de Reflexión. Cuando la luz se refleja en una superficie plana, el ángulo con respecto a la normal con el que se refleja hacia el punto de incidencia es **siempre** igual al ángulo formado por el rayo incidente y la normal (Figura 2.9). En el caso del análisis para el caso de una superficie curva, se puede deducir el mismo fenómeno si delimitamos una superficie tangente en el punto de reflexión de la luz, teniendo así el mismo resultado. Descrito en forma vectorial, esta ley posee la siguiente forma:

$$\vec{r} = \vec{i} - 2(\vec{n} \cdot \vec{i})\vec{n} \quad (2.29)$$

donde \vec{i} representa al rayo incidente, \vec{n} el rayo normal a la superficie de incidencia, y \vec{r} el rayo reflejado.

Refracción de la luz en interfaces ópticas. Cuando la luz incide en una interfaz óptica ésta será parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, siendo un proceso similar al ilustrado en la Figura 2.8, con la diferencia que para este análisis, como ya se mencionó, no se considera el proceso de absorción.

Ley de Snell. Nos permite calcular el cambio de ángulo en la dirección de propagación de un rayo cuando existe refracción, es decir, cuando la luz viaja de un medio con un índice de refracción $n = n_1$ hacia otro con $n = n_2$ (Fig. 2.10) [36, 51, 54]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.30)$$

La Ley de Snell también es conocida como Ley de Refracción, y su formulación vectorial es:

$$n_2 \vec{r}_2 = n_1 \vec{r}_1 + (n_2 \vec{r}_2 \cdot \vec{n} - n_1 \vec{r}_1 \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (2.31)$$

donde \vec{n} es el rayo normal a la superficie de incidencia, los \vec{r}_1 es el rayo incidente en un medio con índice de refracción n_1 y, \vec{r}_2 es el rayo refractado en el medio con índice de refracción n_2 [68].

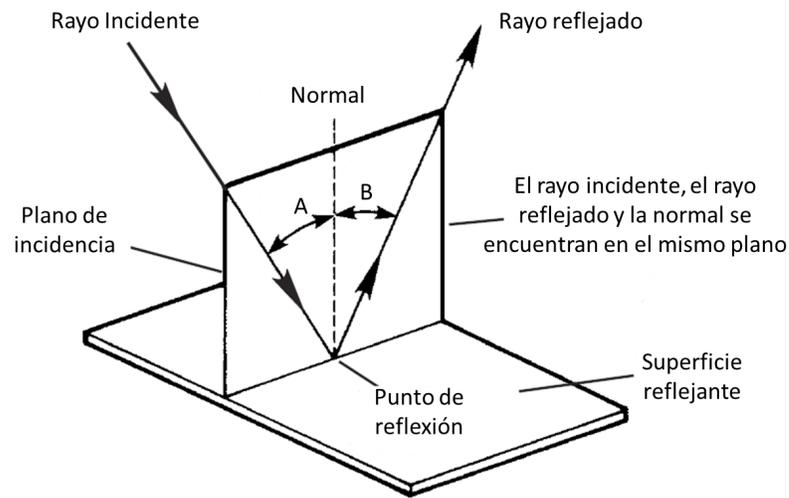


Figura 2.9: Descripción gráfica de la Ley de Reflexión [54].

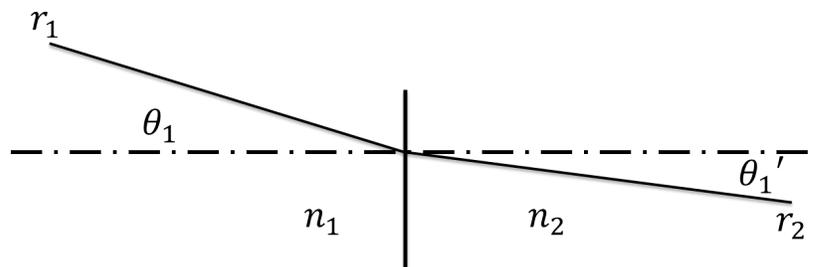


Figura 2.10: Se puede observar como el ángulo θ_1 es refractado a un ángulo θ_1' cuando pasa del medio con índice de refracción n_1 al que tiene un índice n_2 [51].

Ángulo Crítico. Cuando la luz viaja de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor se pueden presentar 4 resultados probables:

- Si el ángulo tiene una incidencia normal no se desviará, tal como muestra el r_1 de la Figura 2.11.
- El rayo r_2 incide con un ángulo θ_2 y se refracta con un ángulo que cumple la Ley de Snell.
- También existe la posibilidad de que el rayo, r_3 , incida con un ángulo θ_3 , llamado **ángulo crítico**, el cual logra que el rayo se refracte con un ángulo de 90° , con lo cual el rayo el luz viajará a lo largo de la interfaz.
- Todos aquellos rayos que incidan con un ángulo mayor al crítico, como r_4 serán totalmente reflejados en el mismo medio, originando así un fenómeno conocido como **Reflexión Total Interna (RTI)**.

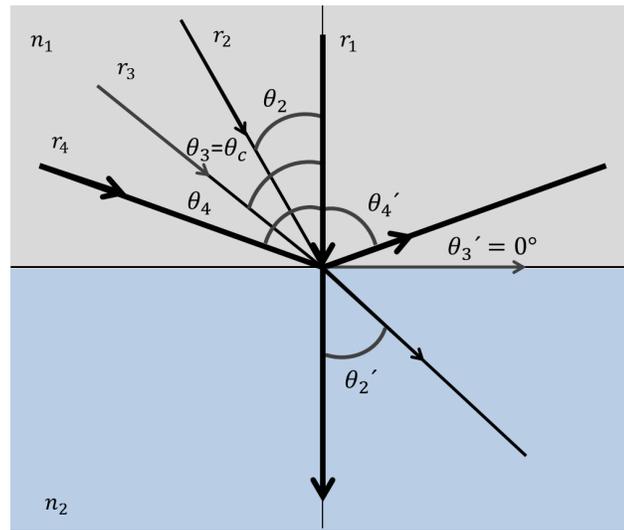


Figura 2.11: Descripción gráfica de los posibles comportamientos de los rayos de luz considerando el ángulo de incidencia [36].

El cálculo del ángulo crítico se puede realizar considerando la Ley de Snell (2.30) con un θ_1' , por lo que su fórmula queda como:

$$\theta_c = \sin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{-1} \quad (2.32)$$

lo anterior solo es válido si $n_2 < n_1$.

2.2.1.4. Sistemas Ópticos.

Dado a que nuestro sistema de recolección de luz solar consiste básicamente en un sistema óptico es importante definirlo, así como conocer las partes que lo conforman considerando la Óptica Geométrica, así como considerando la Óptica Anidólica.

La función de un **sistema óptico** es recoger y remodelar una parte del frente de onda incidente, a menudo con la intención esencial de formar una imagen de un objeto [36].

Los sistemas ópticos se pueden clasificar básicamente en dos tipos: los formadores y los no formadores de imagen.

Los sistemas ópticos formadores de imagen poseen 3 componentes principales [12, 36]:

- **Objeto.** Es un conjunto de puntos que emiten luz en todas las direcciones.
- **Óptica.** Conjunto de componentes ópticos que se encargan de modificar, de alguna manera determinada, el camino por el que viaja la luz, generalmente se encargan de reflejar y/o refractar los rayos de luz que pasan a través de ellos.
- **Imagen.** Es el resultado de la correspondencia punto a punto del paso de la energía radiante del objeto a través de la óptica del sistema [14].

Analizándolo desde la perspectiva meramente de la Óptica Geométrica podemos decir que: la luz proveniente de cada punto del objeto es capturada por el sistema óptico y concentrada sobre un punto en la imagen.

Por otro lado, los sistemas ópticos no formadores de imagen se componen de una fuente de luz en lugar de un objeto y, en lugar de una imagen, tienen un receptor. Por ello se tiene que, en lugar de que la óptica genere la imagen de la fuente, ésta produzca un patrón de iluminación prescrito en el receptor [12].

Cuando los rayos de luz provienen de fuentes muy lejanas, se considera que dichos rayos son paralelos, tal es el caso de la luz del Sol. Otro caso donde se ven involucrados los rayos paralelos son las fuentes colimadas como algunos rayos láser [54].

Superficies Esféricas. Como su nombre lo indica, una superficie esférica es aquella que corresponde en geometría a una sección de una esfera, generalmente éstas superficies son fáciles de construir pero no permiten tanta versatilidad en tamaños, grosores y distancias focales. Para éstas superficies su foco se localiza en el punto medio entre la superficie y el centro de la esfera y, además, el radio de curvatura coincide con el radio de la esfera [36].

Superficies Asféricas. Toda superficie que se desvía de la simetría esférica es una superficie asférica. Matemáticamente, las superficies asféricas son descritas empleando secciones cónicas con dependencia radial a la superficie [55]:

$$z(h) = \frac{h^2}{R_s \left[1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa) \left(\frac{h}{R_s} \right)^2} \right]} + \sum_{n=2}^m A_{2n} h^{2n} \quad (2.33)$$

donde h es la coordenada radial, R_s el radio del vértice, κ es la constante cónica y A_{2n} son los coeficientes de una corrección polinomial, generalmente utilizados para las aberraciones del sistema.

Las diferentes secciones de secciones cónicas se identifican como (Fig. 2.12):

- $\kappa > 0$. Elipse oblata
- $-1 < \kappa < 0$. Elipse prolata
- $\kappa = 0$. Esférica
- $\kappa = -1$. Parábola
- $\kappa < -1$. Hipérbola

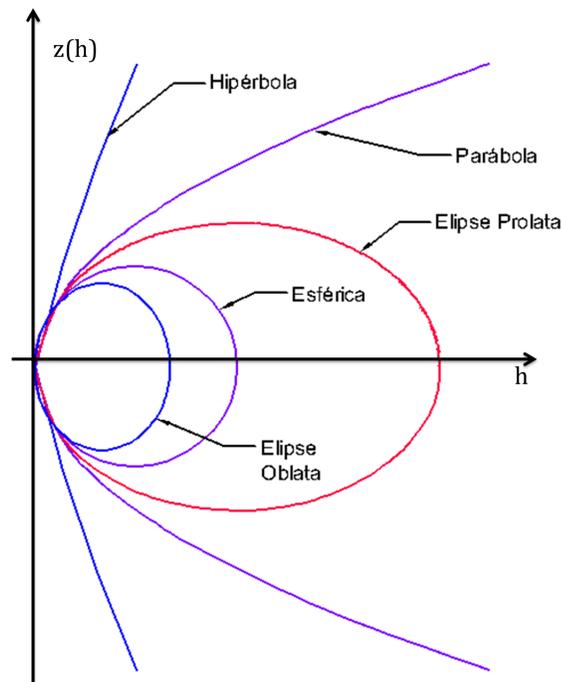


Figura 2.12: Secciones cónicas [55].

Lentes. Son esencialmente elementos refractores que se encargan de controlar la luz, utilizados principalmente para la formación de imágenes con luz visible; pero, además, para luz ultravioleta e infrarroja.

Los lentes están hechos de un medio refractor transparente, generalmente algún tipo de vidrio o polímero, con superficies curvas.

Un rayo incidente en un lente se refracta en la primera superficie, tal como lo indica la Ley de Snell, se propaga a través del lente y se refracta de nuevo en la segunda superficie [54].

Existen diversas variedades de lentes que, dependiendo de su estructura o geometría, manipulan la luz de distintas maneras, sin embargo, para fines de este trabajo solo se considerarán las lentes convergentes y las lentes de Fresnel como medios de concentración para sistemas no formadores de imágenes; ya que si bien estos elementos son formadores de imágenes, al momento de emplearse para colección solar sólo nos interesa la concentración de energía, por lo que se consideran parte de sistemas no formadores de imágenes.

Lentes convergentes. También conocidas como lentes positivas son aquellas que al recibir una onda plana concentran dicha onda en un punto localizado en su distancia focal [54].

Superficies reflejantes. Estas superficies, generalmente llamadas espejos o reflectores, se encargan de formar imágenes tridimensionales de objetos tridimensionales.

Cuando se conoce el tamaño, orientación y ubicación de un objeto respecto a un espejo, es posible emplear la Ley de reflexión y el trazado de rayos para ubicar la imagen del objeto gráficamente.

Si deseamos considerar un espejo curvo como un concentrador en un sistema no formador de imágenes, como es nuestro caso, será necesario realizar los mismos cálculos concernientes para sistemas formadores de imágenes, pero no consideraremos la distribución final de la luz, es decir, consideraremos la imagen del objeto como energía incidente en un receptor. La ubicación de nuestro receptor deberá ser cercana al punto focal de nuestra geometría [54].

La bibliografía consultada [28] nos indica que cuando se quiere hacer uso de la energía solar para grandes concentraciones de energía, como es el caso del uso de la radiación solar para fotovoltaica o para hornos solares, se acostumbra hacer uso de grandes concentradores hechos de materiales reflejantes; sin embargo, para cuestiones de iluminación se acostumbra el uso de lentes, ya que, a pesar de no llegar a altas concentraciones de energía, permiten al sistema concentrar luz solar sin llegar a grandes acumulaciones de calor. La razón ya expuesta nos lleva a un estudio un poco más a fondo de los conceptos que giran en torno de los lentes, dichos conceptos se explicarán a continuación.

El tamaño de una lente determina su capacidad de captación de luz y, en consecuencia, la irradiancia de la imagen que forma. Dos indicadores empleados usualmente para denotar estas características de una lente son el número f ($f^\#$) y la apertura numérica (NA) [54].

Número f ($f^\#$). También llamado apertura relativa, se puede definir como la tasa de la longitud focal efectiva f (considerando un objeto en el infinito) al diámetro de la pupila de entrada [51]:

$$f^\# = \frac{f}{D} \quad (2.34)$$

Apertura Numérica. Se define como el seno del ángulo medio del cono mayor del rayo meridional que puede entrar o salir de un sistema óptico o elemento, multiplicado por el índice de refracción del material con el cual se fabricó el lente. Generalmente es medido con respecto a un objeto o imagen puntual. Su definición formal es [7, 51]:

$$NA = n \sin \theta_{1/2} \quad (2.35)$$

La apertura numérica se define con el fin de exhibir la diferencia en ángulos sólidos de luz aceptada (Fig. 2.13).

Ahora retomaremos el concepto de irradiancia visto en la sección concerniente a Radiometría y lo conjuntaremos con los dos conceptos vistos anteriormente, $f^\#$ y NA ; la irradiancia de la imagen en un sistema se depende de dichos valores de la siguiente forma [54]:

$$Irradiancia \text{ de la imagen} \propto \frac{1}{(f^\#)^2} \quad (2.36)$$

$$Irradiancia \text{ de la imagen} \propto (NA)^2 \quad (2.37)$$

Considerando lo anterior, es posible incrementar la capacidad de captación de luz de un lente y la irradiancia de la imagen que forma, disminuyendo el número f del lente, es decir, incrementando su diámetro, o aumentando su NA para que tenga un cono de aceptación mayor.

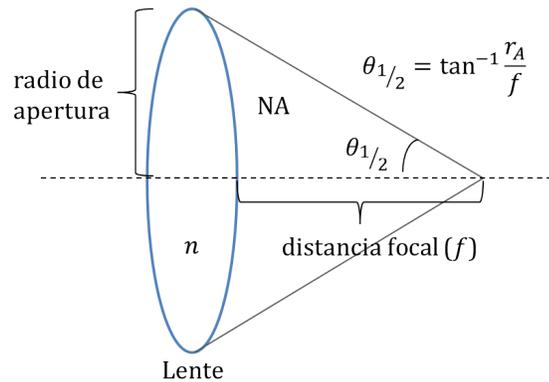


Figura 2.13: Apertura Numérica en lentes.

Procedamos ahora a continuar revisando otros conceptos importantes para comprender más a fondo los lentes, sus características y como se comporta la luz al pasar a través de ellos.

Relación de Abbe. Los sistemas ópticos deben cumplir la condición de Abbe [69]:

$$n_1 h_{obj} \sin \theta_1 = n_2 h_{img} \sin \theta_2 \quad (2.38)$$

donde n_1 y n_2 representan los índices de refracción del objeto y la imagen, respectivamente, h_{obj} y h_{img} las alturas correspondientes y, θ_1 y θ_2 los ángulos que forman la imagen y el objeto con respecto al eje óptico. Con lo cual la definición del *número f* resulta como [7, 51]:

$$f^\# = \frac{1}{2 \sin \theta_{1/2}} \quad (2.39)$$

Relación de ángulo Sólido. Los parámetros del sistema o elemento óptico, el número f y la apertura numérica, pueden relacionarse con el ángulo sólido contenido en el cono de apertura del mismo por medio de [51]:

$$\Omega = \frac{\pi}{4(f^\#)^2} = \frac{\pi(NA)^2}{n^2} \quad (2.40)$$

2.2.2. Análisis Numérico de Sistemas Ópticos

Podemos mencionar 2 técnicas para el análisis numérico de sistemas ópticos, la primera consiste en abordar el problema desde el punto de vista de la óptica geométrica, empleando trazado de rayos. Por otra parte, también es posible hacer análisis considerando el comportamiento ondulatorio de la luz, esto es conocido como análisis por medio de superposición de ondas.

2.2.2.1. Trazado de Rayos

La mayoría de los diseños y análisis de concentradores involucra la técnica del trazado de rayos [68]. Es una técnica por medio de la cual se emplean la Ley de Snell y la Ley de Reflexión para determinar la trayectoria de los rayos de luz a través de sistemas ópticos complicados [54, 68, 69].

Consideraciones del método del trazado de rayos. Para la realización de este método se considera que [54]:

- La luz incide en las superficies ópticas con un orden de izquierda a derecha.
- El eje de simetría normal a los dispositivos ópticos es conocido como el *eje óptico*.
- Se debe conocer la longitud focal del lente o espejo.
- Es conveniente el uso de las Leyes de Reflexión y Refracción en su forma de vector.

Existen diversos métodos que emplean aproximaciones en lugar de trazado de rayos, una de ellas es la aproximación paraxial [69].

Aproximación paraxial. También llamada Óptica Gaussiana, es una técnica empleada por la mayoría de los software de diseño óptico. En esta aproximación se asume que los rayos están lo suficientemente cerca del eje óptico para que:

$$\sin \theta \approx \theta \quad (2.41)$$

$$\tan \theta \approx \theta \quad (2.42)$$

$$\cos \theta \approx 1 \quad (2.43)$$

esto representa una linealización de las ecuaciones de trazado de rayos. Sin embargo dichas aproximaciones se restringen para ángulos de rayos de luz incidente menores que 20° . [54, 69].

2.2.2.2. Superposición de Ondas.

El análisis de sistemas ópticos por medio de superposición de ondas consiste, básicamente, en hacer uso de la teoría ondulatoria para conocer el comportamiento de nuestro sistema, haciendo una correspondencia entre el objeto y la imagen. Debido a que para los fines de los sistemas de iluminación no se requiere dicha correspondencia (entre la fuente y la señal detectada en el receptor), no emplearemos la técnica de superposición de ondas para analizar nuestro sistema, por lo cual no se entrarán en más detalles al respecto.

2.2.3. Tipos de Colectores.

El principal problema que se tiene al trabajar con la luz Solar es su baja densidad, razón por la cual se acostumbra que la luz colectada sea concentrada en áreas pequeñas [39]; para lograr la tarea de colectar la luz Solar, independientemente de su uso, es necesario emplear superficies ópticas reflejantes de grandes tamaños o lentes de Fresnel que enfoquen la luz colectada, dado que los lentes de cristal tienen las desventajas de ser muy frágiles, tener un alto peso y no ser económicamente accesibles.

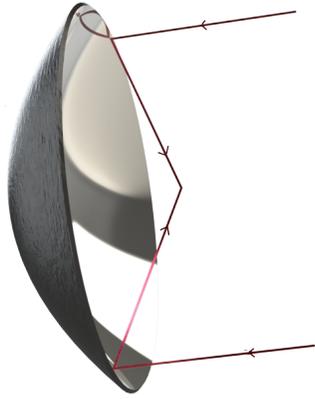
2.2.3.1. Reflectores

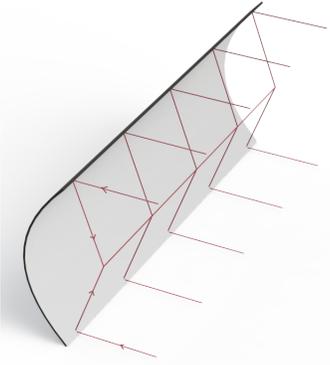
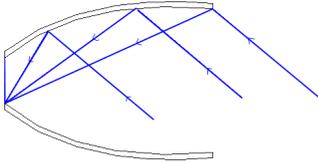
Se construyen de materiales reflectantes que se caracterizan por ser pobres absorbedores. Estos dispositivos generalmente son de vidrio espejado o aluminio [18].

Para que logren concentrar la energía colectada deben poseer una geometría curva, como por ejemplo los espejos parabólicos, y son las características del cuerpo geométrico como la distancia focal y el radio de curvatura los que determinan la cantidad de luz colectada y su ubicación.

En la tabla 2.3 se ilustran los ejemplos más representativos de colectores basados en superficies reflejantes y datos acerca de sus capacidades de colección.

Tabla 2.3: Tipos de Colectores basados en Superficies Refle-
jantes [65].

Nombre	Imagen	Descripción
Parabólico		<p>Se caracteriza por enfocar los rayos paralelos del Sol en un solo punto situado en el foco de la curvatura. Su foco está situado entre el vértice con el eje óptico y el radio de curvatura. Su capacidad de concentración, ϕ, dependerá de su distancia focal y del ángulo de apertura, θ, que tenga la superficie de revolución, así como la de incidencia radiante recibida en el colector, M_0. Su capacidad de captación viene dada por:</p> $\phi = \pi M_0 f^2 \sin^2 \theta$

Nombre	Imagen	Descripción
Cilíndrico Parabólico		<p>Enfoca los rayos paralelos del Sol en una línea situada en el foco de la curvatura, cuya longitud es la misma que la altura del cilindro. Su foco está situado entre el vértice con el eje óptico y el radio de curvatura. Su capacidad de captación dependerá de su ángulo de apertura θ, la longitud del colector (H) y su distancia focal:</p> $\phi = \frac{8M_0 H f \sin \theta}{\pi}$
Parabólico Compuesto		<p>Su principal característica reside en que se forma por dos porciones de parábola simétricas, de tal forma que el foco de una de ellas se encuentra en el extremo de la otra, es decir, que cualquier rayo que entre y toque la superficie de alguna de las parábolas se concentrará en el área existente entre sus extremos, garantizando así, de manera ideal, una captación del 100%, aunque se ha mostrado que ésto no puede ser factible en la práctica. El CPC llevado a la práctica se convierte en un colector elíptico parabólico que no tiene la misma captación y, de igual forma que para los colectores parabólicos compuestos, se tiene la superficie de revolución y la extrusión de la geometría 2D a 3D.</p>

2.2.3.2. Lentes

Dado a que se requieren superficies ópticas de grandes dimensiones para el proceso de colección solar para iluminación, no es muy común que se empleen lentes de cristal como concentradores solares debido a que estos son de difícil manufactura y alto costo [18]. De todas maneras revisaremos brevemente la teoría concerniente a las lentes; en primer lugar analizaremos la ecuación del

constructor de lentes [36]

$$\frac{1}{f} = (n_{lente} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.44)$$

donde n_{lente} corresponde al índice de refracción de la lente, f es la distancia en la que enfoca la lente y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de sus superficies o intrfaces.

Lentes delgadas. Si el grosor axial de un lente es pequeño comparado con el radio de curvatura de su superficie, dicha lente es tratada como un lente delgado. Es el modelo más simple de lentes, el cual se caracteriza por proveer una ecuación bien conocida para la distancia de la imagen basada en la distancia del objeto y la longitud focal [54, 69]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (2.45)$$

donde o es la distancia al objeto, i es la distancia a la imagen y f es la distancia focal. La **longitud focal posterior** está definida como el punto en el que el eje óptico donde un rayo proveniente del infinito (un rayo paralelo al eje óptico) cruza el eje. La **distancia focal frontal** es el punto del eje donde cruza un rayo paralelo proveniente del espacio imagen.

Lentes gruesas. Si su grosor axial no es pequeño comparado con el radio de curvatura, entonces recibe el nombre de lente gruesa.

Lentes de Fresnel. Son lentes que se caracterizan por ser delgadas y ligeras, generalmente están fabricadas a base de plásticos, el más común de ellos es el acrílico. Su grosor paraxial es aún menor que en el caso de las lentes delgadas ya que su proceso de fabricación les permite tener ranuras cilíndricas que aproximan la superficie esférica de un lente sin tener el cúmulo de material no necesario entre ambas superficies del lente. Para fines de simulación y cálculos, los lentes de Fresnel se manejan como lentes convencionales (Fig. 2.14).

La propuesta de la presente investigación consiste en el uso de un lente de Fresnel como concentrador solar con fines de iluminación, razón por la cual dedicaremos la siguiente sección a ver un poco más a fondo el funcionamiento y características de los mismos.

2.2.4. Lentes de Fresnel

Está comprobado que el cúmulo de material existente entre 2 superficies refractivas no tiene ninguna utilidad, con excepción del hecho de incrementar la cantidad de pérdidas por absorción del material; los lentes de Fresnel están diseñados en base a reducir ese cúmulo de material al menor posible, debido a la extracción de cilindros coaxiales de material (Fig. 2.15). La superficie curva de cada ranura es la porción correspondiente de la superficie esférica original, trasladado hacia el plano superficial de la lente [37].

Los materiales más comunes para la construcción de lentes de Fresnel son:

- Acrílico ($n = 1.49$)

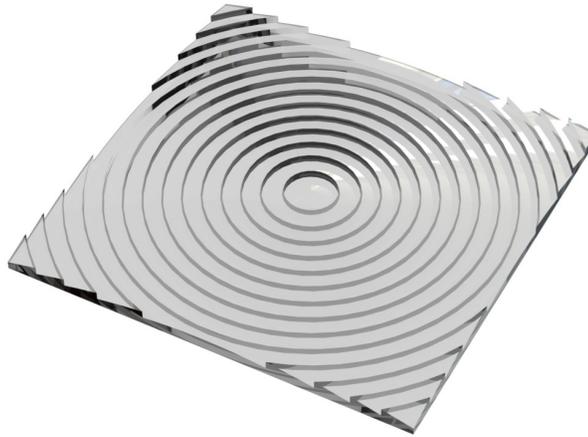


Figura 2.14: Lente de Fresnel de superficie cuadrada y con simetría radial.

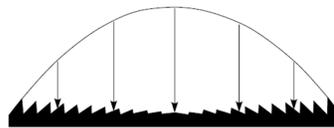


Figura 2.15: Representación pictórica de la construcción de un lente de Fresnel. Se observa como la curvatura de las ranuras que integran el lente de Fresnel logra integrar la curvatura de un lente convencional, reduciendo así la cantidad de material por el que debe viajar la luz en su interior [37].

- Vinil Rígido ($n = 1.54$)
- Policarbonato ($n = 1.586$)

Siendo el acrílico la opción más comúnmente utilizada para concentración solar, debido a que su transmitancia (Fig. 2.16) corresponde con la porción visible del espectro y, a diferencia del vinil y el policarbonato, no modifica el color de la luz del Sol.

2.2.4.1. Conceptos Básicos

En los lentes de Fresnel surge otro término llamado diámetro de apertura libre (CA), el cual nos relaciona la distancia focal con el $f^\#$, tal como lo hace el diámetro en las lentes convencionales, dicha relación está dada por:

$$f^\# = \frac{f}{CA} \quad (2.46)$$

donde f es la longitud focal efectiva.

La definición del diámetro de apertura libre en los lentes de Fresnel circulares es directa, ya que se trata del diámetro de dicho círculo, pero en el caso de los lentes cuadrados debe ser definido

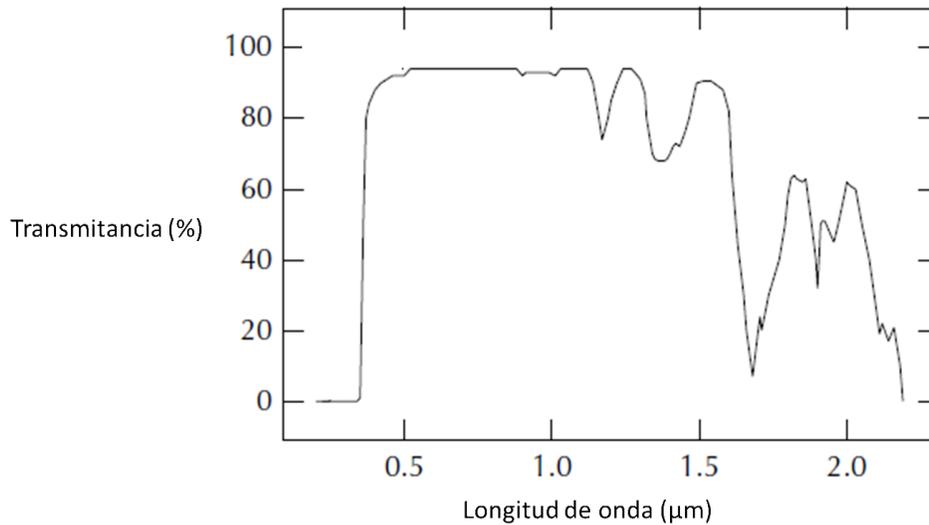


Figura 2.16: Transmitancia del Acrílico. En el eje x se observan las longitudes de onda en μm y en el eje y se encuentra su transmitancia porcentual para cada longitud [37].

como el diámetro que circunscribe al cuadrado, aunque en algunos casos puede adoptarse otra definición.

Existe la posibilidad de hacer un análisis matemático de los lentes de Fresnel a gran profundidad considerando todos los factores geométricos que intervienen en el mismo, no solo el $f^\#$, sino otros parámetros tales como el tamaño y ángulos de cada una de las ranuras que integran el lente, sin embargo, este tipo de análisis excede los límites del presente trabajo, para referirse a esta información puede consultar el trabajo de Arthur Davis [61].

Los lentes de Fresnel, por definición, provienen de una lente que debe poseer una curvatura esférica o asférica, por lo cual poseen los mismos parámetros básicos que una lente, como longitud focal y radio de curvatura y, en el caso de superficies asféricas, respetan la ecuación 2.33.

Los lentes de Fresnel pueden ser radial o cilíndricamente simétricos, es decir, pueden estar formados por secciones de cilindros huecos o por secciones longitudinales, sin embargo, para fines de colección se emplean los radialmente simétricos, por lo cual no se considerarán los otros.

Otro factor importante a considerar para caracterizar un lente de Fresnel es la frecuencia de las ranuras, es decir, cuántas paredes de cilíndricos huecos contiene el lente por unidad de longitud.

Además, en algunos análisis se necesita conocer la inclinación de las caras internas de las ranuras del lente, las cuales son conocidas como facetas inactivas [71].

Al final, gran parte de la matemática involucrada para el análisis de los Lentes de Fresnel se reduce a la matemática necesaria para analizar las lentes convencionales.

2.2.4.2. Usos de los Lentes de Fresnel

Entre los principales usos de las lentes de Fresnel destacan:

- Colector

- Colimador
- Condensador
- Magnificadores
- Formación de imágenes

Para los fines de este trabajo nos interesará emplear los lentes de Fresnel como un colector, el cual recibirá una fuente de luz colimada, el Sol, y la concentrará en un solo punto ubicado en el punto focal del lente [37].

2.2.4.3. Pérdidas en Lentes de Fresnel

Existen diversos factores que afectan la eficiencia de los concentradores solares de tipo lente de Fresnel, entre los cuales podemos destacar [5]:

- Las reflexiones del Fresnel en las interfaces aire/acrílico.
- Pérdidas producidas por las facetas sin utilizar en algunos de los ángulos formados por las ranuras del Fresnel.
- Esquinas de las ranuras redondeadas por defectos de fabricación en serie.
- Absorción del material.

Concluida la parte teórica concerniente a lentes de Fresnel, se dará una revisión rápida a los tipos de filtros espectrales que existen, todo con el fin de complementar la teoría de concentración solar con las técnicas para disipar los excesos de calor concentrados en los focos de los concentradores.

2.2.5. Colección de Luz y el Espectro Solar

Como ya se vió en la sección anterior, el espectro Solar comprende de $0.29\mu m - 2.5\mu m$, y parte de este espectro es truncado o disminuido por los componentes ópticos de los sistemas de colección solar, tales como el lente de Fresnel, los tubos de luz y la fibra óptica. Sin embargo, es posible encontrar en la literatura que, por cuestiones de disipación de calor o para evitar daños en los componentes, se hace uso de filtros que nos ayudan a separar la radiación solar en sus partes visible y no visible. Para esto se recomienda el uso de alguna de las siguientes alternativas [7, 33, 52]:

- **Filtros.** Generalmente son filtros a base de películas delgadas que funcionan como cavidades de resonancia óptica, atenuadores o absorbentes a ciertas longitudes de onda.
- **Espejos Calientes o “Hot mirrors”.** Espejos dieléctricos con filtro dicróico que reflejan la radiación infrarroja y transmiten la porción visible del espectro.
- **Espejos Fríos o “Cold mirrors”.** Espejos dieléctricos con filtro dicróico que transmiten la radiación infrarroja y reflejan la porción visible del espectro.

Con esto se termina todo lo concerniente a concentradores solares, la siguiente parte del capítulo se tratará sobre diversas guías de onda, sus características, usos y funcionamiento para de esta forma concluir todo lo relacionado con la parte óptica del sistema.

2.3. Fibras Ópticas, Lightpipes y Guías de Onda

En 1880 en Massachussets, el ingeniero Willam Wheeler patentó un esquema de tubos para la transportación de luz con la finalidad de iluminar edificaciones, desde este momento resultó obvio que el bulbo incandescente era ineficiente y, además, que la reflexión total interna era el medio más adecuado para el transporte de la luz [40].

Desde el punto de vista de la iluminación y la Óptica Anidólica, las fibras ópticas, los tubos de luz (o *lightpipes*) y las guías de onda son variaciones del mismo concepto, en cada caso se tiene un núcleo central transparente, generalmente con una sección transversal circular, rodeado por un revestimiento [7]. Todos son buenas opciones para redirigir la luz del Sol concentrada por sistemas de colección solar, gracias a que se pueden controlar y cuantificar las pérdidas del transporte de luz y, además el diseño estructural de los sistemas se ve altamente beneficiado [39].

2.3.1. Funcionamiento

Si bien es cierto que la teoría electromagnética, por medio de la solución de las ecuaciones de Maxwell y la ecuación de onda, nos permite conocer el funcionamiento de las guías de onda y la forma en que éstas propagan la luz [50], en esta sección se pretende abordar el funcionamiento de las guías de onda, fibras ópticas y tubos de luz desde la perspectiva de la Óptica Geométrica, considerando la reflexión total interna, dado que para los fines de este trabajo no nos interesa conocer tan a fondo el comportamiento ondulatorio.

Además, siempre que el diámetro de las fibras sea grande en comparación con la longitud de onda de la energía radiante, la naturaleza ondulatoria del mecanismo de propagación es de poca importancia, por lo que el proceso obedece las leyes básicas de la óptica geométrica [36].

Como ya se mencionó, las guías de onda ópticas (termino que engloba a las fibras ópticas y tubos de luz) están formadas, generalmente, por dos secciones [7, 40]:

- **Núcleo (core).** Es la sección donde viaja la luz, se caracteriza por estar compuesto de un material con un índice de refracción mayor que el revestimiento.
- **Revestimiento (cladding).** Como su nombre lo indica, reviste al núcleo; y se puede dar el caso de que el recubrimiento sea cualquier material con menor índice de refracción que el material del núcleo, incluso el aire.

Y es precisamente la existencia de esas dos partes en las guías de onda lo que da lugar a que se genere la Reflexión Total Interna (RTI), la cual es la base fundamental de que se dé el guiado de luz en las guías de onda [31]. El ángulo crítico en el cual se da esta condición viene dado de la misma manera en que se vio en la sección anterior 2.32.

Al igual que para los lentes, en el caso de las fibras ópticas, las guías de luz y los tubos de luz, es muy importante considerar el cono de apertura que se tiene, para así saber cuánta luz podrá captar nuestra guía. Sin embargo, por estar involucrados dos índices de refracción en nuestra estructura, en estos casos la ecuación de la Apertura Numérica queda como (Fing. 2.17) [31]:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.47)$$

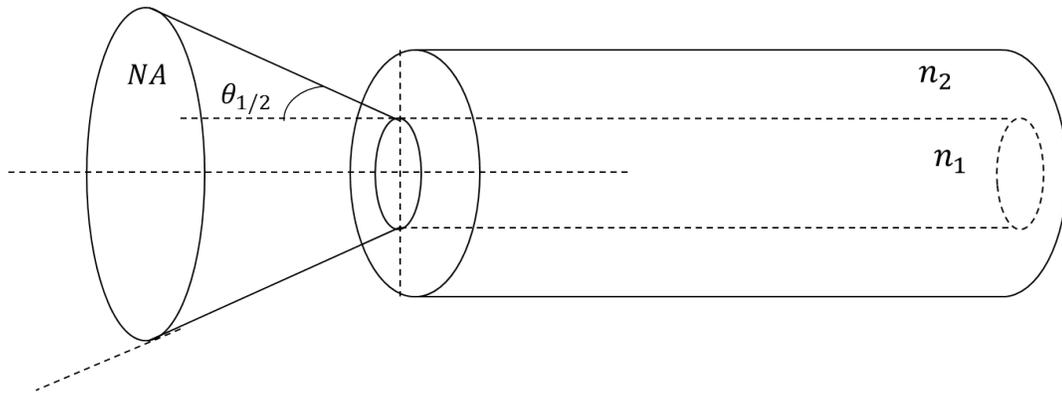


Figura 2.17: La imagen ilustra la estructura de las guías de onda y como se conforma la apertura numérica de las mismas.

2.3.2. Fibras Ópticas

La fibra óptica estándar consiste en un núcleo cilíndrico dieléctrico revestido por un material con un índice de refracción ligeramente menor (Figura 2.18). Considerando una vista transversal, su distribución de índices de refracción está dada por [31]:

$$n = n_1 \quad \text{para } r < a \quad (2.48)$$

$$n = n_2 \quad \text{para } r > a \quad (2.49)$$

Donde n_1 y n_2 representan respectivamente los índices de refracción del núcleo y del revestimiento y a representa el radio del núcleo.

2.3.2.1. Clasificación

El avance de las comunicaciones ópticas y el incremento de las aplicaciones de las fibras ópticas han logrado el diseño y fabricación de una amplia gama de fibras ópticas, a continuación se mencionan las más relevantes:

- **Fibras de Sílice para Telecom.** Son aquellas con la estructura núcleo-revestimiento anteriormente explicada y están fabricadas de Sílice. Se consideran el medio más importante de transmisión a larga distancia gracias a sus bajo ratio de pérdidas.

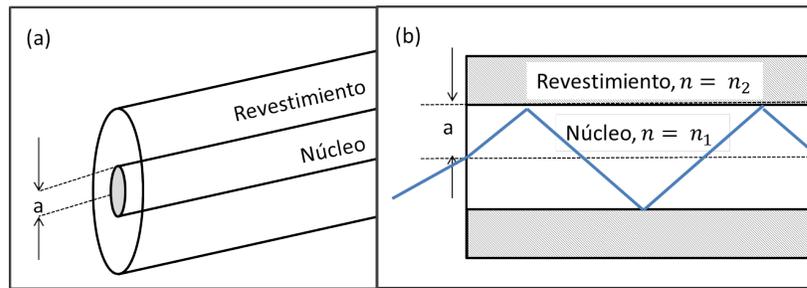


Figura 2.18: Fibra Óptica. Se observa la estructura de una fibra óptica estándar, donde a representa el radio del núcleo. (b) Corte longitudinal de una fibra donde se aprecia a la fibra como una guía de onda de 3 capas con sus respectivos índices de refracción [31].

- **Fibras dopadas de tierras raras.** Contienen en su núcleo tierras raras, tales como el Samario, el Yterbio y el Erblio.
- **Fibras de cristal fotónico.** Es una fibra con microestructuras que permite guiar la luz a través de huecos.
- **Fibras plásticas.** Tienen una estructura similar a las fibras de Telecom, con la diferencia de que están fabricadas a base de plásticos, no de Sílice.

En la década de los 80, investigadores japoneses desarrollaron colectores solares con fibras ópticas de vidrio, lo cual disparaba el costo de los sistemas a casi \$40,000.00 DLS, esto hizo ver que las fibras estándar no eran una opción económicamente viable para iluminación, por otro lado, las fibras ópticas plásticas ofrecían una cantidad razonable de pérdidas a un precio mucho más accesible [2, 39]. Este hecho nos lleva a estudiar un poco más a detalle lo concerniente a las fibras plásticas en la sección siguiente.

2.3.3. Fibras Ópticas Plásticas

Las fibras ópticas plásticas (FOP) están fabricadas de materiales plásticos como el polimetilmetacrilato (PMMA, $n = 1.49$), poliestireno (PS, $n = 1.59$), policarbonatos ($n = 1.51.57$), polímeros fluorados, y algunos otros, siendo el PMMA uno de los materiales más usados para estas fibras.

Las fibras plásticas comparten importantes características con las fibras de vidrio, tales como su inmunidad a la interferencia electromagnética y su capacidad potencial de transmitir señales ópticas a altas tasas. Sin embargo, poseen atributos propios, tales como [31]:

- Núcleos con diámetros del orden de milímetros
- Mayor flexibilidad
- Resistencia a vibraciones y golpes
- Un NA mayor que el de las fibras de vidrio

- Menor precio
- Mayor seguridad en su manejo

La característica de poseer núcleos de diámetros mayores que la fibra de vidrio resulta en una mayor facilidad para alinear y unir la fibra con otras fibras y otros componentes ópticos. Además, gracias a los materiales con que se construyen, tienen un NA mayor, dando como resultado que tengan una mayor capacidad de captación de luz [31].

Los atributos mencionados anteriormente son considerados algunas ventajas de la FOP, sin embargo esta también posee desventajas, tales como:

- Altas pérdidas en su transmisión
- Tolerancia baja a altas temperaturas ($80^{\circ} - 125^{\circ} \text{ C}$)
- No existen aún estándares para su fabricación y manejo
- Producción limitada

2.3.3.1. Métodos de Fabricación de FOP

Existen básicamente 2 métodos para fabricación de fibras plásticas [27]:

- **Método de Estiramiento.** Consiste en 3 pasos:
 - Purificación de los materiales iniciales. Se realiza en cámaras de ultra pureza.
 - Fabricación de la preforma con el perfil de índices de refracción deseado. Se puede realizar por diversos métodos como difusión, deposición de vapor químico, deposición axial en fase de vapor, polimerización gel y métodos de copolimerización.
 - Estiramiento. Después de hacer la preforma, la fibra es estirada a una temperatura entre $190^{\circ} - 230^{\circ} \text{ C}$, buscando no sobrepasar esta temperatura, ya que puede producirse la depolimerización. Un factor clave para la realización de la fibra durante este proceso es la tensión aplicada en la fibra, ya que si resulta muy ser muy alta, la fuerza de tensión realiza un adelgazamiento demasiado pronunciado del núcleo, el cual producirá pérdidas en el producto final. La forma tradicional para calentar la preforma para su estirado consiste en utilizar una resistencia eléctrica.
- **Método de Extrusión.** Se realiza extrusión sobre una preforma, se fabrica de la misma manera que en el método ya explicado, que a su vez es estirada para garantizar el diámetro deseado.

La principal diferencia entre el método de extrusión y el de estiramiento es que el primero utiliza un molde para garantizar la geometría, mientras que el segundo se fundamenta en las fuerzas de tensión ejercidas sobre la fibra.

Debido a la pureza requerida para disminuir pérdidas se acostumbra sintetizar los polímeros que se usarán para la fabricación por medio de polimerización masiva.

2.3.3.2. Pérdidas de Transmisión

En general, las fibras ópticas presentan atenuación en su funcionamiento, es decir pérdidas. Dichas atenuaciones o pérdidas se miden generalmente en decibeles. Si consideramos una potencia de entrada P_1 y una potencia de salida P_2 , es posible calcular la pérdida en decibeles que posee dicha fibra [31, 32]:

$$\alpha = 10 \log_{10}(P_1/P_2) \quad (2.50)$$

La Figura 2.19 muestra la atenuación existente en una fibra óptica de PMMA con núcleo de 1 mm de diámetro, la cual tiene pérdidas entre 90 y 490 dB/km [31].

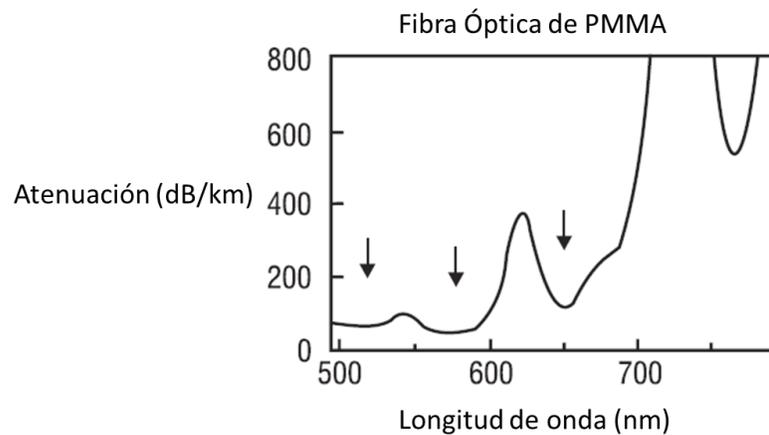


Figura 2.19: Las flechas indican las longitudes de ondas en las cuales se dan las pérdidas en una Fibra Óptica Plástica de PMMA con un núcleo de 1 mm de diámetro. El Eje x representa las longitudes de onda a las cuales se midió la atenuación existente la cual está representada en el eje y. Se observan 3 longitudes de onda a las cuales la atenuación se ve más acrecentada: 570 nm, 650 nm y 780 nm. [31].

Básicamente, para fines de iluminación, se pueden presentar pérdidas por 3 motivos [31, 32]:

- Absorción
- Acoplamiento
- Curvatura

Pérdidas por absorción. Se subdividen en pérdidas intrínsecas y extrínsecas. La absorción intrínseca es causada por la interacción de la onda de luz propagante con las partículas componentes del material de la fibra. Por otro lado, las pérdidas por absorción extrínseca son causadas por impurezas en el material, como iones de metales.

Pérdidas por acoplamiento. Las pérdidas por acoplamiento se pueden dar por 2 motivos. El primero de ellos es que los rayos que van viajando en el núcleo de la fibra pasen al revestimiento, donde es más fácil que se escapen, es decir, que se pierda una parte de la luz transmitida, estas pérdidas son conocidas como pérdidas radiativas.

Además, existen las pérdidas por acoplamiento con otros componentes, las cuales consisten básicamente en que los conos de apertura de la fibra y los otros dispositivos no coinciden, provocando así que parte de la luz transmitida no pase de un dispositivo al otro.

Pérdidas por curvatura. Se produce cuando la fibra se curva a tal grado que rompe las condiciones para la Reflexión Total Interna. En el caso de las fibras plásticas, como ya se mencionó, se tiene una mayor flexibilidad que en las fibras de sílice, por lo cual las pérdidas por curvatura (mejor conocidas como pérdidas por bending) son despreciables [31].

2.3.4. Guías de Onda y Tubos de Luz

A continuación se definen algunas variaciones de guías de onda empleadas en sistemas anidados y/o de iluminación.

Tubos de luz. Son muy similares a las fibras, aunque su revestimiento puede ser el aire y, en general, pueden ser fabricadas en materiales transparentes. Su geometría es generalmente cilíndrica.

Tubo Mezclador o “Mixing Rod”. Es una pieza larga de cuarzo claro, vidrio o plástico. La luz que entra en la cara de uno de los extremos tiene múltiples reflexiones totales internas y sale por la otra cara paralela, debido a las múltiples reflexiones la irradiancia a la salida resulta muy uniforme. Si el tubo está bien diseñado también puede resultar con una radiancia direccionalmente uniforme.

Los tubos mezcladores pueden tener cualquier forma, sin embargo, las caras planas hacen un mejor trabajo mezclando la luz para obtener la uniformidad a la salida.

Generalmente, sus dimensiones poseen una relación longitud-dimensión transversal de 10:1. Sus tamaños promedios son de 75 a 150 mm de longitud por lo que la cantidad de reflexiones que manejan es mucho menor que en una fibra, teniendo como resultado que las pérdidas no llegan a ser representativas.

Una variación de los tubos de luz y de los tubos mezcladores son cilindros huecos con interiores con acabados espejados que permiten la RTI en su interior.

Lo más destacable de todos los dispositivos anteriores, que pueden ser generalizados como guías de onda, es que poseen diámetros grandes, alrededor de un milímetro, ya que los diámetros menores no son recomendados para iluminación [7].

Básicamente, las aplicaciones de los tubos de luz, los tubos mezcladores y las guías de onda es su uso en sistemas de iluminación, para transmitir luz en secciones pequeñas donde el uso de la fibra óptica no es recomendable, debido a cuestiones de temperatura, costo o rendimiento.

Con la teoría expuesta sobre guías de onda damos por terminado el Capítulo 2, el cual concierne a todo el marco teórico necesario para estudiar y comprender este proyecto de investigación; ahora

procederemos a hacer uso de la teoría vista para hacer un análisis matemático y otro numérico del sistema de iluminación propuesto.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS MATEMÁTICO Y NUMÉRICO DEL SISTEMA

Después de haber analizado diversos conceptos de Radiometría y Óptica Geométrica, ahora contamos con el conocimiento suficiente para proponer un Sistema de Iluminación Natural y revisar, mediante un análisis numérico y otro matemático, cada una de sus partes, y así detectar todas las áreas de oportunidad del mismo.

El sistema propuesto tiene las siguientes características:

- Utiliza un lente de Fresnel, cuyas funciones son la colección y la concentración de la luz Solar
- Debido a que se espera tener grandes concentraciones de temperatura en el foco del lente, se usará una varilla disipadora de Borosilicato para disminuir la temperatura que llegue a la fibra óptica.
- Emplea una fibra óptica plástica de núcleo sólido y grande (superior a un milímetro) para transmitir la luz hacia los interiores de edificios.
- A pesar de que su fuente de iluminación es el Sol, no cuenta con un sistema de seguimiento solar automatizado.

Ya que hemos visto de manera general el sistema propuesto se procederá, durante las siguientes secciones, a hacer un análisis de las áreas que requieren un estudio detallado para, posteriormente, hacer los cálculos matemáticos y las simulaciones necesarias para conocer las tolerancias del sistema.

3.1. Planteamiento del Problema

La figura 3.1 nos muestra el Sistema de Iluminación Solar de Interiores propuesto para el presente trabajo, de dicha imagen es posible distinguir los principales aspectos que se abordarán para la mejora y optimización del sistema.

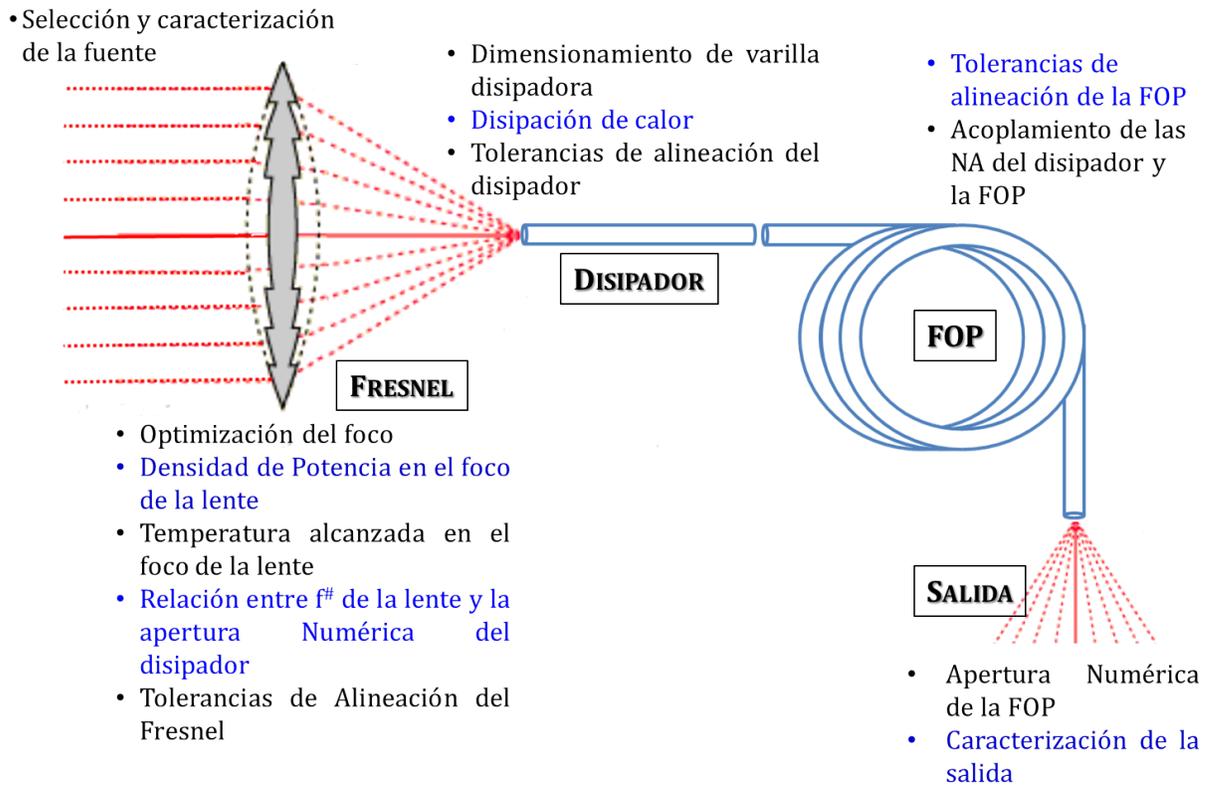


Figura 3.1: La imagen describe el sistema propuesto, el cual consta de una fuente, un lente de Fresnel, una varilla disipadora de calor y la FOP. Se describe brevemente cuales son las partes a analizar y mejorar en el sistema.

Las áreas señaladas en la figura 3.1 serán abordadas durante este capítulo por medio del análisis matemático y numérico de las mismas. Básicamente, se realizó un análisis radiométrico del sistema, un análisis del acoplamiento en base al número de apertura y ángulo medio de aceptación de cada componente y una revisión de las tolerancias angulares y de posición de los componentes en el sistema.

3.1.1. Caracterización del Sistema

Las siguientes secciones describirán análisis matemáticos y numéricos referentes al sistema mostrado en la sección anterior, con la finalidad de realizar dichos análisis es necesario conocer y caracterizar cada uno de los componentes de nuestro Sistema de Iluminación Solar. A continuación se describirán brevemente las características de los principales elementos del sistema:

- Fuente de iluminación.
- Óptica del sistema. Compuesta por el lente de Fresnel, el disipador y la fibra óptica plástica.

- Receptores. Cuando se realicen simulaciones se describirán este tipo de componentes y su importante rol en el análisis numérico.

Además de lo anterior, se dedicará un pequeño apartado a hablar sobre las unidades que se emplearán durante los capítulos 3 y 4.

Para la caracterización, los cálculos matemáticos y las simulaciones se usaron los parámetros físicos conocidos de los componentes con los cuales se cuenta en el laboratorio donde se llevará a cabo la implementación experimental.

3.1.1.1. Fuente

Para la realización de los modelados matemáticos y de los modelados numéricos fue necesario emplear 2 fuentes diferentes:

- **Fuente de radiación que incluye todo el espectro electromagnético.** Esta fuente se usará debido a que para los cálculos radiométricos se acostumbra considerar todo el espectro electromagnético.
- **Fuente D65 de la CIE.** Para el caso del análisis numérico se optará por usar la fuente D65, la cual es la recomendada por la CIE para la realización de cálculos y aproximaciones teóricas. Dicha fuente se caracteriza por ejemplificar el Espectro Solar promedio, por lo cual resulta una muy buena alternativa.

Como ya se mencionó, la constante solar tiene un valor entre $1353W/m^2$ y $1367W/m^2$ en la parte superior de la atmósfera. Sin embargo, es necesario hacer múltiples cálculos para conocer el valor exacto de la radiación solar incidente en la superficie terrestre, además, este valor varía según la posición geográfica, el día, la hora y las condiciones atmosféricas, por lo cual se aprovechará el trabajo realizado por el Biólogo Nasif Nahle [49], en cual calculó la radiación para Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León, la cual es nuestra locación actual, un día 28 de Abril del año 2011 a las 15:00 horas; dicha radiación fue de $563.341W/m^2$, por lo cual tomaremos la densidad de potencia de $560W/m^2$ como nuestro flujo de potencia base.

Otro factor importante a considerar de nuestras fuentes es que, dado que son aproximaciones teóricas a la radiación del Sol, sus rayos llegan paralelos entre sí y perpendiculares a nuestro sistema.

3.1.1.2. Óptica del Sistema

Nuestro sistema estará integrado por los siguientes componentes:

1. Lente de Fresnel.

- Geometría Cuadrada
- Radialmente simétrico
- Tamaño 11.25 pulgadas \times 11.25 pulgadas \approx 0.28 m \times 0.28 m

- Diámetro de apertura libre 15.90 pulgadas ≈ 0.40 m
 - Espesor 0.125 pulgadas
 - Distancia focal = 5 - 7 pulgadas
 - Material: acrílico ($n = 1.47 - 1.49$)
 - 25 ranuras por pulgada
 - Geometría de la lente y radio de apertura desconocidos, razón por la cual se harán simulaciones con *OSLO*[©] para conocer qué tipo de lente es y su radio de curvatura.
2. **Varilla disipadora de vidrio de borosilicato** ($n = 1.470$.) El siguiente componente óptico utilizado en el sistema es la varilla disipadora de borosilicato, esta varilla tendrá como función principal el disipar el calor concentrado y evitar pérdidas de luz, razón por la cual el material seleccionado es el borosilicato, ya que tiene alrededor de un 90 % a un 95 % de transmitancia [67]. Se probarán diversos tamaños, los cuales se especificarán en la sección donde se vayan a emplear.
3. **Fibra óptica plástica** [67, 71]
- Núcleo de PMMA ($n = 1.47 - 1.49$)
 - Revestimiento de polímero fluorado ($n = 1.418$)
 - Recubrimiento de teflón negro
 - Longitudes de 3.93 pulgadas ≈ 10 centímetros.
 - Radio del núcleo 4.5 milímetros ≈ 0.17 pulgadas
 - Radio del revestimiento 5 milímetros ≈ 0.19 pulgadas

3.1.1.3. Unidades

A menos que en algún apartado se indique lo contrario, durante todo el análisis matemático y numérico se establecerán las siguientes unidades como las básicas de este Sistema de Iluminación:

- Longitud - pulgadas (*in*)
- Área - pulgadas cuadradas (in^2)
- Potencia - watts (*W*)
- Ángulo Sólido - estereorradianes (*Sr*)
- Ángulos - grados ($^\circ$)

El uso de las pulgadas como unidad de longitud para las simulaciones y la implementación experimental se debe a que la mayor parte de nuestros componentes fueron adquiridos en Estados Unidos de América, por lo cual sus medidas ya venían especificadas en Sistema Inglés.

3.2. Análisis Matemático

La siguiente sección hace uso de los conceptos vistos en el capítulo anterior, en especial los referentes a Radiometría y a Óptica Geométrica, para revisar cada uno de los aspectos mostrados en el planteamiento del problema.

3.2.1. Modelado del Lente de Fresnel

Como varios autores lo mencionan [37, 46], un lente de Fresnel es una aproximación a una lente normal, razón por la cual necesitamos caracterizar nuestra lente de Fresnel para conocer cuál sería su homólogo en lente normal. Para dicho análisis fue empleada la ecuación del constructor de lentes (2.44), donde se consideró que el radio de curvatura de la primera superficie de la lente es infinito (∞), y buscaremos calcular el radio de curvatura de la segunda superficie del lente para una distancia focal $f = 6.0$ pulgadas, dado que el lente de Fresnel físico con que contamos nos ofrece una distancia focal entre $f = 6.0$ y 7.0 in; además, tomaremos en cuenta que el índice de refracción del acrílico, material del que está hecho el lente de Fresnel, es $n = 1.491$ [67], por lo tanto el radio de curvatura de la segunda superficie del lente queda como:

$$R_2 = -2.946in.$$

3.2.2. Análisis Radiométrico

Para esta subsección se aplicaron los conceptos relacionados con Radiometría para conocer un poco más de cómo se comporta la radiación del Sol a través del sistema de concentración solar. Es importante aclarar que todos los cálculos que se realizaron se basan en teoría relacionada a casos ideales.

3.2.2.1. Densidad de Potencia en el Foco

Aquí se aplicaron los conceptos básicos de Radiometría a un sistema óptico simple, como el mostrado en la figura 3.2, el cual es muy similar a la primera parte de nuestro arreglo, siempre y cuando partamos de la teoría de que una lente de Fresnel es una representación de una lente normal.

Si consideramos la ecuación de la radiancia (2.6), podemos calcular el diferencial de potencia que sale de la lente del sistema:

$$d^2\Phi = LdA_o \cos \theta d\Omega \quad (3.1)$$

donde tenemos que L representa la radiancia de la fuente, $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ el diferencial de ángulo sólido entre la lente y el receptor y el resto de los parámetros se muestran en la figura 3.2.

Integrando la ecuación 3.1 desde $\theta = 0$ hasta $\theta = \theta_0$, podemos obtener la cantidad de potencia que es colectada por el lente:

$$d\Phi = \pi L dA_o \sin^2 \theta_0 \quad (3.2)$$

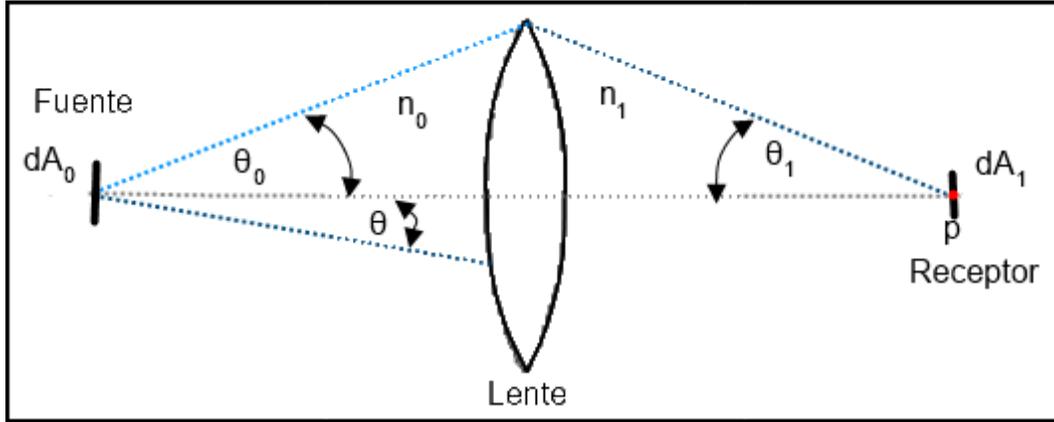


Figura 3.2: Esta imagen muestra un sistema óptico simple, el cual es constituido por una fuente, una lente y un receptor. Además, el gráfico describe los principales parámetros del sistema.

Ahora bien, usando la ecuación 2.5 y el resultado anterior, sabemos que la potencia que llega al diferencial de área dA_1 del receptor es la colectada por el sistema óptico:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{\pi L dA_0 \sin^2 \theta_0}{dA_1} \quad (3.3)$$

Reordenando el resultado anterior empleando términos de Óptica Geométrica y la Relación de Abbe (Eq. 2.38), cual nos resulta lo siguiente:

$$E = \pi \frac{L}{n_0^2} (NA)^2 \quad (3.4)$$

Para ajustar el resultado aún más a nuestro sistema y, siempre que consideremos que el receptor está colocado en la distancia focal del lente de Fresnel, podemos concluir que la potencia colectada por nuestro sistema en el foco del lente de Fresnel es:

$$E = \frac{1}{4} \pi L_{solar} \frac{n_0^2}{n_1^2} \frac{1}{f^{\#}} = \frac{1}{4} \pi L_{solar} \frac{n_0^2}{n_1^2} \left(\frac{CA}{f} \right)^2 (\times Sr) \quad (3.5)$$

donde L_{solar} corresponde a la radiancia solar recibida por el lente de Fresnel, n_0^2 y n_1^2 los índices de refracción de los medios, f la distancia focal del lente de Fresnel y CA el diámetro de apertura libre del lente de Fresnel. El resultado obtenido está dado por unidad de ángulo sólido, es decir, por estereorradián. De igual forma que la relación anterior, la Eq. 3.5 también corresponde a la condición mostrada en la Eq. 2.37 que se vió en el capítulo 2.

Si sustituimos los parámetros de nuestra lente de Fresnel en la ecuación anterior y, además, consideramos que nuestro sistema está en un medio rodeado por aire, es decir, que los índices de refracción son iguales a uno ($n_0^2 = n_1^2 = 1$), podemos calcular que la potencia en el foco del colector es:

$$E = \frac{1}{4} \pi \times L_{solar} \times \left(\frac{0.40m}{0.15m} \right)^2 = 5.522 L_{solar} (\times Sr)$$

La radiancia solar resulta de dividir la densidad de potencia del Sol entre el ángulo sólido subtendido entre el Sol y la Tierra, por lo cual se sabe que dicha radiancia varía de la misma manera que lo hace la densidad de potencia solar. Para obtener un dato aproximado, tomaremos el valor de $560\text{W}/\text{m}^2$ [49], con lo cual obtenemos la radiancia solar:

$$L_{solar} = \frac{E}{\Omega} = \frac{560 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{6.8 \times 10^{-5} \text{Sr}} \approx 8.235 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2 \text{Sr}} \quad (3.6)$$

Con lo anterior se concluye que la potencia en el foco puede alcanzar un valor de:

$$E = 5.522 \text{Sr} \times 8.235 \frac{\text{MW} \text{Sr}}{\text{m}^2 \text{Sr}} \approx 45.478 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$$

3.2.2.2. Concentración de Temperatura

El siguiente paso a estudiar es la cantidad de calor concentrado en el foco del lente de Fresnel, ya que como se mencionó anteriormente, una parte del espectro solar está formado por radiación térmica.

Para conocer el máximo de temperatura que es posible concentrar en el foco del lente de Fresnel podemos igualar la ecuación deducida en la sección anterior (3.5) con la relación de Stefan-Boltzmann (2.27), teniendo como resultado la siguiente ecuación [66]:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\pi L_{solar} n_0^2}{4 \sigma n_1^2} \left(\frac{CA}{f}\right)^2} \quad (3.7)$$

Si sustituimos todas las variables de dicha ecuación, las cuales ya son conocidas en nuestro sistema de colección solar, podemos encontrar que nuestro máximo de temperatura colectada es:

$$T = 5321\text{K} = 5048^\circ\text{C}$$

La cantidad de temperatura calculada es un **máximo** que se obtuvo considerando que no hay pérdidas en el sistema, sin embargo, la realidad nos muestra que:

- Parte del calor colectado se transfiere al medio
- El acrílico del que está hecho el lente de Fresnel filtra la radiación solar
- El acrílico absorbe una fracción de la energía que pasa a través de él
- Al usar la Ley de Stefan-Boltzmann consideramos que la radiación proviene de todo el espectro electromagnético y no sólo del espectro solar.

Es necesario resaltar que con el análisis radiométrico realizado, pudimos estimar cuanto es la densidad de potencia y la temperatura alcanzada en el foco de la lente de Fresnel, las cuales son cercanas a los valores reales si consideramos todas las pérdidas ya mencionadas.

Aquí se da por finalizado el análisis matemático desde el punto de vista radiométrico, ahora procederemos con la parte de Óptica Geométrica.

3.2.3. Análisis de Apertura Numérica

A continuación mostraremos el cálculo de la apertura numérica de cada uno de los componentes ópticos del sistema empleando las ecuaciones (2.35) y (2.47), posteriormente se revisará si existe o no un acoplamiento entre ellos al analizar los semi conos de aceptación de cada componente.

3.2.3.1. Apertura Numérica de la Óptica del Sistema

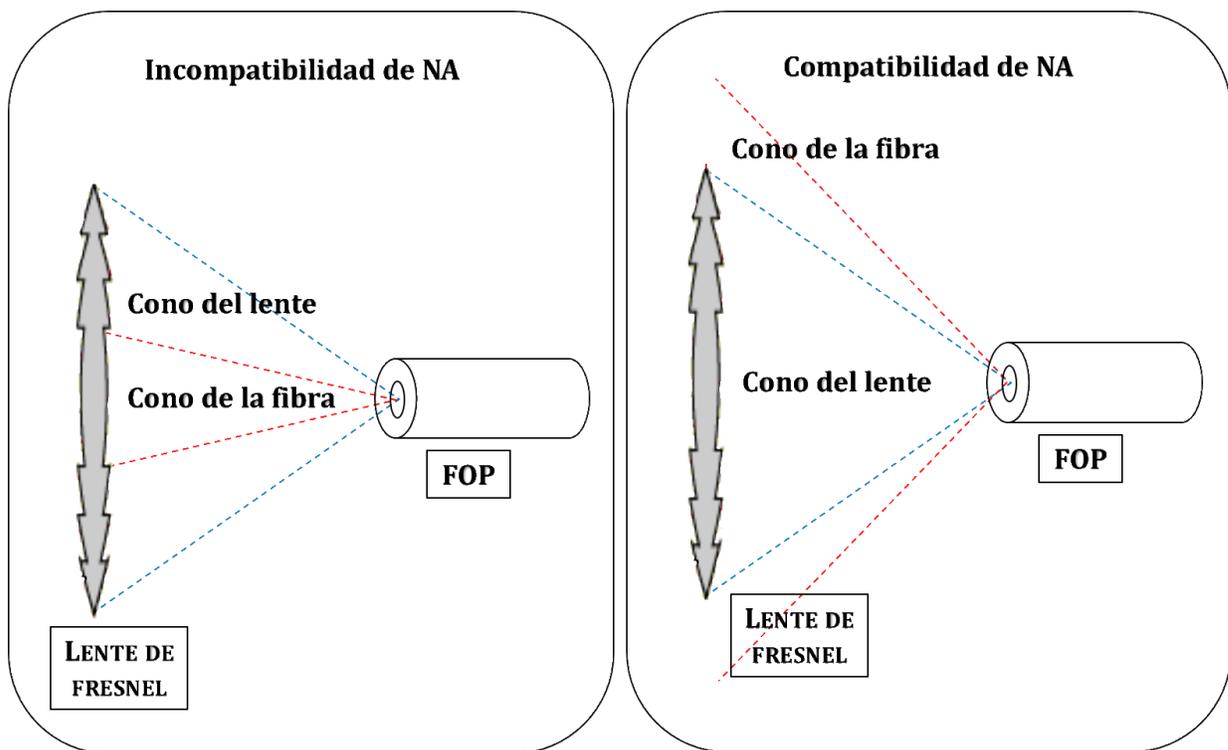


Figura 3.3: En el lado izquierdo de la figura se ilustra nuestro caso actual, donde el cono de la fibra es menor que el de la lente, por lo cual parte de la radiación colectada por el Fresnel se pierde; mientras que en el lado derecho observamos el caso ideal, donde el lente de Fresnel posee un cono menor, razón por la cual la FOP si puede aceptar toda la luz colectada por el lente.

La tabla 3.1 nos permite visualizar los valores reales de la apertura numérica de cada componente óptico y su correspondiente semi ángulo de aceptación, para así estudiar la compatibilidad del sistema.

Para el cálculo de la apertura numérica del lente de Fresnel es necesario considerar que la lente presenta una distancia focal entre 6 y 7 pulgadas, y además, por ser de geometría cuadrada, su ángulo máximo medio varía entre 52.974° y 38.784° .

En el caso del dissipador, matemáticamente no es posible obtener un ángulo máximo de salida, ya que al ser muy grande la diferencia entre el índice de refracción del silicato de boro y el aire, nos garantiza que siempre habrá reflexión total interna, sin importar el ángulo de incidencia de la luz y

Elemento	θ_{max}	NA
Fresnel	52.974° – 38.784°	1.190 - 0.933
Disipador	ND	1.077
FOP	27.230°	0.457

Tabla 3.1: Cálculo de las aperturas numéricas y de los ángulos medios máximos de los tres componentes ópticos de nuestro sistema de concentración solar. Las siglas ‘ND’ significan que no el seno inverso de dicha ángulo se indetermina.

que, básicamente, el disipador solo es una superficie intermediaria que no influye en la dirección de nuestro flujo de radiación (Fig. 3.4), es decir, que el ángulo que tenga la luz al entrar al disipador, será el mismo que tendrá al salir de él.

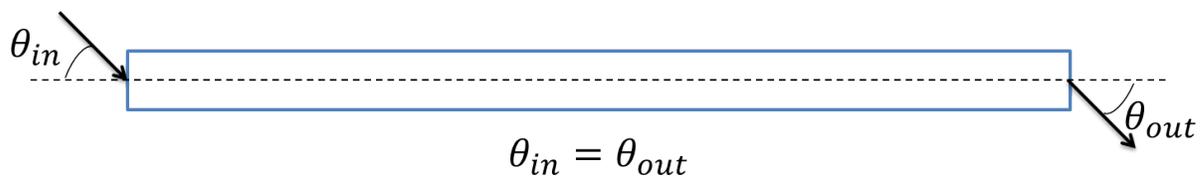


Figura 3.4: Como se puede observar en la figura, el ángulo con que incidan los rayos de luz provenientes del Fresnel en la varilla disipadora, será el ángulo con el cual saldrán de la misma.

3.2.3.2. Optimización del Sistema

Como se puede observar en la tabla 3.1, no existe un acoplamiento entre las aperturas numéricas de los componentes ópticos del sistema concentrador de luz solar, esto ocasionará que exista una pérdida entre lo que sale del disipador y lo que entra a la FOP, ya que las aperturas numéricas del lente de Fresnel y de la fibra no coinciden. Lo ideal sería que, en lugar de que el cono de aceptación de la FOP fuera menor que el cono de salida del Fresnel, ocurriera lo contrario (Fig 3.3). Para solucionar esto existen 2 posibilidades:

- Buscar un lente de Fresnel cuyo número de apertura nos permita obtener un ángulo que si empate con el ángulo de aceptación de la fibra.
- Buscar una fibra que posea un ángulo de aceptación mayor, para que así no es escape la luz.

Para la primera opción calcularemos el número f para un lente de Fresnel que tenga un ángulo menor a 27°:

$$f^{\#} = \frac{1}{2 \times \tan \theta_{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2 \times \tan 27^{\circ}} = 0.981 \quad (3.8)$$

Ahora consideramos la ecuación acerca del $f^\#$ (2.34), por lo cual tenemos que:

$$f = f^\# \times CA = 0.981 \times CA \quad (3.9)$$

Usando la ecuación anterior se construyó una gráfica que muestra las dimensiones que deberá cumplir nuestro lente de Fresnel para ser compatible con la fibra óptica plástica. Usando dicha gráfica (Fig. 3.5) podemos observar que si se desea seguir teniendo una distancia focal pequeña se tendrá que reducir a un 35% aproximadamente el diámetro del lente, lo cual representa una disminución del área de recepción solar, por lo que nuestro sistema perderá mucha potencia. Por otro lado, si deseamos conservar el área de recepción de radiación solar, nuestra longitud focal se ve incrementada hasta ser de alrededor de un 250%, lo cual implica que el sistema final tendrá un mayor tamaño y representará un mayor gasto de material en la construcción de la estructura.

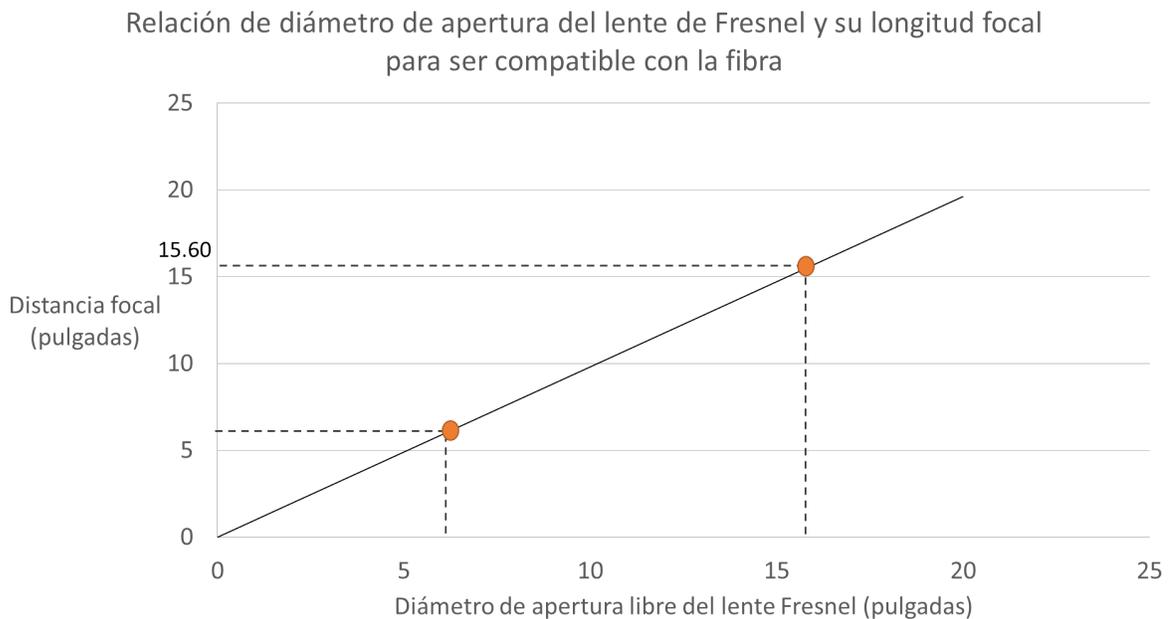


Figura 3.5: Diámetros de la lente de Fresnel con respecto a la distancia focal correspondiente para lograr un $f^\# = 0.981$.

Ahora, si se desea mantener el lente de Fresnel y modificar la fibra óptica plástica, será necesario encontrar alguna que posea la siguiente apertura numérica:

$$NA \geq \sin 53^\circ = 0.798 \quad (3.10)$$

Sin embargo, la mayoría de las FOP del mercado están hechas de los mismos materiales que la usada para este proyecto, por lo cual tendríamos que mandar fabricar nuestra fibra, lo que elevaría los costos. Otra alternativa es modificar uno de los extremos de la FOP, para así conseguir una apertura numérica diferente y, por consiguiente, un ángulo de aceptación distinto, pero este proceso excede los alcances de la presente propuesta [4].

Con esto se da por concluida la parte que comprende el análisis matemático del sistema, a continuación se procederá con la parte del análisis matemático, el cual comprende simulaciones usando los softwares de diseño óptico *OSLO*[©] y *ZEMAX*[©].

3.3. Análisis Numérico

Para la realización del análisis numérico del sistema se usaron dos programas de cómputo para simulaciones ópticas:

- *OSLO*[©] - Software Óptico para Diseño y Optimización
- Radiant *ZEMAX*[©]

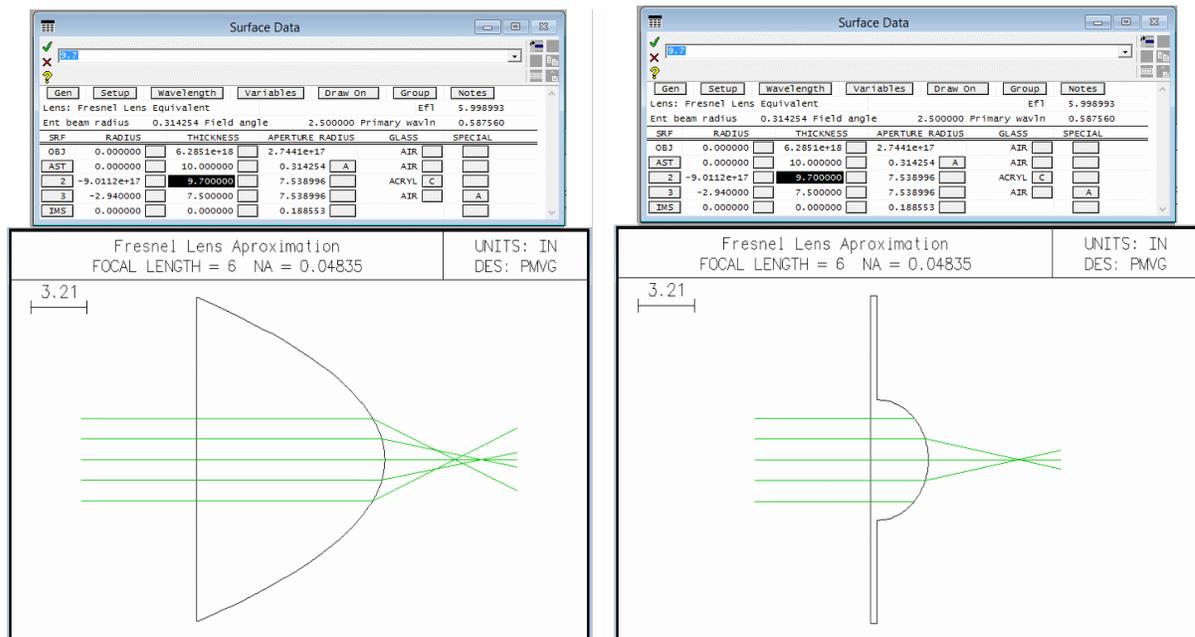
OSLO[©], al ser un Software especializado en el Diseño y Optimización de lentes, ofrece una alternativa ideal para la caracterización del lente de Fresnel como una lente normal; en general se aprovecharon sus herramientas para dimensionar lentes tomando como base una distancia focal deseada. Por otro lado, la potencia que ofrece *ZEMAX*[©] para la realización de simulaciones para Sistemas Ópticos No Formadores de Imágenes por medio del Modo No Secuencial, hace que este programa informático represente una herramienta indispensable para analizar la propagación de la energía radiante del sistema a través del Sistema de Iluminación Solar propuesto.

3.3.1. Modelado de la Lente Plano Convexa en *OSLO*[©]

Como ya se mencionó, *OSLO*[©] representa una excelente opción para modelar lentes, ya que ingresando valores conocidos como el índice de refracción del lente, su radio de apertura y su distancia focal, podemos obtener el radio de curvatura correspondiente.

Por medio de la función “Scal Lens to New Focal Length” de *OSLO*[©], se diseñó una lente Plano Convexa Asférica y otra Esférica que tienen como Radio de Apertura la mitad del Diámetro de Apertura Libre de nuestro lente de Fresnel (7.95 pulgadas), y que tienen la longitud focal del lente de Fresnel ($f \approx 6.0in.$) que tenemos físicamente en el laboratorio, por lo que obtuvimos como resultado dos lentes simuladas con un radio de curvatura $R = -2.940$ (Fig. 3.6), el cual se encuentra muy cercano al que se calculó realizado por medio de la ecuación del constructor de lentes (2.44). En la figura 3.6 es posible observar 2 lentes distintas, una con una curvatura esférica y otra con curvatura asférica. La curvatura esférica se rechazó como modelo probable para este sistema ya que el radio de apertura de la lente, es decir el radio de la lente de Fresnel, no puede exceder el radio de curvatura, y si lo hace, se formará un anillo externo plano en toda el área correspondiente al ‘exceso’ de lente, siendo esta sección incapaz de enfocar la luz incidente. En el caso de la lente asférica se consideró una curvatura correspondiente a una parábola ya que es una de las curvaturas más comunes, aquí podemos ver que en este caso la lente de Fresnel corresponde a una lente gruesa.

Gracias a la simulación se puede deducir que, a pesar de que el fabricante de la lente de Fresnel no nos brindó la información sobre su geometría, es posible deducir el tipo de curvatura de la lente: una lente asférica parabólica con un radio de curvatura de $R = -2.940$, el cual solo difiere por 6



(a) Lente esférica con distancia focal de 6 pulgadas.

(b) Lente asférica con curvatura parabólica y distancia focal de 6 pulgadas.

Figura 3.6: Diseño de dos lentes plano convexas normales diseñadas en OSLO para caracterizar la curvatura de nuestro lente de Fresnel que posee una distancia focal de entre 6.0 y 6.5 pulgadas. Como se observa, los parámetros de ambas lentes son los mismos, lo único que varía es que la primera corresponde a una lente esférica y la segunda a una lente asférica con curvatura parabólica. Resalta que la lente esférica no es una buena opción ya que parte de su área corresponde a la superficie plana que no enfoca la luz que incide sobre ella.

centésimas del obtenido en el análisis matemático y, al igual que en ese caso, se tomará únicamente el valor absoluto de dicho radio de curvatura.

Como se observa en la figura 3.6, *OSLO*® utiliza rayos para ilustrar el comportamiento de la luz dentro del sistema, pero en este caso lo hace sin tomar en cuenta la potencia de la fuente, además, hace el cálculo de la distancia focal para una longitud de onda específica, en este caso usamos la que ofrece el sistema de manera predeterminada, $\lambda = 0.587\mu m$, por otro lado, *ZEMAX*® nos permite utilizar fuentes con una determinada potencia y considerando una sola longitud de onda del espectro, varias longitudes o, inclusive, un rango espectral con una determinada distribución; por ende, el caso de *ZEMAX*® será necesario realizar la caracterización de la fuente antes de proseguir con las simulaciones.

3.3.2. Modelado de los Componentes en *ZEMAX*®

Todas las simulaciones que realizamos en este software de diseño óptico las hicimos en su modo “No Secuencial”, dado que es este el recomendado para el modelado y diseño de sistemas ópticos no formadores de imágenes. El modo no secuencial implica que el trazado de rayos se realizará en el orden físico en que se encuentren los componentes ópticos, dicho orden físico dependerá de la geometría del componente y la posición y ángulo del rayo de salida. Entre los componentes ópticos que se recomienda que se modelen empleando simulaciones en modo no secuencial se encuentran:

- Prismas
- Tubos de luz
- Arreglos de lentes
- Reflectores
- Lentes de Fresnel

Como puede observar los componentes principales de nuestro Sistema: lente de Fresnel, tubos de luz y fibras ópticas (vistas como componentes no formadores de imágenes, se consideran iguales a los tubos de luz), se encuentran entre la lista de componentes ópticos que se deben de modelar en el modo no secuencial [71]. Para la realización de las simulaciones en *ZEMAX*®, lo primero que debemos hacer es seleccionar los componentes principales de nuestro sistema, dimensionarlos y seleccionar uno o varios detectores según los fines de la simulación. Los 2 componentes que estarán presentes en todas las simulaciones serán la fuente y el lente de Fresnel, los cuales serán descritos a continuación.

3.3.2.1. Fuente

Se utilizó una fuente rectangular con las mismas dimensiones que nuestro lente de Fresnel, es decir, 11.25 pulgadas \times 11.25 pulgadas colocada a una distancia de 1 in. de la lente.

Dado que la densidad de potencia promedio que alcanza la superficie terrestre en Monterrey es $560W/m^2$, se debe entonces hacer el cálculo para determinar la cantidad de potencia incidente en nuestro lente de Fresnel:

$$\left(560 \frac{W}{m^2}\right) \left(\frac{1m^2}{1550in.^2}\right) (11.25in. \times 11.25in.) = 45.725Watts$$

Para el color de la fuente usaremos la fuente D65 Blanca que viene prediseñada como opción en el software, ya que es lo más cercano que podemos tener al espectro Solar sin tener que diseñar una fuente desde cero y, como se vió en el Capítulo 2, es la recomendada por la CIE (Comission Internationale de L'Eclairage - Comisión Internacional para la Iluminación).

Debido a que las simulaciones de modo no secuencial en *ZEMAX*® se realizan por medio de rayos generados de forma aleatoria, que en suma representan la potencia total de la fuente, la cantidad de rayos empleados para la simulación puede llegar a influir en la distribución espacial de la luz captada por los detectores, razón por la cual es recomendable usar entre 500,000 a 1'000,000 de rayos para tener una distribución más ad hoc a la realidad. Por otro lado, cuando se realicen múltiples simulaciones sucesivas es posible usar un menor número de rayos, alrededor de 20,000, para obtener resultados de manera rápida y, posteriormente, rehacer las simulaciones que tengan los mejores resultados ya con la totalidad de rayos.

Además de los rayos usados para hacer los cálculos radiométricos y fotométricos, *ZEMAX*® cuenta con la opción de mostrar una determinada cantidad de rayos para que visualmente se pueda ejemplificar el comportamiento de la radiación; en nuestro caso usaremos 100 rayos en todas nuestras simulaciones.

3.3.2.2. Lente de Fresnel

Para el lente de Fresnel aprovecharemos el componente no secuencial llamado "Fresnel 2", que representa un lente de Fresnel ideal, sus parámetros serán los siguientes:

- Inclinación en los ejes 'x', 'y' y 'z'.- 0°
- Material.- acrílico ($n = 1.491$)
- Altura radial (radio de apertura libre $\frac{CA}{2}$).- 7.950 in.
- Ancho medio en eje 'x'.- 0, se coloca cero para los casos en los que el Fresnel es radialmente simétrico.
- Grosor.- 0.125 in.
- ¿Es cilindro? 0, se usa este número para indicar que es radialmente simétrico.
- Radio (de curvatura).- 2.94

- Cónica.- -1 (parábola)

ZEMAX® sólo ofrece lentes de Fresnel con geometría circular, sin embargo, el lente de Fresnel con el que contamos posee una geometría cuadrada; por esto decidimos usar un lente de Fresnel circular que circunscribe el área cuadrada que tenemos en la realidad y para hacer más precisas las simulaciones modelamos la funete para que su área y geometria coincidan con las de la lente de Fresnel real.

El Fresnel descrito corresponde al que se uso para todas las simulaciones, a continuación describiremos cómo posicionamos la lente de Fresnel con respecto a la fuente.

3.3.2.3. Arreglo Fuente - Lente de Fresnel

En general, todas nuestras simulaciones tendrán como componentes iniciales la fuente anteriormente descrita y el lente de Fresnel. Como ya se mencionó, dependiendo de la cantidad de simulaciones que se planeen hacer es posible que la cantidad de rayos de la fuente disminuya, para así lograr una primera aproximación y, posteriormente, repetir la simulación con un mayor número de rayos, pero para un menor número de casos. La figura 3.7 muestra la primera parte de los arreglos experimentales de nuestras simulaciones en *ZEMAX*®.

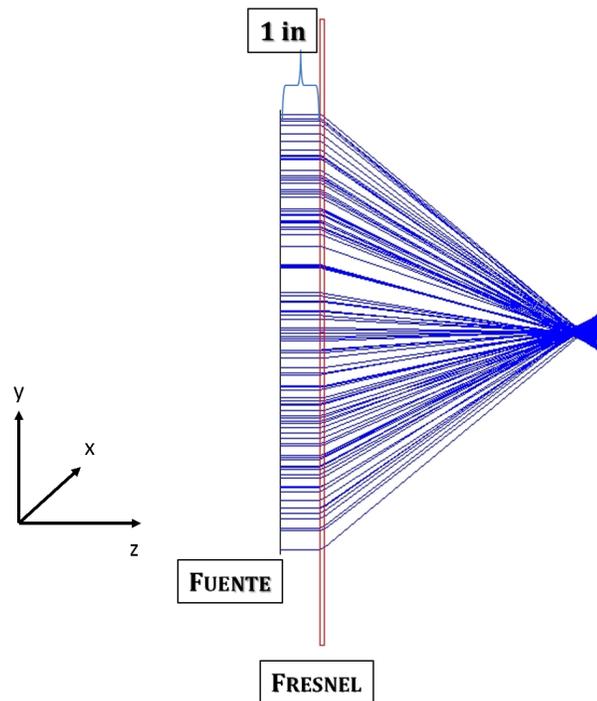


Figura 3.7: En la imagen se distingue la fuente con las características y dimensiones ya mencionadas, así como la lente de Fresnel previamente descrita. Entre ambos componentes existe una distancia de una pulgada, sin embargo esta distancia es para fines meramente ilustrativos, ya que sabemos que al salir los rayos paralelos de la fuente no nos afecta la distancia en la incidencia de la luz en la lente.

La distancia que se tiene entre la fuente y la lente es de una pulgada, sin embargo, esta no afecta debido a que los rayos salen paralelos de la fuente.

3.3.2.4. Varilla Disipadora de Borosilicato

Para modelar el disipador se hizo uso del componente 'Cylinder 2 Volume' con las siguientes características:

- Inclinación en los ejes 'x', 'y' y 'z'.- 0°
- Material.- pyrex ($n = 1.474$), es el nombre comercial del vidrio de borosilicato
- Radio.- 0.25 ó 0.19 pulgadas
- Longitud en 'z'.- 5.12, 6.30, 7.08, 7.87 ó 11.81 pulgadas

En las simulaciones correspondientes se describirán a detalle las dimensiones usadas para cada caso.

3.3.2.5. Fibra Óptica Plástica

Para simular la fibra plástica usamos 2 componentes del tipo 'Cylinder 2 Volume', uno dentro de otro. Las características de los cilindros son [67]:

- Núcleo
 - Inclinación en los ejes 'x', 'y' y 'z'.- 0°
 - PMMA
 - Radio de 0.177 pulgadas
 - Longitud en 'z' de 3.93 pulgadas ≈ 10 cm
- Revestimiento
 - Inclinación en los ejes 'x', 'y' y 'z'.- 0°
 - Material con índice de refracción de 1.418
 - Radio de 0.196 pulgadas
 - Longitud en 'z' de 3.93, 39.37 ó 396 pulgadas

Las longitudes del núcleo y del revestimiento siempre serán iguales, se usarán 3.93 pulgadas para ver el comportamiento del sistema sin considerar las pérdidas por longitud de la fibra, ya que nos interesa analizar a detalle las tolerancias de alineación y su efecto sobre el acoplamiento de los componentes, sin vernos afectados por las pérdidas de la FOP. Aún así, es importante mencionar que según la bibliografía y el fabricante de nuestra FOP, la fibra plástica tiene aproximadamente un 10% de pérdidas por metro de longitud.

3.3.2.6. Detectores

Según las necesidades que se tenga en cada sistema, es posible emplear diversos tipos de detectores, a continuación listamos los 4 existentes y describimos brevemente para que sirven [71]:

- **Detector de Color.** Detector plano rectangular que se emplea para guardar y mostrar los datos de la iluminación incoherente definidos por la respuesta de triestímulos, es decir, el color de la iluminación. Este detector puede mostrar mediciones de:
 - Irradiancia.
 - Intensidad de Potencia Radiante
- **Detector Rectangular.** Detector plano rectangular que puede detectar la luz incoherente así como la coherente. Está limitado a una forma en dos dimensiones. Sus posibles mediciones son:
 - Densidad de potencia incoherente
 - Densidad de potencia coherente
 - Intensidad Radiante
 - La radiancia con respecto a su distribución espacial
 - La radiancia con respecto a su distribución angular
- **Detector de Superficie.** Detector circular o anular con pixeles en direcciones radiales y angulares. Sólo puede almacenar radiación incoherente. Este detector tiene la capacidad de medir:
 - Densidad de potencia incoherente
 - Flujo incoherente
 - La radiancia con respecto a su distribución angular
- **Detector Volumétrico** Volumen rectangular que emplea voxeles para hacer las mediciones. Tiene como característica principal que puede ser superpuesto en otros objetos para detectar su comportamiento. El detector volumétrico almacena información sobre cada rayo que atraviesa cada voxel, tanto el flujo incidente del rayo como el flujo absorbido en él mismo.

Todos los detectores anteriormente mencionados, que tienen como resultado cantidades radiométricas, tienen sus equivalentes en cantidad fotométricas.

En todos los casos, debemos de seleccionar el “suavizado” que tendrá nuestra gráfica, la cual predeterminaremos en 8 para todas las simulaciones, ya que corresponde a un punto intermedio de suavizado. Además, debemos señalar su escala, la cual será lineal para todas nuestras simulaciones. También es necesario señalar si el detector reflejará, absorberá o retransmitirá la radiación captada, lo cual para nosotros será que la transmitirá en casi todos los casos.

Además, se definirá como resolución por defecto para todos nuestros detectores la cantidad de 600×600 pixeles.

Por último, es importante destacar que cada detector ofrece distintas vistas para los datos medidos y dependerá de cada simulación la vista que se seleccione.

3.3.2.7. Macros

ZEMAX® maneja un lenguaje de programación llamado “*ZEMAX*® Programming Language”, el cual se caracteriza por manipular los objetos de las simulaciones y extraer datos de las mismas de manera automática, permitiendo así realizar simulaciones desatendidas.

Durante el análisis numérico de nuestro Sistema de Iluminación se requirió hacer variaciones sucesivas de ciertos parámetros para poder encontrar los casos óptimos o detectar las tolerancias de alineación de los componentes, por lo cual se hizo uso de múltiples Macros para los distintos casos abordados.

En la sección de los Apéndices del presente trabajo es posible encontrar el código empleado para la realización de las simulaciones, además, cada sección del presente capítulo que requirió del uso de Macros lo especifica explícitamente indicando el nombre de la Macro empleada.

3.3.3. Optimización del Foco

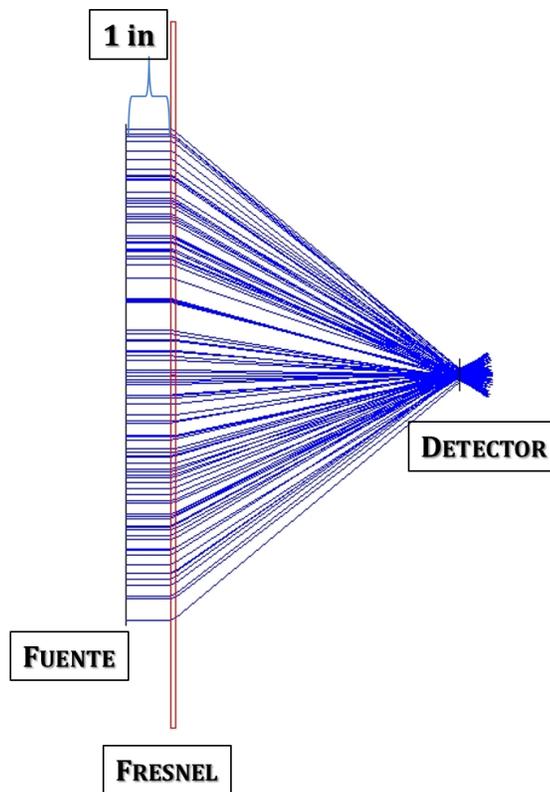


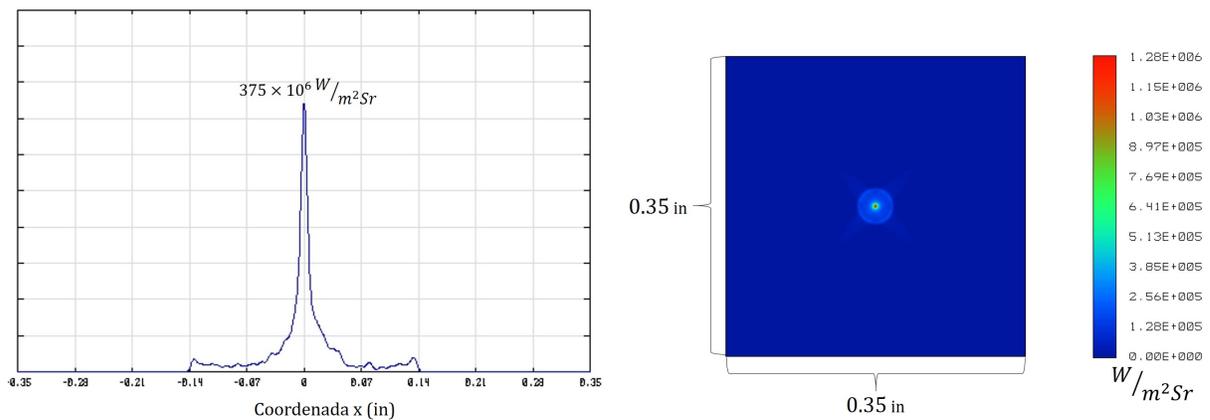
Figura 3.8: Arreglo experimental que se utilizó para encontrar el foco óptimo del Fresnel.

El lente obtenido de la simulación anterior en *OSLO*® nos ofrece una opción ideal de un lente con distancia focal de 6 in. que no toma en cuenta aberraciones y que está diseñado para una longitud de onda específica, $\lambda = 0.587\mu m$. Dado que se pretende obtener una simulación más

apegada a la realidad es necesario conocer cuál es la longitud focal que nos ofrece el lente de Fresnel que posee las características de curvatura del lente modelado en *OSLO*®.

Además, ya que usaremos el método no secuencial de diseño óptico de *ZEMAX*®, se sabe que habrá ligeras modificaciones en la longitud focal debido a que emplea una técnica distinta para el trazado de rayos.

La finalidad de la simulación será encontrar la distancia en la cual la mancha focal sea más pequeña y que, a la vez, conserve el mayor porcentaje de potencia con respecto a la fuente; de esta manera se intentará garantizar que el siguiente componente óptico que se introduzca al sistema recibirá un flujo máximo.



(a) Vista de la distribución espacial de la potencia captada por el receptor. (b) Gráfica de la sección transversal horizontal de la mancha focal.

Figura 3.9: Vistas del detector para la optimización del foco, se busca encontrar la mancha focal más pequeña posible que tenga a la vez, la mayor captación de potencia.

El detector medirá la radiancia existente en la salida y nos calculará la potencia total captada por el detector. Para analizar los datos usaremos 2 vistas del detector, la distribución espacial de la potencia y la gráfica de la sección transversal horizontal de la misma. La primera vista se usará con la finalidad de observar la distribución del flujo en el área del detector y, gracias a la segunda vista, podremos cuantificar de una manera más clara en ancho de la mancha focal (Fig. 3.9).

3.3.3.1. Primera Aproximación

Para obtener una primera aproximación se realizarán las simulaciones que consistirán en:

1. Fijar el arreglo Fuente - Fresnel predeterminado para las simulaciones (Fig. 3.7).
2. Determinar el número de rayos para el análisis a 20,000.
3. Colocar un detector rectangular de 0.35 pulgadas \times 0.35 pulgadas a 6.125 pulgadas medidas desde la primera superficie del Fresnel (Fig. 3.8).

4. Usar la macro 'FresnelFoco1.zpl' para mover el detector 0.1 pulgadas sucesivamente hasta llegar a una separación de 6.825 pulgadas del Fresnel.
5. Revisar resultados obtenidos y seleccionar el mejor rango para la siguiente simulación.

De la primera aproximación se obtuvo que el rango óptimo en que se podía situar el detector para captar la mayor cantidad de radiación en la menor área posible es de **6.425 a 6.525 in**, logrando colectarse entre un 87.8 y un 88.4% de la potencia en manchas focales con diámetros entre **0.22 y 0.30 in**.

3.3.3.2. Segunda Aproximación

Ahora que se tiene el primer rango para la aproximación, se repetirá el algoritmo anterior pero se harán los siguientes cambios:

- El detector cambiará su tamaño a 0.25 pulgadas \times 0.25 pulgadas.
- La cantidad de rayos de la fuente se incrementará a 500,000.
- Se colocará el detector a 6.4 pulgadas medidas desde la primera superficie del lente de Fresnel.
- Se usará la macro 'FresnelFoco2.zpl' para mover el detector en incrementos de 0.01 pulgadas, hasta llegar a una distancia de 6.65 pulgadas del lente de Fresnel.

El ancho de la mancha fue registrado y graficado para encontrar el rango óptimo para la ubicación del foco (Fig. 3.10), el cual se fijará entre 6.41 y 6.47 pulgadas, siendo 6.45 pulgadas el valor que se tomará por predeterminado para las simulaciones siguientes, a pesar de que el mejor resultado en cuanto al tamaño de la mancha se encontró en 6.42 pulgadas y la mejor potencia captada se ubicó en 6.47 pulgadas; sin embargo, decidimos tomar un valor aproximado, ya que al momento de alinear en la implementación experimental será difícil tener mucha precisión y 6.45 in es una medida intermedia entre nuestros valores óptimos.

La potencia detectada en este rango de distancias focales se mantuvo entre un 74.2% y un 81.0%, dicho porcentaje disminuyó debido al decremento en el área del detector. Además, se sabe que existirán pérdidas en nuestro sistema debido a la absorción de radiación por parte del Fresnel y a las aberraciones del foco, las cuales provcan que no toda la radiación llegue al detector y, además, que la macha focal no sea puntual. La gráfica 3.11 muestra como fue variando la potencia colectada durante la simulación.

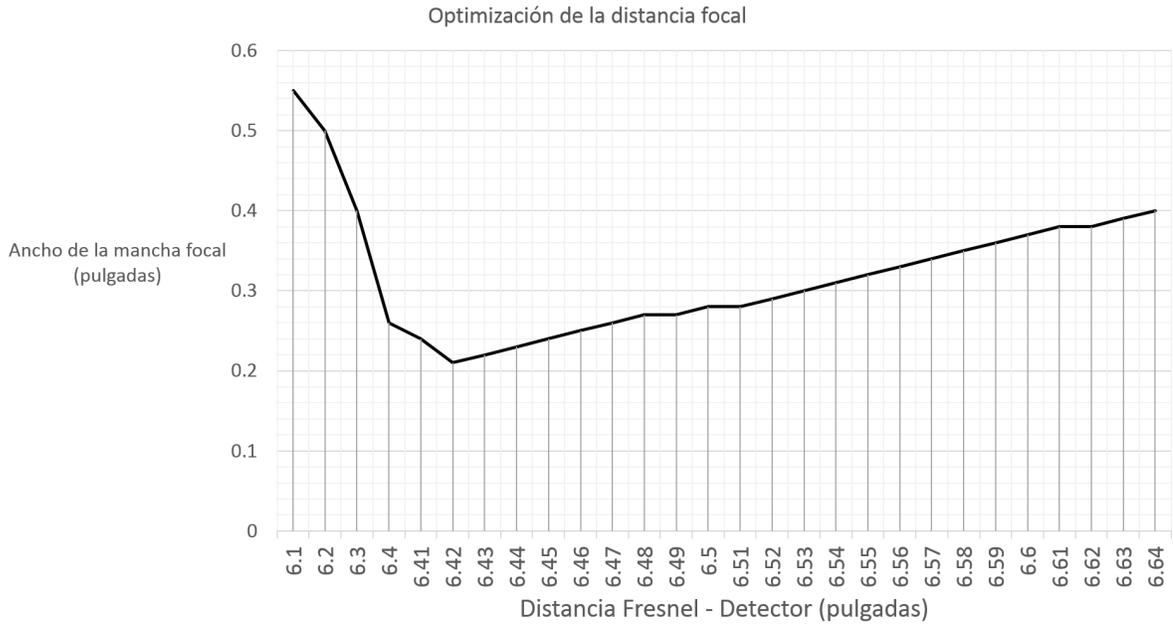


Figura 3.10: Tamaño de la mancha focal respecto a la distancia existente entre la primer superficie del Fresnel y el detector.

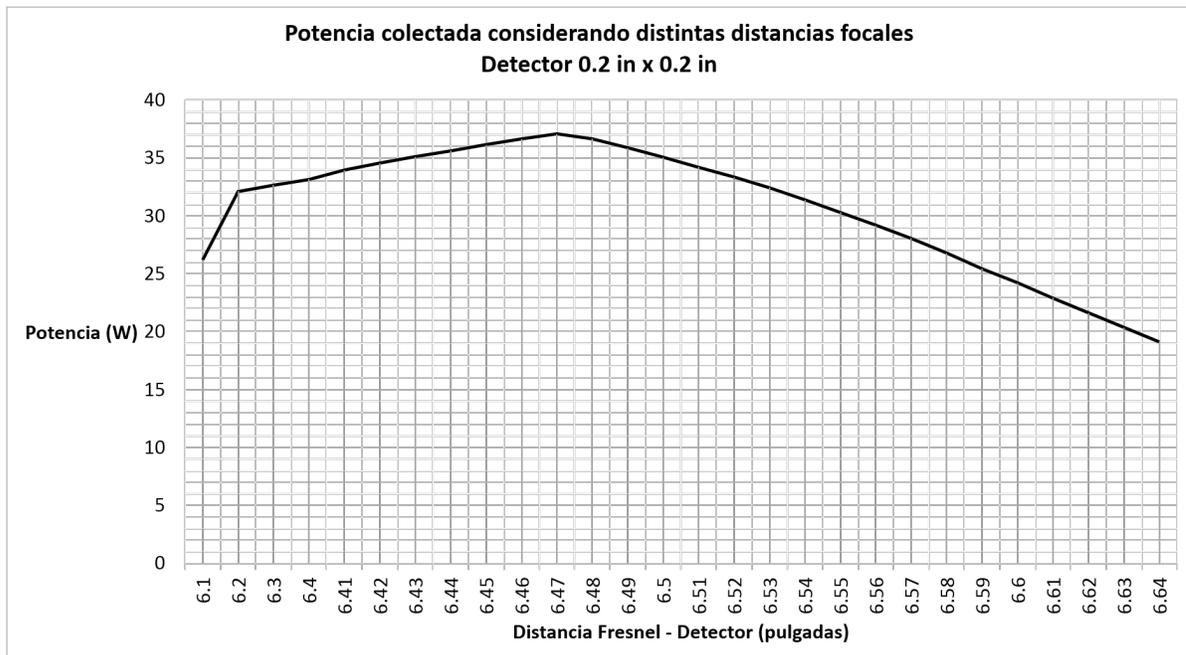


Figura 3.11: Potencia detectada con respecto a la distancia existente entre la primer superficie del Fresnel y el detector de 0.2×0.2 in.

3.3.4. Densidad de Potencia del Lente de Fresnel

Ya se tiene una distancia focal aproximada para nuestra lente de Fresnel que será usado en las simulaciones, ahora requerimos saber cuánta energía llega al receptor en esa distancia y cómo es su distribución, para esto realizamos una simulación bajo el mismo esquema propuesta en la sección previa, tal como lo indica la figura 3.12. Para ello se uso:

- Se uso un detector de 2 pulgadas \times 2 pulgadas para lograr captar la mayor cantidad de potencia.
- Se usaron 1'000,000 de rayos en la fuente para la simulación.
- El detector se situó a una distancia de 6.45 pulgadas del Fresnel (Fig. 3.12).
- Se emplearon dos vistas para el detector, la primera corresponde a la distribución espacial de la mancha focal, mientras que la segunda a la sección trasnversal de la distribución angular de la mancha focal.

Los resultados de esta simulación (Fig. 3.12) nos muestran que tendremos una mancha focal con una incidencia del **86.58 %** (39.59 W) con geometría circular, la cual tendrá su mayor pico de concentración en el centro y, además, poseerá ligeras desviaciones en la distribución en forma de petalos en las diagonales de la mancha. El resultado obtenido aquí resultó mayor que el obtenido en la simulación anterior, lo cual se debe a que incrementamos la cantidad de rayos de la fuente, lo que representa un resultado más real y con una mejor distribución espacial.

También, se logró observar que la mancha focal esta compuesta por rayos que inciden en el detector con un semi ángulo máximo de 43° con respecto a la normal del detector.

3.3.5. Dimensionamiento de la Varilla Disipadora

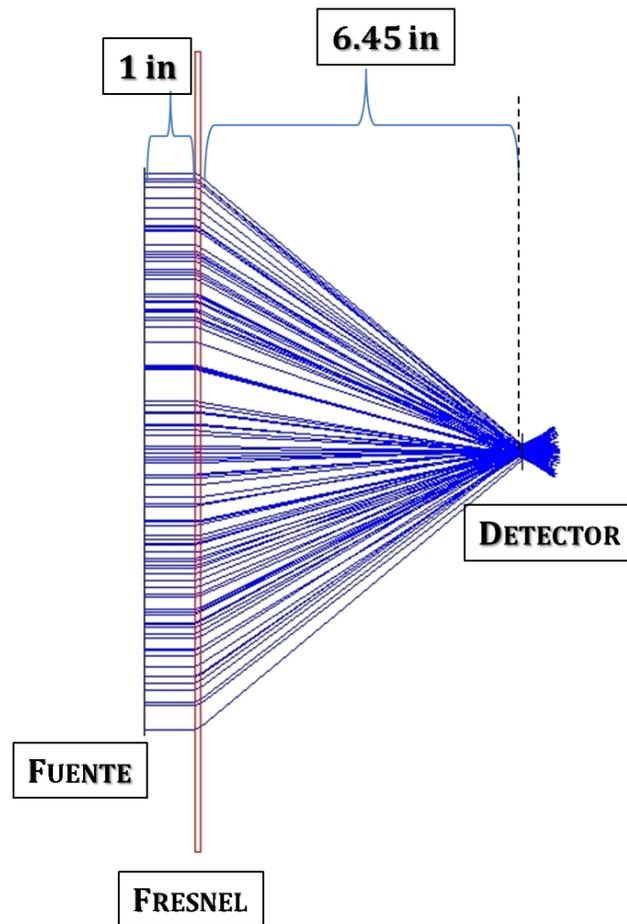
Para esta sección consideramos el siguiente componente en nuestro sistema, el disipador, dicho disipador será una varilla de Borosilicato que tendrá como función el disminuir la cantidad de calor concentrado en el foco de la lente, para así disminuir la temperatura con que incidirá la radiación en la fibra.

Sabemos que la varilla disipadora de vidrio es básicamente un tubo de luz, por lo que el comportamiento del flujo de luz dentro de la misma corresponderá a una serie sucesiva de reflexiones debido a la RTI.

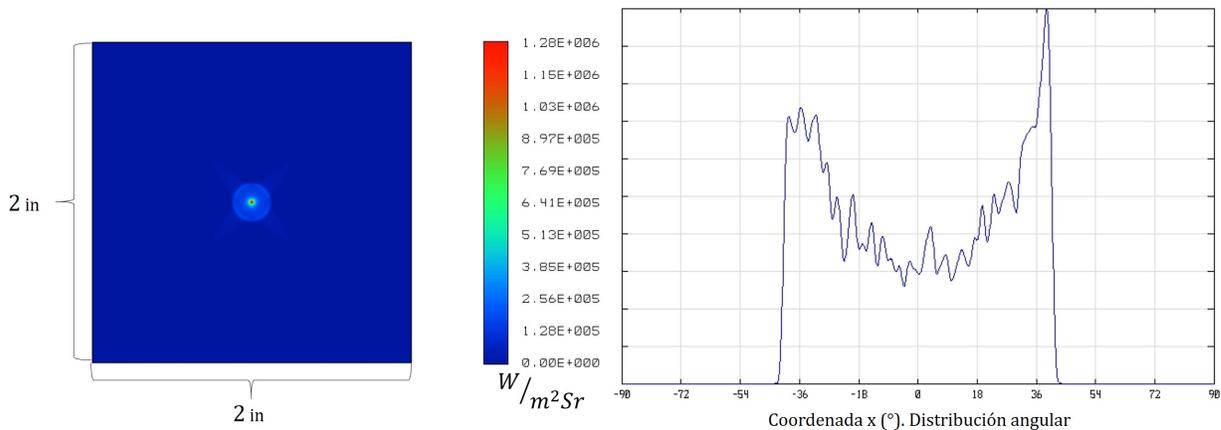
El sistema fue complementando colocando una varilla disipadora de vidrio a 6.45 pulgadas del lente de Fresnel (Fig. 3.13).

Para comprobar lo anterior se colocó un detector volumétrico en el interior de una varilla de 0.25 pulgadas de radio y 5.12 pulgadas de longitud con las mismas dimensiones que la varilla, para así poder ver el flujo dentro de la misma (Fig. 3.14), con esto se mostró claramente el fenómeno de RTI que se da en el intetior de la varilla y, a su vez, se reafirma la idea de que el ancho de la mancha de salida dependerá de la longitud del disipador.

Además de la simulación anterior realizaremos una simulación más para poder seleccionar una varilla. Primero veamos la tabla 3.2 que contiene las dimensiones disponibles de varillas y sus



(a) Arreglo usado para la caracterización de la densidad de potencia del lente de Fresnel



(b) Distribución espacial de la mancha focal.

(c) Distribución angular de la mancha focal.

Figura 3.12: Arreglo usado para la simulación empleada para caracterizar la mancha focal del lente de Fresnel. La primera vista del detector nos muestra su distribución espacial, mientras que la segunda despliega la gráfica de la sección transversal horizontal de la distribución angular de la mancha.

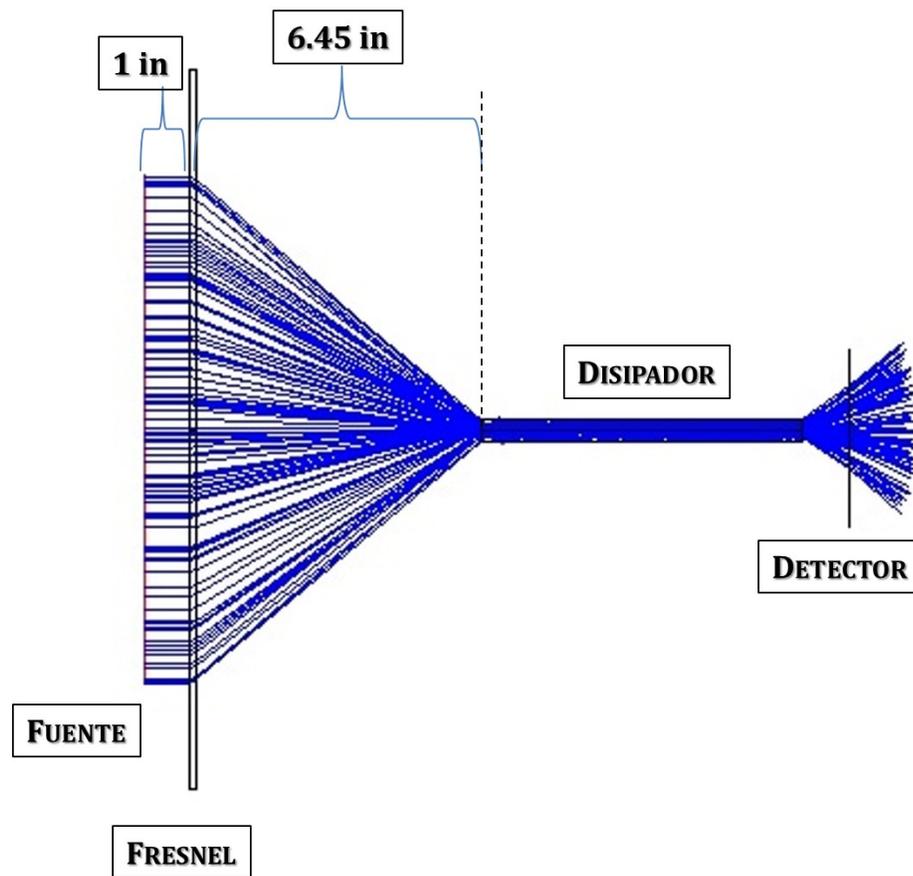


Figura 3.13: La imagen contiene el arreglo que incluye la varilla disipadora de vidrio, la cual se colocó a 6.45 pulgadas de la primera interfaz del lente de Fresnel.

potencias al ser colocadas a 6.45 in del Fresnel, para esto último se debe considerar que la potencia a la entrada de las varillas fue medida en 9420.8 W.

La Tabla 3.2 describe que los disipadores con el mismo radio permitirán transmitir la misma cantidad de luz, mientras que el disipador con menor radio captará una cantidad menor. A pesar de que ya podemos considerar concluyentes estas pruebas, realizaremos más simulaciones para descartar por completo la varilla de vidrio de menor radio.

3.3.5.1. Selección por Tolerancia Espacial en 'z'

Para corroborar la conclusión de que todas las varillas de borosilicato de igual diámetro permitirán pasar prácticamente la misma cantidad de luz, y buscando encontrar la varilla que permita pasar un mayor flujo de luz, se realizó una simulación desplazando cada uno de los disipadores a lo largo del eje 'z' para analizar como se ve afectada su potencia de salida.

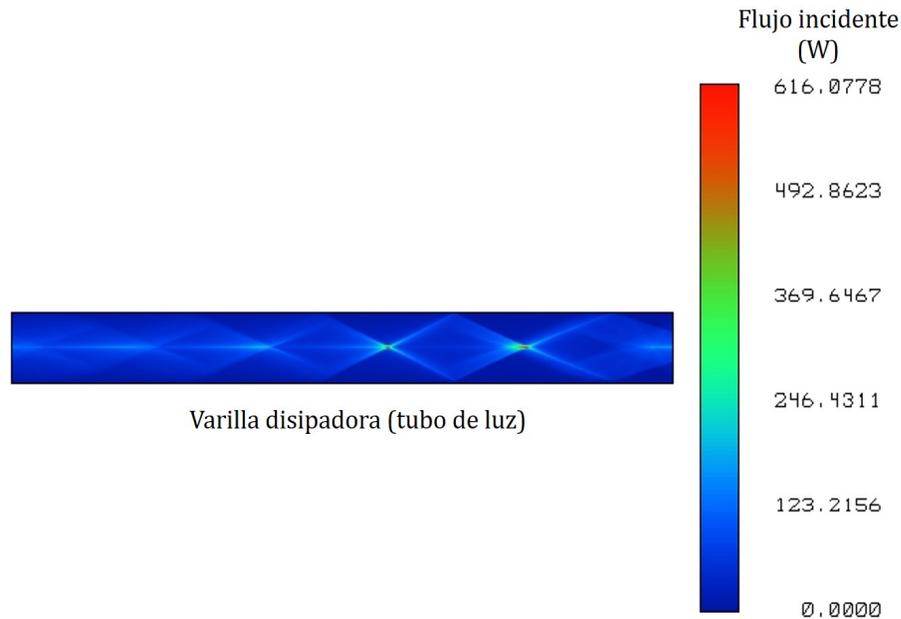


Figura 3.14: Flujo de radiación a lo largo del disipador de vidrio. Los rayos hacen múltiples reflexiones en el interior de la varilla, generando variaciones en el tamaño de la distribución de salida.

Los pasos realizados para esta simulación fueron:

1. Usar el arreglo Fuente - Lente considerado para todas las simulaciones, cambiando la potencia de la fuente a 10,000 watts, por si existen variaciones muy pequeñas en los resultados, evitar que sean truncadas por redondeo.
2. Agregar una varilla con las dimensiones dadas por el 'Pyrex130', descrito en la tabla 3.2, a 6.40 pulgadas de la primera interfaz de la lente de Fresnel.
3. Colocar un detector rectangular de 0.25 pulgadas \times 0.25 pulgadas a 0.15 pulgadas de la terminación de la varilla. El detector muestra la potencia medida y su distribución en el espacio, así como la gráfica de la sección transversal horizontal de la mancha de salida.
4. Utilizar la macro 'Disipador.zpl' para mover el disipador 0.05 pulgadas cada iteración hasta llegar a 6.75 pulgadas de distancia entre el Fresnel y la varilla. La macro, además, hace el cambio a la siguiente varilla de la tabla 3.2 y realiza de nuevo los desplazamientos.

La gráfica mostrada en la figura 3.15 muestra que las varillas de 0.25 pulgadas de radio son más tolerantes a desalineaciones en el eje 'z', además, es posible observar que aunque existe un rango de distancias en el cual la varilla de 0.19 pulgadas de radio capta una mayor cantidad de energía, también se observa que por ser tan pequeño este rango será difícil alinear el disipador en esos puntos, por lo que generalmente captará menos luz de la que nos permiten captar las varillas más gruesas.

ID	Longitud (in)	Radio (in)	Potencia (W)
Pyrex130	5.12	0.25	7,829.6
Pyrex160	6.30	0.25	7,829.6
Pyrex180	7.08	0.25	7,829.6
Pyrex200	7.87	0.25	7,829.6
Pyrex300	11.81	0.19	7,440.4

Tabla 3.2: Dimensiones de las varillas de borosilicato disponibles para la implementación experimental. A cada varilla se le puso un 'ID' para hacer más fácil su distinción.

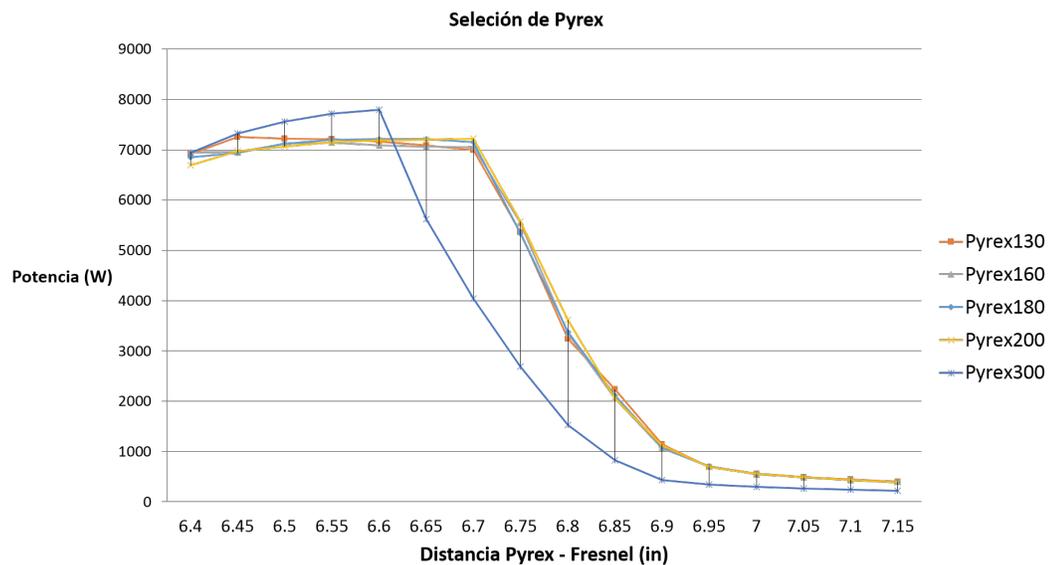


Figura 3.15: Potencia de salida con respecto a la distancia del disipador a la lente. Es posible observar como el disipador de menor radio, a pesar de tener un rango de mejores resultados que los otros, es mucho menos tolerable a las alineaciones, teniendo un rápido decaimiento de la potencia.

3.3.5.2. Tolerancias Espaciales en 'x' y en 'y'

Se realizó una simulación para ver las tolerancias espaciales en el eje 'y', pero no se realizó para 'x' debido a que tenemos una simetría radial, para poder descartar por completo la varilla con menor diámetro. En este caso se realizó un procedimiento muy similar al anterior, con la diferencia de que los desplazamientos se dieron en el eje 'y', avanzando 0.1 pulgadas con respecto al eje axial del sistema hasta llegar a 0.5 pulgadas. Los resultados obtenidos se ilustran en la gráfica 3.16. Es posible observar como el disipador de menor radio es mucho menos tolerable a las desalineaciones, teniendo un rápido decaimiento de la potencia. También se muestra como va variando la

distribución espacial de la salida del disipador ‘Pyrex 130’.

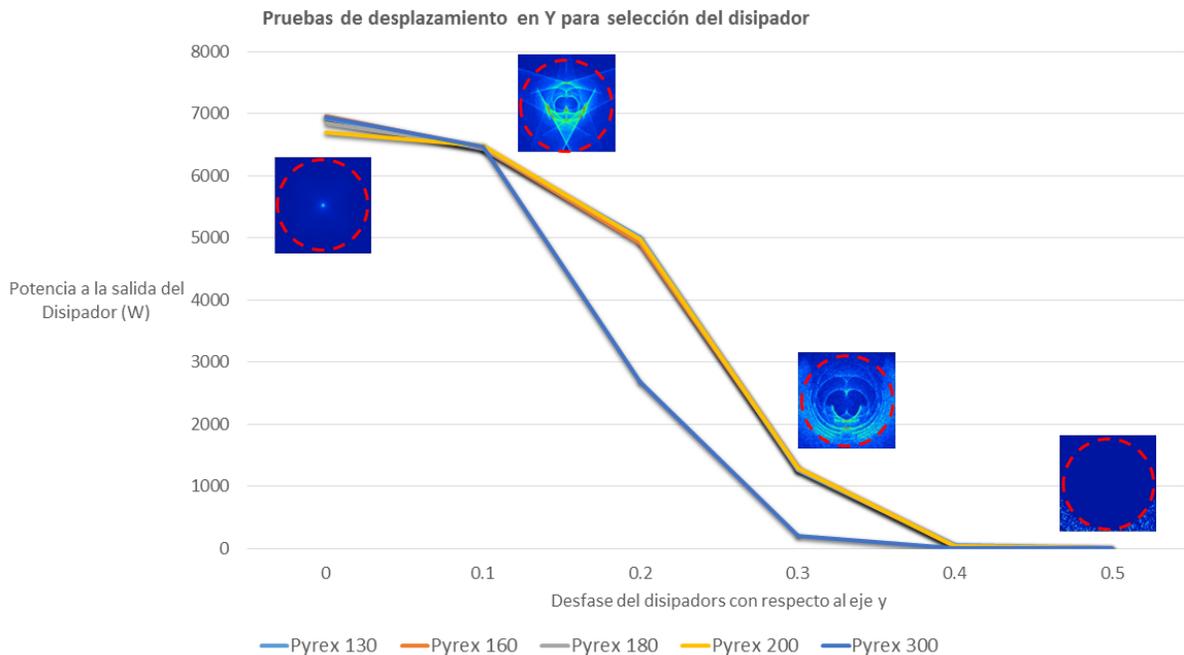


Figura 3.16: Potencia y distribución de salida respecto a la distancia entre el eje axial y la varilla en pulgadas. Las líneas punteadas rojas indican la posición del disipador.

A partir de estas simulaciones se logró encontrar que, como era de esperarse, todos los disipadores con el mismo radio tienen un comportamiento casi idéntico y, a su vez, que el disipador con radio menor es menos tolerable a la desalineación espacial en cualquiera de sus ejes, si bien existen picos en su capacidad de captación por encima de la gráfica de los disipadores más gruesos, sigue siendo una opción más favorable el uso de las varillas gruesas ya que es muy pequeño el rango en el cual la varilla de 0.19 pulgadas de radio tiene una mayor captación. A partir de aquí se descarta el uso del disipador de radio de 0.19 pulgadas.

3.3.5.3. Caracterización de la Salida

Finalmente, para seleccionar un disipador para usar en nuestras simulaciones caracterizaremos la salida de los 4 disipadores restantes, para así seleccionar el que nos ofrezca una mejor opción. Para esto revisaremos la distribución espacial y angular de los mejores resultados obtenidos, a una distancia de 6.45 pulgadas del Fresnel, de cada uno de los disipadores de radio de 0.25 pulgadas de radio.

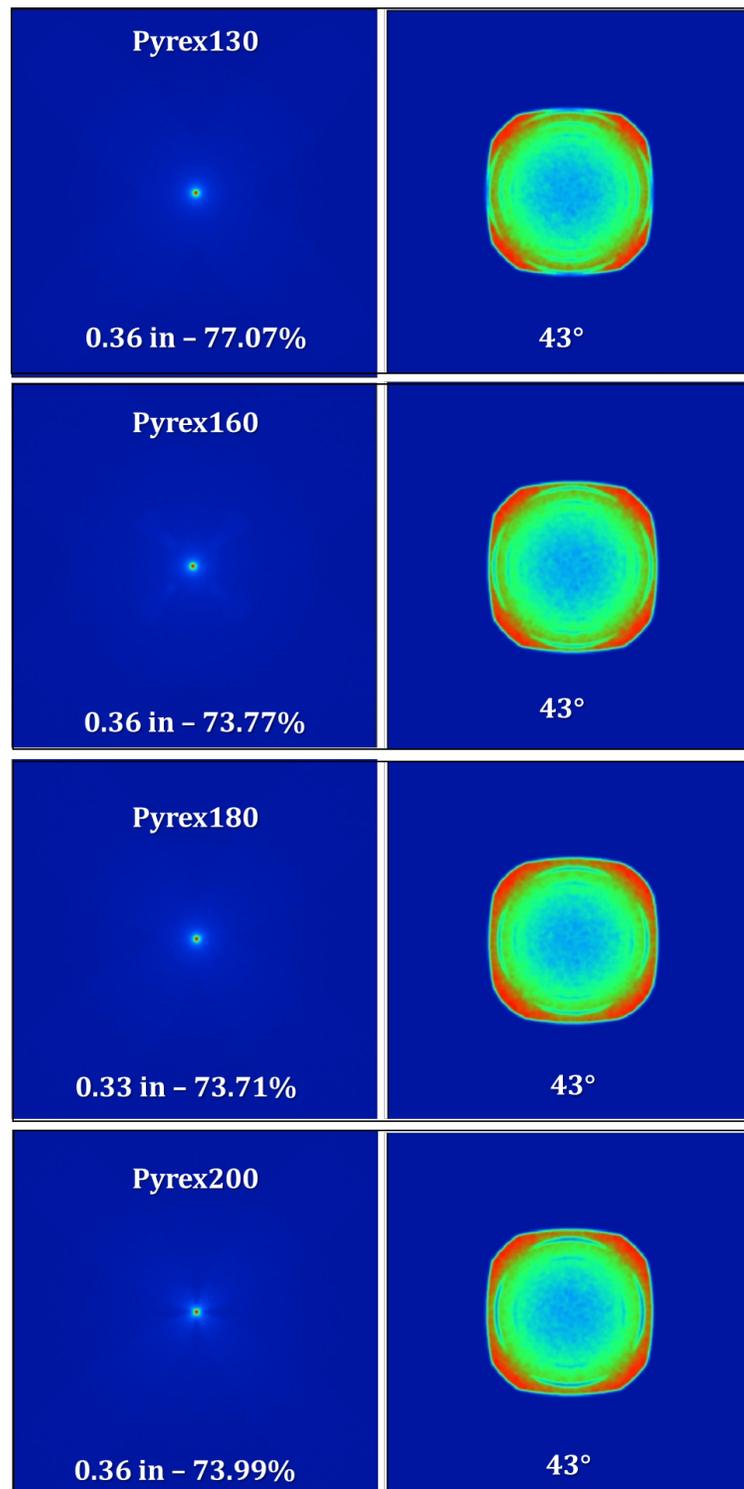


Figura 3.17: Caracterización de la salida de las varillas de borosilicato. Las imágenes nos muestran cada uno de los disipadores de 0.25 pulgadas de diámetro, su distribución espacial (imágenes izquierdas) indicando el 'ID' del disipador, el diámetro de su mancha de salida y su porcentaje de potencia de salida con respecto a la entrada; mientras que del lado derecho se describe la distribución angular, es decir, el semi cono máximo de salida.

Al analizar los resultados de la figura 3.17, podemos ver que los resultados de porcentajes de potencias de salida son muy similares, aunque destaca el dissipador de menor longitud, pero en el tamaño de las manchas de salida resulta el ‘Pyrex180’ el que tiene un mejor resultado. Debido a que las diferencias de potencia son muy pequeñas y nos interesa más el garantizar que la salida del dissipador se dirija a la FOP, seleccionaremos el ‘Pyrex180’ como nuestro dissipador para el resto de las simulaciones.

Los factores clave que nos harán elegir entre un dissipador de determinada longitud en la implementación experimental, por encima de otro, serán su capacidad para disminuir la temperatura del sistema y su acoplamiento con la fibra, es decir, el tamaño de su mancha de salida.

3.3.6. Inclusión de la FOP al Sistema

El siguiente paso consistió en incluir un trozo de fibra óptica plástica de 3.93 pulgadas (Fig. 3.18) a nuestro sistema, ya teniéndolo completo se procedió con las pruebas de tolerancias de la FOP, así como la caracterización de la salida. Para este arreglo se utilizó a una potencia de 45.725 W, ya que en la sección anterior empleamos una potencia de 10,000 W.

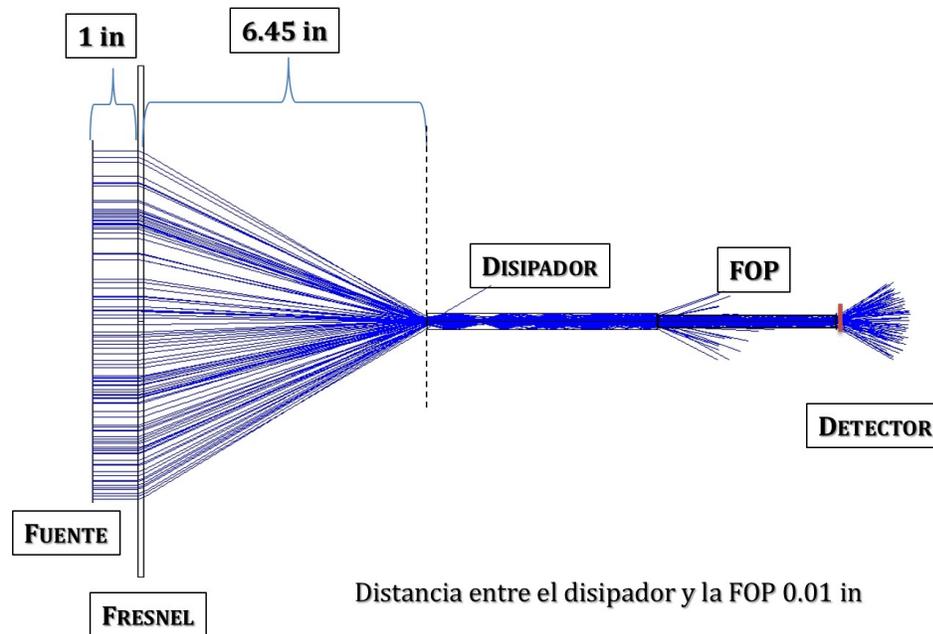


Figura 3.18: Arreglo experimental que incluye la fuente, el lente de Fresnel, el dissipador de borosilicato y la fibra óptica plástica.

3.3.6.1. Tolerancias de Alíneación Espacial de la FOP

La primera prueba que se realizó fue el desplazar la fibra 0.1 pulgadas desde una distancia de 0.01 pulgadas del dissipador, hasta 2.51 pulgadas de distancia, para esto se usó la macro ‘FOP-Mov.zpl’, la cual hace el desplazamiento al mismo tiempo que guarda imágenes de la distribución

espacial de la salida de la FOP y contienen la información de la potencia total de salida. Tanto para esta simulación, como para la siguiente, se tuvieron 1'000,000 de rayos provenientes de la fuente.

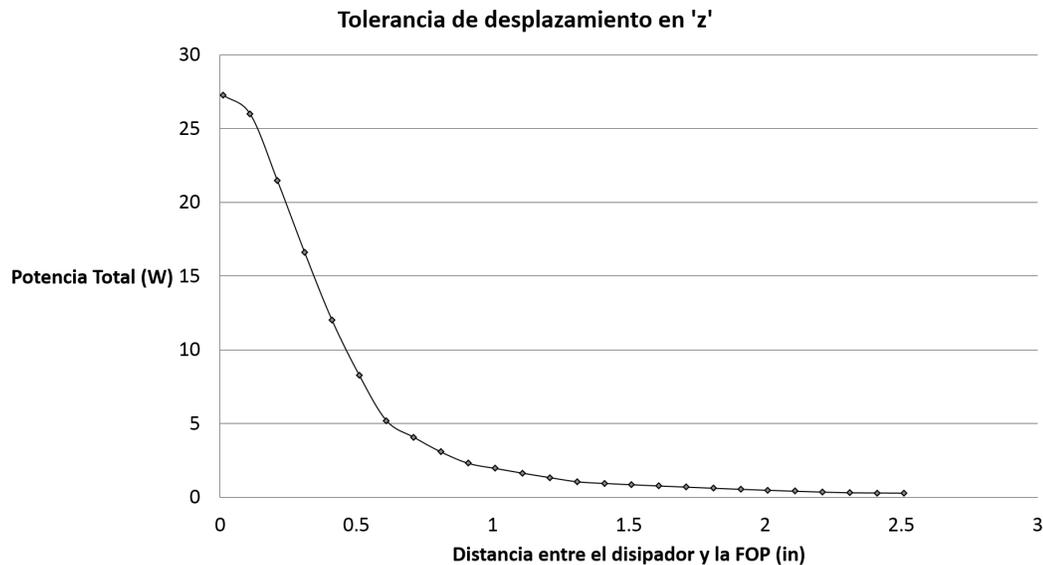


Figura 3.19: Tolerancias espaciales del desplazamiento de la FOP en el eje 'z'. El eje 'x' muestra el desplazamiento de la fibra por el eje z en pulgadas, mientras que el eje 'y' indica la potencia capturada en el detector.

De acuerdo a los resultados plasmados en la gráfica 3.19, se observa que la tolerancia espacial de la FOP sobre el eje 'z' es muy reducido, siendo altamente recomendable el posicionar la FOP pegada al disipador para evitar estas pérdidas, lo cual presenta la desventaja de que se deba asegurar que la temperatura disipada en la varilla de vidrio se encuentre dentro de los rangos de temperatura tolerados por la FOP.

Posteriormente se revisaron las tolerancias de desalíneamiento espacial en 'y', de igual forma que en el caso anterior, no se realizaron en 'x' ya que contamos con simetría radial. Para revisar estas tolerancias de desplazamiento se hizo uso de la macro 'FOPMovY.zpl', la cual es responsable de desplazar 0.1 pulgadas la fibra del eje axial, hasta alcanzar una separación de 1.5 pulgadas.

Como se puede observar en la figura 3.20, es muy crítica la alíneación de la fibra óptica con respecto a los ejes 'x' y 'y', ya que con una desalíneación de 0.1 pulgadas tenemos alrededor de un 15% de pérdidas, y, posterior a esa distancia, las pérdidas se incrementan y alcanzan valores por encima del 50%.

3.3.6.2. Caracterización de la Salida

Ahora solo nos resta analizar la salida obtenida de la fibra, para conocer la potencia final de salida, su distribución espacial y su distribución angular, para esto revisaremos la salida obtenida para los casos en que no tenemos desalíneamiento alguno.

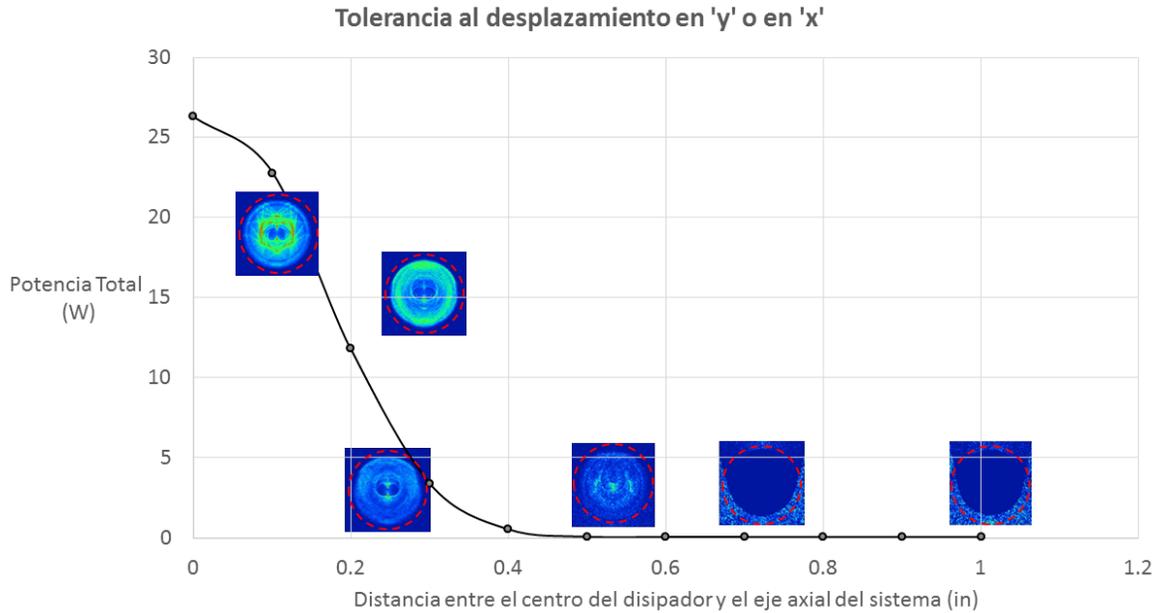


Figura 3.20: Tolerancias espaciales del desplazamiento de la FOP en el eje ‘y’. El eje ‘x’ muestra el desplazamiento de la fibra por el eje y en pulgadas, mientras que el eje ‘y’ indica la potencia capturada en el detector. Además, se muestran los cambios en la distribución espacial de la salida para algunos de las distancias simuladas.

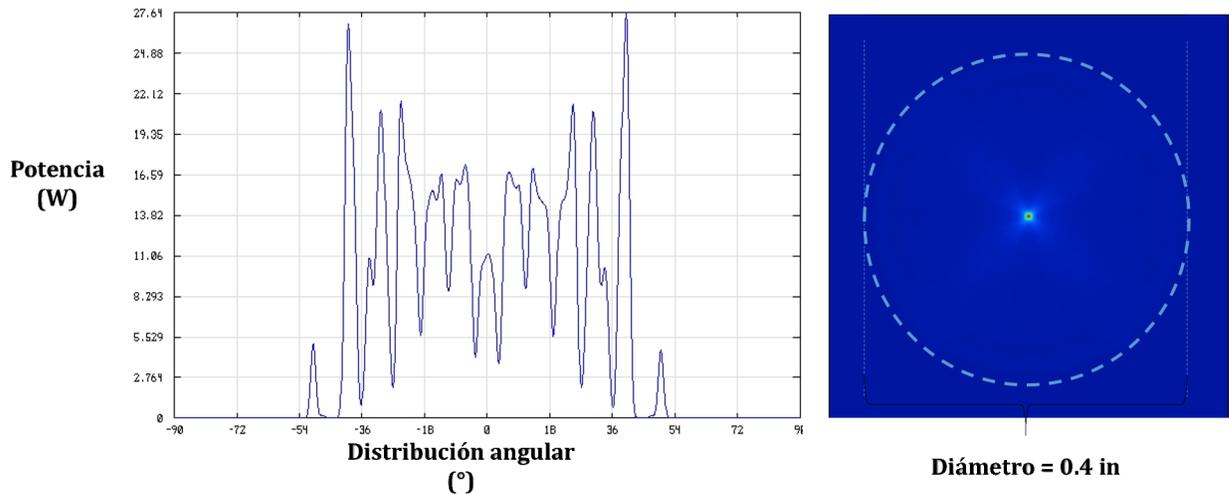


Figura 3.21: Caracterización de la salida del sistema de iluminación en un caso ideal donde no se tiene ningún tipo de desalineamiento. Se incluye la distribución angular, que comprende un cono de salida de 54° , así como la distribución espacial, que consiste en una distribución circular con un diámetro de 0.4 in, la cual se caracteriza por tener su mayor concentración en el centro de la misma.

Como podemos ver en la imagen 3.21, empleando un detector de 0.25 pulgadas \times 0.25 pulgadas a una distancia de 0.1 pulgadas de la fibra, se tiene una salida distribuida en un área circular de 0.4 in de diámetro, que conserva la distribución proveniente del Fresnel, en la cual en el centro se concentra la mayor cantidad de energía. La potencia de salida es de 27.68 W, lo cual corresponde con lo esperado según la literatura, debido a que estos sistemas son conocidos por tener eficiencias alrededor del 50% [35, 42, 44], mientras que las simulaciones arrojan que el nuestro tendrá una eficiencia del 60.53%.

Finalmente, procederemos a la sección relacionada con las tolerancias a los desalineamientos angulares de los componentes del sistema.

3.3.7. Tolerancias de Alíneación Angular

Si bien ya vimos la sensibilidad del sistema a las variaciones espaciales de sus componentes en cualquiera de los ejes, ahora se debe analizar que ocurre al tener variaciones angulares de cada componente. Para esto consideremos el arreglo mostrado en la figura 3.22, el cual describe que se puede dar la desalineación angular por:

- Los rayos solares, aunque paralelos, no llegan perpendiculares al lente de Fresnel
- Se da inclinación en la varilla disipadora, la cual puede que se de con o sin alíneación con la FOP
- Existe la posibilidad de desalinear la fibra angularmente, hasta donde la geometría del sistema lo permite, alrededor de 6° , debido a que por la separación que le damos es lo máximo po podría inclinarse

Descritas las áreas donde podemos encontrar desalineamiento angular, ahora se procederá a realizar simulaciones para estudiar a detalle cada una de ellas.

3.3.7.1. Alíneación Angular del Lente de Fresnel

Para conocer las tolerancias a la hora de alinear el lente de Fresnel con respecto a los rayos del Sol, realizaremos una serie de simulaciones para cambiar la inclinación con que los rayos llegan al lente, ya que la radiación solar siempre estará compuesta por rayos paralelos entre sí, pero estos rayos no siempre llegarán perpendiculares a la superficie del lente.

Por lo descrito anteriormente, se hicieron una serie de simulaciones que consistieron en inclinar nuestra fuente con respecto al eje 'x' del sistema. Para las primeras simulaciones solo se utilizó la fuente, la lente de Fresnel y un detector. Es importante recalcar que sólo se realizó dicha inclinación en un solo eje ya que nuestra lente tiene simetría esférica. Los pasos que se siguieron para la primera simulación fueron:

1. Se colocó un detector rectangular en el foco de la lente, 6.45 in, para medir la potencia recibida y su distribución espacial. Este detector es de geometría cuadrada con 0.25 in de longitud de sus lados.

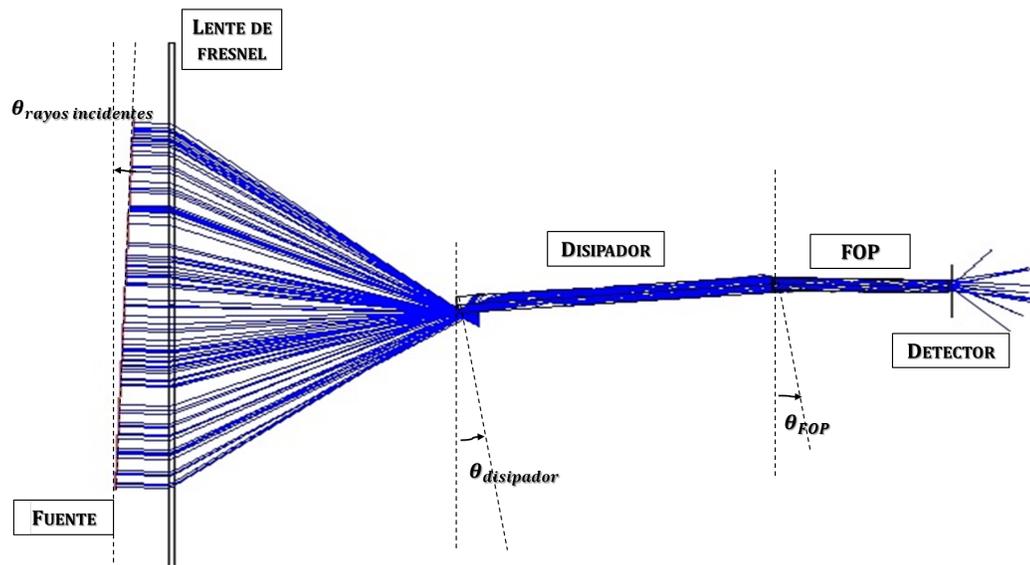


Figura 3.22: Arreglo experimental que describe las áreas del sistema en las cuales se estudiarán las desalineaciones angulares cuando los rayos solares no llegan perpendiculares al lente de Fresnel, los efectos de la inclinación de la varilla disipadora y las desalineaciones angulares de la fibra óptica.

2. Se utilizó la macro 'TolTiltSource.zpl' para inclinar la fuente de 0° a 10° con variaciones de un grado a la vez.
3. La vista de la distribución espacial, así como la sección trasversal vertical de la mancha focal fueron estudiadas para conocer las variaciones.

Gracias a la primera simulación se pudo observar que al momento de que los rayos llegan con 4° de inclinación con respecto a la normal ya no será posible introducir luz al disipador, ya que se va dando un desplazamiento de la mancha focal y, además, la mancha resultante pierde su simetría radial, tal como se observa en la figura 3.23.

Considerando el resultado anterior, se hizo una nueva simulación en la cual se inclinó la fuente de 0° a 4° en variaciones de 0.1° , para así calcular la tolerancia máxima de inclinación para contar con una salida final 'aceptable'. Para esta simulación se usó la Macro 'TiltSource2.zpl'.

La figura 3.24 nos muestra que para ángulos mayores a 0.8 grados, la salida del sistema decae por debajo del 90%. Otro punto importante que no se ve en las gráficas es el aumento del semi ángulo con el que llegan los rayos a la mancha focal, el cual se ve incrementado de 43° a 53° , lo cual afecta en el acoplamiento con la FOP.

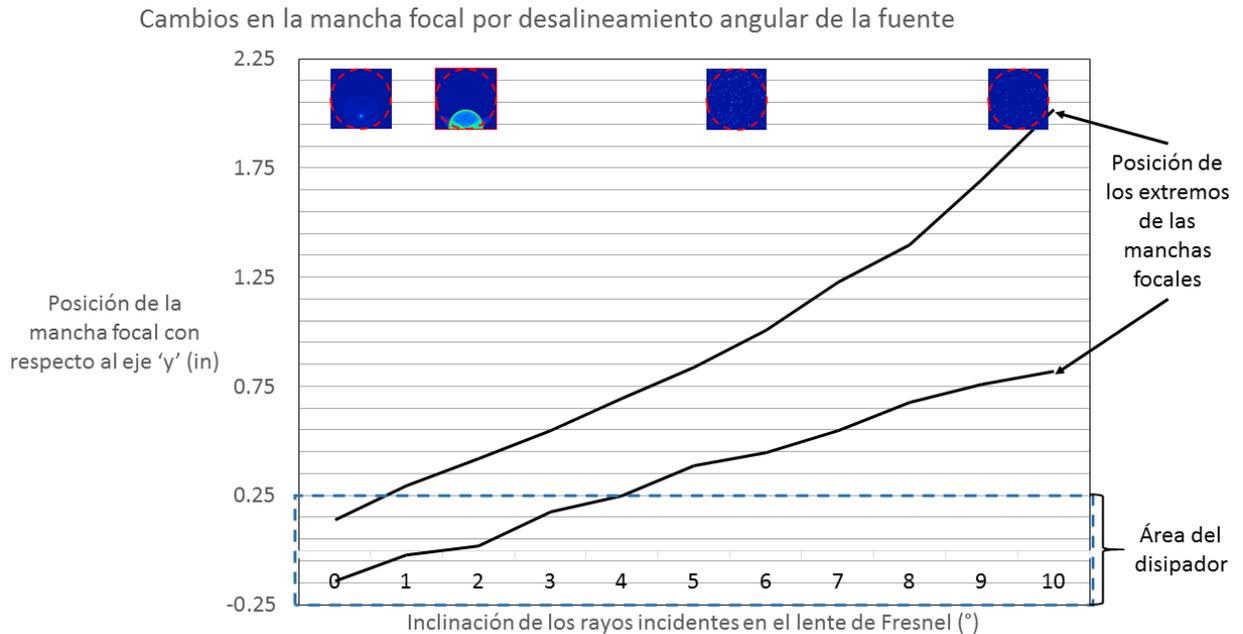


Figura 3.23: La gráfica describe como se va desplazando la mancha focal del lente de Fresnel, así como el diámetro de la misma conforme se incrementa la desalineación angular entre la fuente y el Fresnel. Se incluyó el área representativa del disipador de mayor diámetro para ilustrar si la mancha focal podrá ser o no captada y transmitida por el disipador, además se muestran las distribuciones espaciales de algunas de las inclinaciones simuladas, la circunferencia punteada roja representa la posición del disipador con respecto a la mancha.

3.3.7.2. Alíneación Angular de la Varilla Disipadora

Para estudiar los efectos de la desalineación angular del disipador se consideraron 3 casos:

- Análisis de potencia de salida y distribución espacial de misma para un sistema donde sólo se incluya la fuente, la lente y el disipador.
- Análisis de la salida para cuando se desalinee el disipador, pero la FOP se mantenga sobre el eje axial del sistema sin variaciones angulares.
- Estudio de la salida final del sistema para el caso en que se dé el desalíneamiento del disipador y la FOP tenga el mismo desalíneamiento.

Para el primero de los casos se creo una Macro llamada 'PyrexTilt.zpl', la cual inclinaba el disipador desde 0° hasta 25° , con variaciones de un grado, para ver la macha de salida obtenida, su potencia y su distribución espacial. Aquí empleamos un detector de $10 \text{ in} \times 10 \text{ in}$, para captar toda la potencia de salida, sin importar su posición.

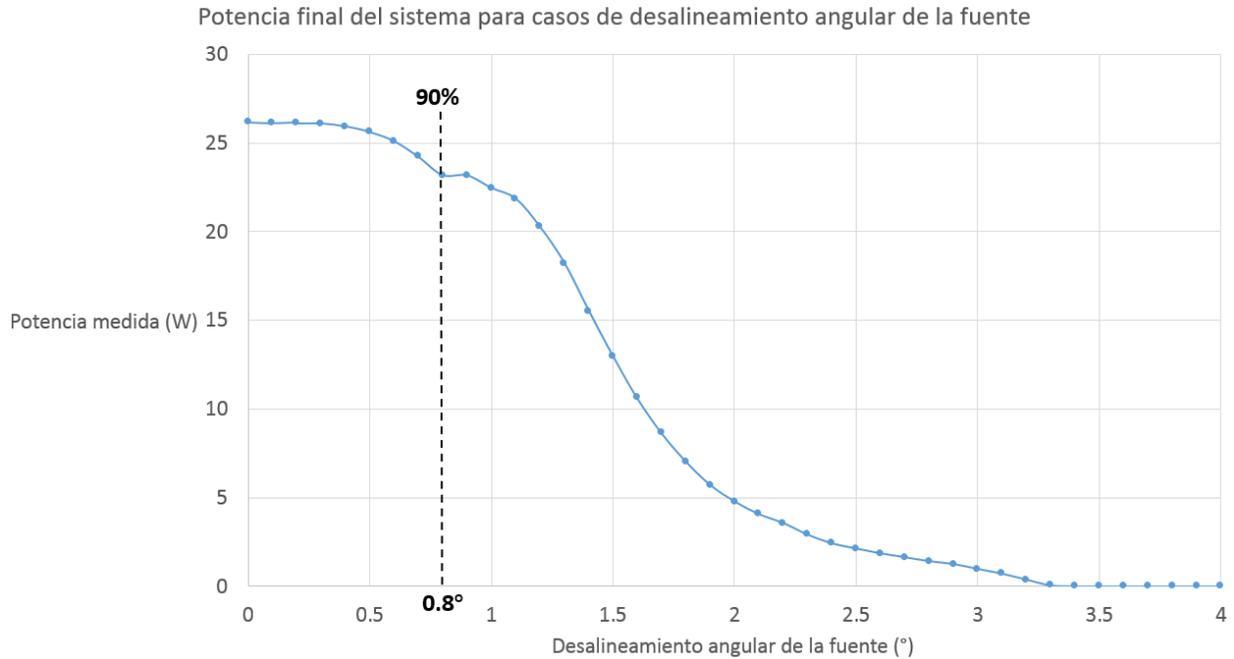


Figura 3.24: La gráfica describe como va disminuyendo la potencia del sistema conforme se incrementa la inclinación entre los rayos de la fuente y el lente de Fresnel, la línea puntada representa el límite dónde aún se tiene un 90% de la potencial base, es decir, la potencia cuando no hay desalineamiento.

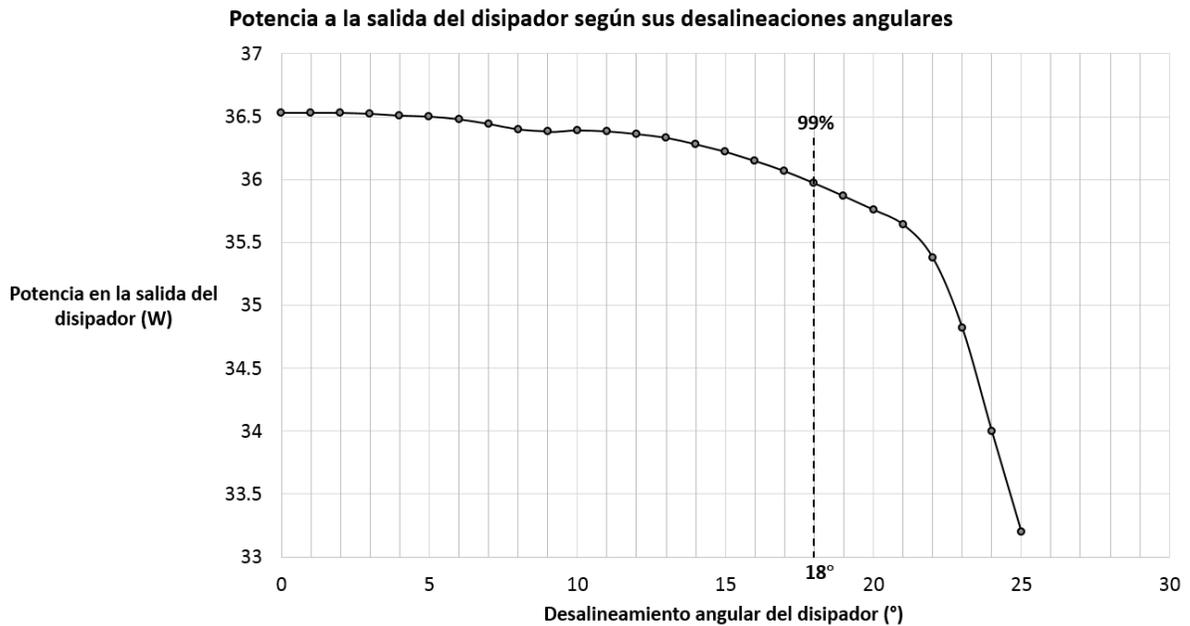


Figura 3.25: Potencia captada a la salida del Sistema por desalineamiento de la fuente y el lente de Fresnel, destaca que las pérdidas para los primeros 18° son inferiores al 1%. Nota: La potencia final es mayor debido a que no se encuentra la FOP incluida en el sistema y el detector mide 2.0 in de cada lado.

En esta primera simulación se observa como la potencia no se ve afectada (Fig. 3.25) e incluso podemos observar una potencia de salida mayor debido a que se está analizando el sistema SIN la FOP y, además, incrementamos el área de nuestro detector, teniendo ahora 2.0 in de longitud en cada lado; sin embargo, otro dato que se obtuvo fue el aumento en la apertura numérica de la salida del disipador, dándose un incremento de hasta 84° en el caso de mayor inclinación (25°), la figura 3.26, nos muestra como va incrementándose dicho ángulo. La principal desventaja es que será aún más difícil acoplar la luz del disipador a la FOP.

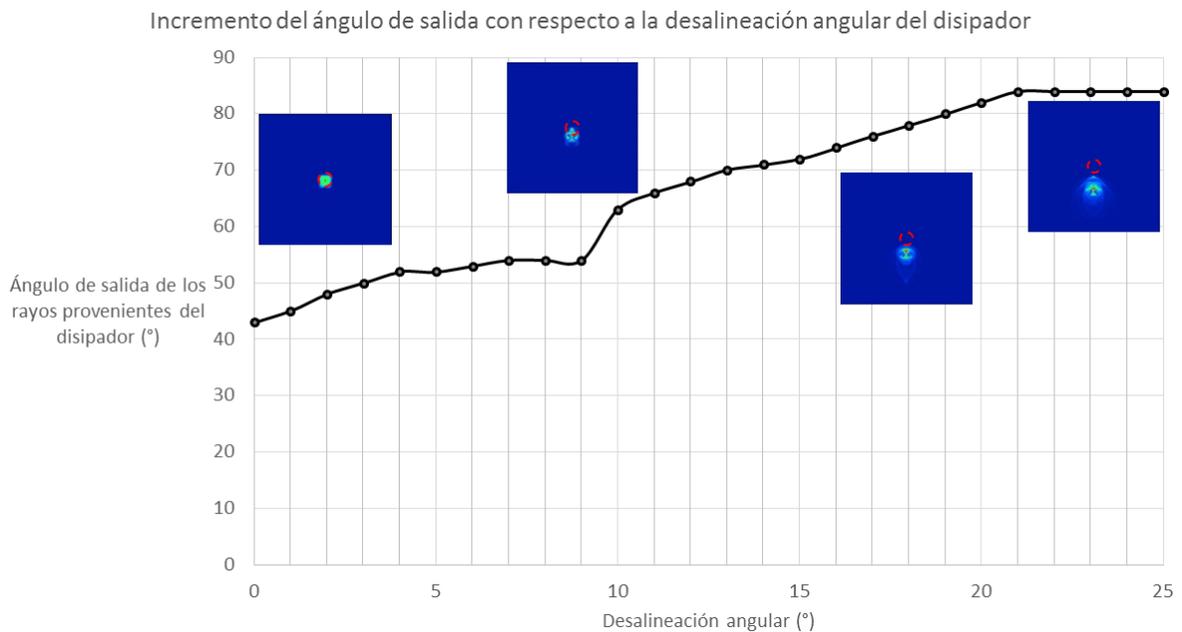


Figura 3.26: Incremento del ángulo de salida de la radiación que sale del disipador debido a la desalineación angular del mismo con respecto al eje axial. Las figuras muestran el desplazamiento de la mancha focal a la salida del disipador, la línea punteada roja indica la posición donde debería encontrarse la fibra.

Ahora veremos como afecta ese mismo rango de variaciones a la salida del sistema en el cual ya se tiene incluida a la FOP, y ésta se mantenga fija sobre el eje axial. Para este se utilizó la macro 'PyrexTilt2.zpl'. Los resultados de esta simulación se presentan en la imagen 3.27. Aquí se observa que para desalineamientos mayores a un grado, se pierde más del 75% de la potencia de salida, razón por la cual es de vital importancia que se evite este tipo de desalineamiento.

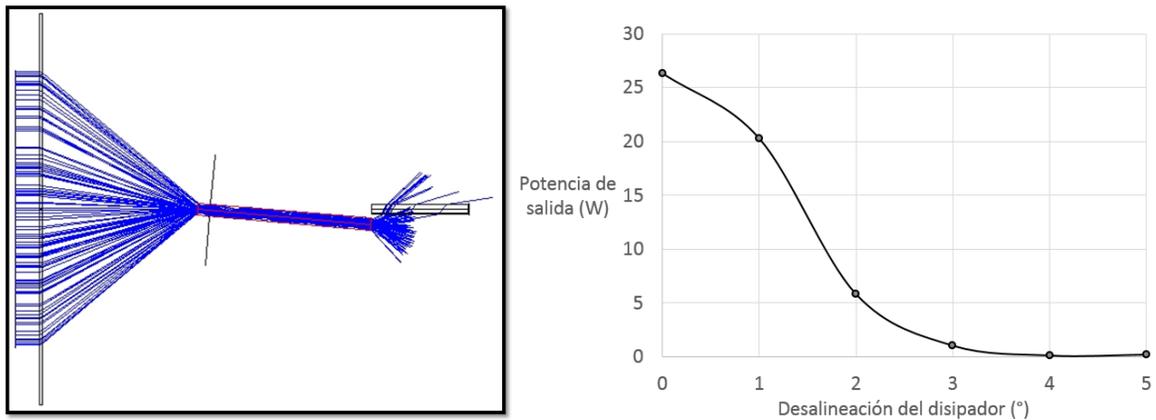


Figura 3.27: Potencia de salida respecto a la desalineación angular del dissipador manteniendo la FOP alineada al eje axial. A la izquierda observamos el arreglo estudiado, donde se va desalineando el dissipador con respecto al eje axial, pero la fibra permanece estática y alineada al eje axial. A la derecha se tiene la gráfica del decaimiento de la potencia conforme se da esta desalineación.

Finalmente, analizaremos el caso en el cual la varilla de vidrio se desalinea angularmente y la fibra se desplaza junto con él, debido a que la FOP está prácticamente pegada al dissipador, sólo mostramos las variaciones para los primeros 5° grados, con incrementos de un grado, debido a que posterior a este ángulo la potencia detectada es prácticamente cero. En este caso fue usada la Macro 'PyrexTilt3.zpl'

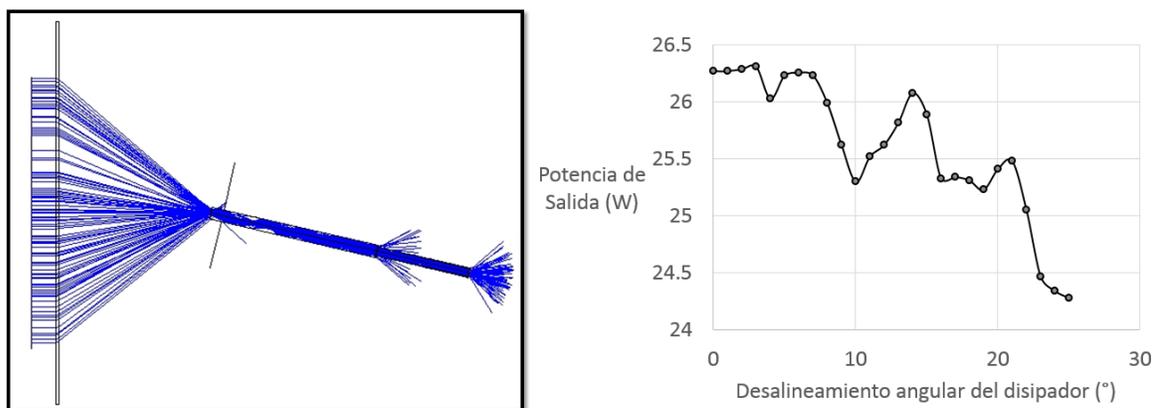


Figura 3.28: Potencia de salida respecto a la desalineación angular del dissipador manteniendo la FOP alineada al dissipador. A la izquierda observamos el arreglo estudiado, donde se va desalineando el dissipador con respecto al eje axial, y la fibra se desalinea a la par. A la derecha se tiene la gráfica del decaimiento de la potencia conforme se da esta desalineación.

Analizando los resultados de la figura 3.28, se observa que no existen grandes variaciones para este desalineamiento, de hecho, para los 25° de desalineamiento que se estudiaron se mantiene una

potencia de al menos un 92.4% respecto a la potencia de salida sin desalineaciones.

3.3.7.3. Alíneación Angular de la FOP

El estudio de las tolerancias de desalineamiento angular de la FOP se realizó desde 0 hasta 6 grados, usando la Macro 'FOPTilt.zpl'. La variación que se estudia es pequeña debido a que geoméricamente no es posible tener una inclinación mayor a 6° ya que la fibra toparía con el disipador.

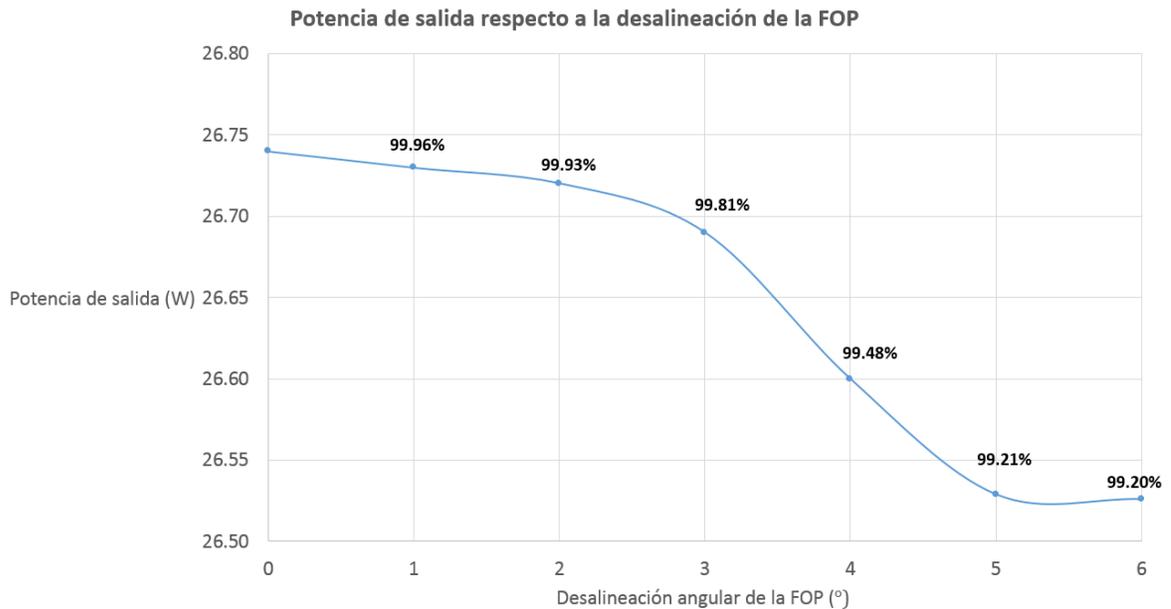


Figura 3.29: Potencia de salida respecto a la desalineación angular de la FOP. La gráfica muestra como con las desalineaciones analizadas no se encontró una pérdida de potencia mayor al 1%.

En contraste con la mayoría de los resultados anteriores, la grafica 3.29 nos muestra que la salida de la FOP no se ve severamente afectada con la inclinación, debido a que los resultados obtenidos nos muestran que no se dan pérdidas por encima del 1% en el rango analizado.

3.4. Resultados Finales de los Análisis Numérico y Matemático

Ya que se concluyeron las simulaciones y los análisis matemáticos vamos a resumir los principales resultados en la presente sección, comenzando con una imagen que contiene los principales puntos tratados. La imagen 3.30 resume todos los resultados obtenidos en los distintos análisis realizados, destacando principalmente los de las tolerancias de desalineamientos espaciales y angulares del sistema.

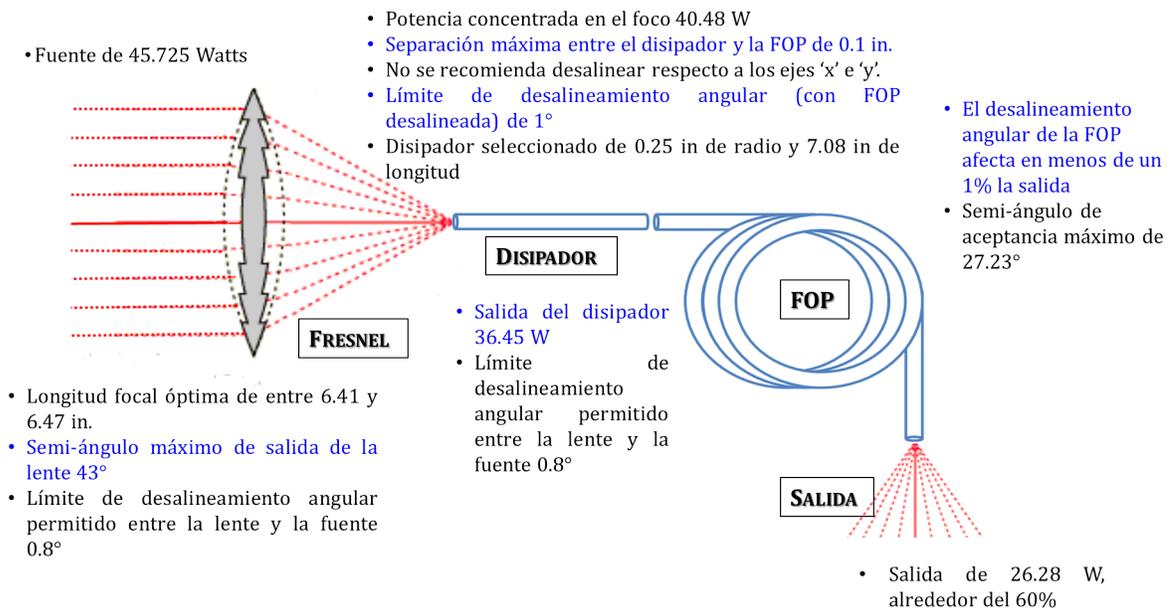


Figura 3.30: La ilustración describe brevemente algunos de los resultados obtenidos de los análisis matemático y numérico.

En resumen, podemos mencionar que:

- Lente de Fresnel

- Su tolerancia de desalineamiento angular es de 0.8°.
- Se tiene una longitud focal entre 6.41 y 6.47 in.

- Disipador

- No se debe dar desalineamiento angular mayor a un grado.
- El desalineamiento en los ejes 'x' e 'y' genera grandes pérdidas.

- FOP

- Se recomienda colocarla lo más cercano posible a la salida del disipador.

- El desalineamiento angular no afecta a la salida para ángulos menores a 18°

Ya que se concluyeron los análisis matemático y numérico, se procederá con la realización de la implementación experimental del arreglo propuesto. El siguiente capítulo aborda las pruebas realizadas en laboratorio desde la caracterización de los componentes, la manipulación de los mismos, las pruebas de calor y la implementación para realizar mediciones de la intensidad lumínica de la salida. Aunque la implementación experimental cubre sólo una parte de lo visto durante el presente capítulo, nos permite realizar una validación de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA

El presente capítulo presenta una breve descripción de los resultados obtenidos de la implementación experimental del Sistema de Iluminación Solar propuesto en esta investigación.

Es importante destacar que esta implementación experimental aún requiere optimizarse debido a que solo se realizó la implementación del sistema en el caso de alíneación total.

Como en la mayoría de los experimentos, nuestra implementación se enfrentó con algunos inconvenientes, entre los cuales destacan:

- El proveedor del lente de Fresnel nos proporcionó los datos mínimos, así que no conocíamos la geometría real del lente, razón por la cual se simuló en *OSLO*® y *ZEMAX*®.
- El proveedor de la FOP no incluyó ficha técnica de la misma, solo se sabe que el núcleo es de PMMA, y, al momento de cuestionarle al respecto, no poseía la información que necesitábamos; por esta razón se supuso que era una FOP convencional fabricada a base de PMMA y polímeros fluorados y, además, se desconoce la información de sus pérdidas.
- Nuestro sistema no posee un mecanismo de seguimiento solar, por lo cual el alíneamiento del mismo se hacía de manera manual y estaba sujeto a errores, ya que se empleaba la observación como método de verificación de la alíneación con respecto al Sol.
- Las pruebas de alíneación, calor y selección de disipadores que se realizaron con luz solar están sujetas a variaciones entre ellas, no solo por el problema en la alíneación de los rayos solares y el sistema, sino también por las variaciones en la radiación solar con respecto al día, la hora y las condiciones climatológicas, es decir, no se contó con una fuente constante.
- Todos nuestros instrumentos de medición: el espectrómetro, el luxómetro y los termómetros, se saturaron fácilmente, por lo que no fue posible obtener las cantidades reales en todos los casos.
- Nuestros instrumentos de medición son fotométricos, mientras que los análisis matemáticos y numéricos que hicimos fueron radiométricos.

4.1. Espectro Solar

Lo primero consistió en caracterizar el espectro solar, por lo cual usamos el Espectómetro USB 2000+ de Ocean Optics, este dispositivo se encarga de medir la distribución espectral recibida en el área del espectro visible, por lo cual no podemos saber cómo se comporta la radiación en el área del IR y el UV.

Este espectrómetro se satura a muy bajas potencias, sin embargo, si no hacemos incidir directamente la fuente a analizar en su entrada es posible obtener la gráfica de la distribución espectral, si bien esto no nos da la potencia real, si nos permite ver las variaciones en el espectro.

4.1.1. Espectro Solar Directo

Lo primero fue ver la distribución del espectro solar para corroborar que corresponda a la fuente D65 de la CIE y, a la vez, tener un punto de partida, para analizar cómo truncan el espectro los distintos componentes del sistema (Fig. 4.1).

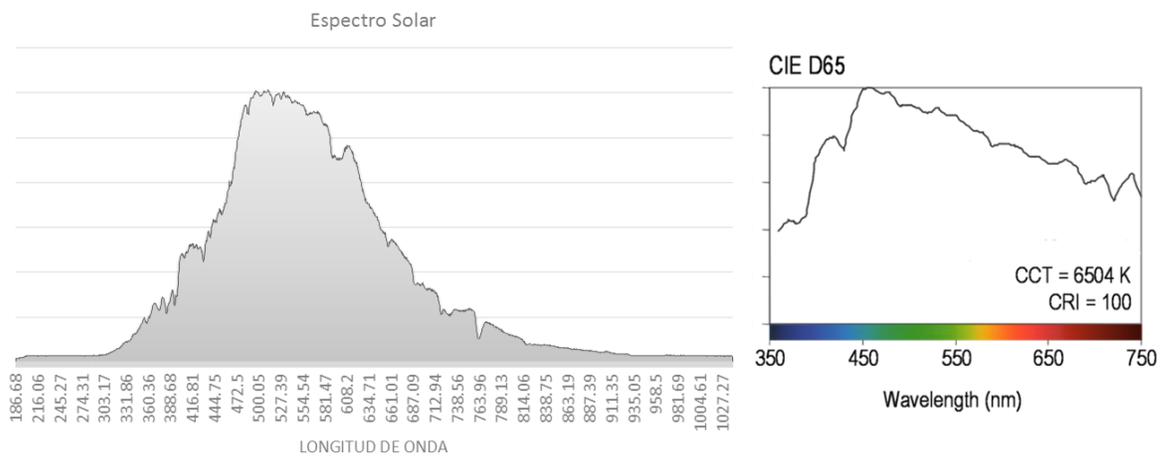


Figura 4.1: Espectro Solar en Monterrey en el mes de Octubre del año 2013 y s comparativa con la fuente D65 de la CIE. Los ejes horizontales de ambas imágenes describen la longitud de onda correspondiente.

En la figura 4.1 podemos observar como existe cierta coincidencia entre la distribución presentada por la fuente D65 de la CIE y el espectro medido, las variaciones existentes se deben a las condiciones climatológicas del día que se realizó la medición, así como por la posición geográfica en el globo terraqueo.

4.1.2. Espectro solar a través del Acrílico

Ahora se muestra el espectro solar (Fig. 4.2) medido después de ser filtrado por medio de un trozo de Acrílico, tal como ocurre al pasar la luz del Sol por el lente de Fresnel.

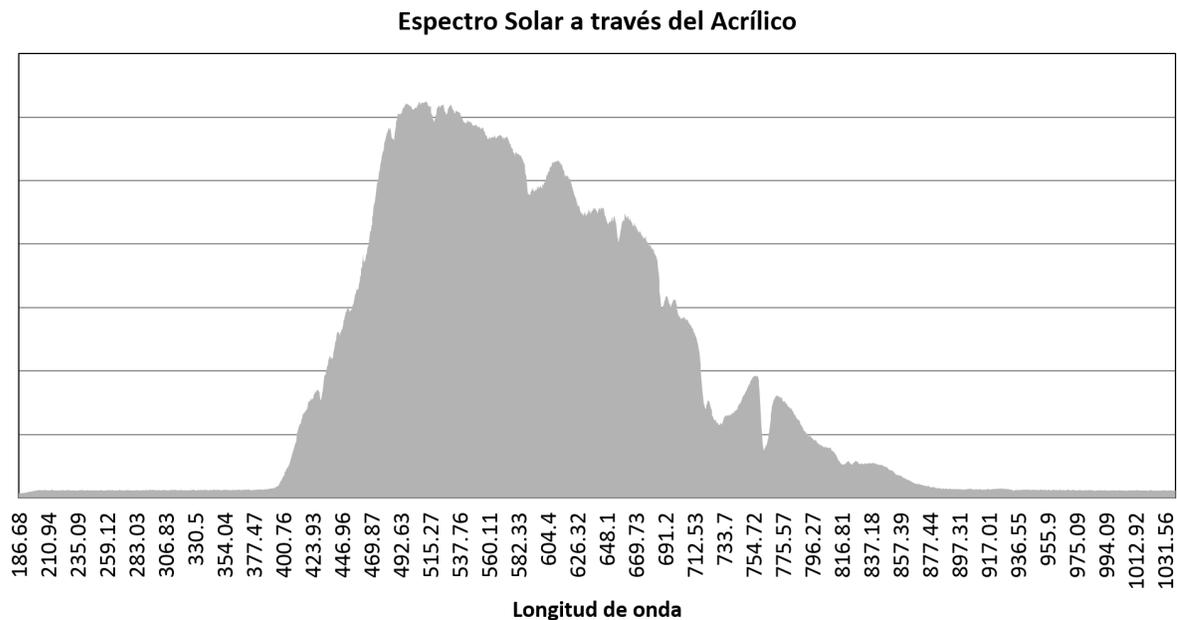


Figura 4.2: Espectro Solar filtrado por el acrílico. Lugar de la medición: Monterrey. Fecha: mes de Octubre del año 2013. El eje horizontal describe la longitud de onda correspondiente.

En este caso se observa (Fig. 4.2), como se indicó en la teoría, que el acrílico trunca una porción del espectro comprendido por la radiación IR y la UV, además de que atenúa ciertas porciones del espectro visible.

4.1.3. Espectro solar a través del Disipador

Se dice que el pyrex tiene una transmitancia de entre un 95% y un 98% del espectro solar [67], por lo cual quisimos validar si su distribución espectral es casi idéntica que la del Sol.



Figura 4.3: Espectro Solar filtrado por el borosilicato. Lugar de la medición: Monterrey. Fecha: mes de Octubre del año 2013. El eje horizontal describe la longitud de onda correspondiente.

La distribución solar mostrada en la gráfica 4.3, nos muestra una distribución espectral muy similar a la que se tiene para la radiación solar directa (Fig. 4.1), con esto comprobamos que al menos la porción del espectro visible no se ve afectada por pasar a través del vidrio de borosilicato.

4.1.4. Espectro solar a través de la FOP

Finalmente, se realizó el análisis de la distribución espectral de la FOP para poder ver si parte de las atenuaciones se deben a la disminución de la potencia en ciertas partes del espectro (4.4).

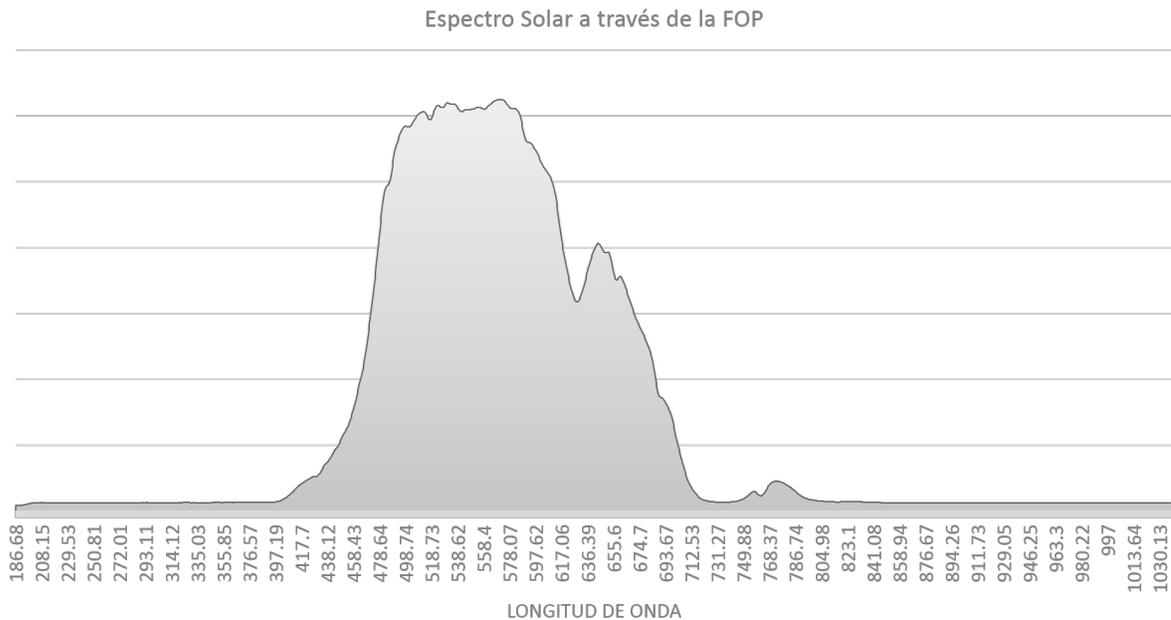


Figura 4.4: Espectro Solar filtrado por un trozo de fibra plástica. Lugar de la medición: Monterrey. Fecha: mes de Octubre del año 2013. El eje horizontal describe la longitud de onda correspondiente.

Para el caso de la fibra plástica, más concretamente del PMMA, podemos observar (Fig. 4.4) se tiene un decaimiento en varias partes del espectro, limitando la transmitancia del material a la una región aproximadamente entre 400 y 700 nm., con lo cual se justifica que exista una pérdida de potencia entre la entrada y la salida de la fibra.

4.2. Lente de Fresnel

El elemento principal del sistema es el lente de Fresnel (Fig. 4.5), el cual fue analizado de manera individual previo al armado del sistema.



Figura 4.5: Lente de Fresnel del Sistema de Iluminación Natural de Interiores propuesto.

Lo primero que se revisó fue su distancia focal empleando como fuente la luz solar, con lo cual se encontró que dicha distancia se encontraba aproximadamente de 6.5 pulgadas, cantidad muy cercana a la considerada para las simulaciones. Retomando eso, se sabe por la ecuación (2.35), que el semi ángulo máximo del lente será de 40.87° , lo cual está dentro del rango calculado en el capítulo anterior.

4.3. Fibra Óptica Plástica

Algo que no se consideró durante los análisis matemático y numérico fue si la condición en que se encontraban las caras de la fibra podía afectar la salida, por lo cual se revisó la salida obtenida de la fibra sin ningún tratamiento y, posteriormente, se implementaron técnicas para su corte y pulido. A continuación se describirá el proceso empleado para el cortado y pulido de la fibra plástica, así como los resultados de la caracterización de la misma.

4.3.1. Manipulación de la FOP

La fibra óptica plástica representó una importante área de oportunidad para el proyecto de investigación debido a que la fibra adquirida no había sido correctamente cortada y no tenía sus secciones transversales totalmente planas.

La imagen 4.6 muestra el estado en que se encontraban las puntas de la fibra y, además, el tipo de salida que obteníamos de la misma, con esta imagen podremos hacer una comparativa sobre si es o no de ayuda el pulir los extremos de la FOP.

En la literatura referente a fibras plásticas no se maneja de manera explícita una técnica precisa para el corte y pulido de fibras plásticas, en especial para aquellas que poseen diámetros superiores a un milímetro, esto nos condujo a establecer una metodología para estos procesos basada en la

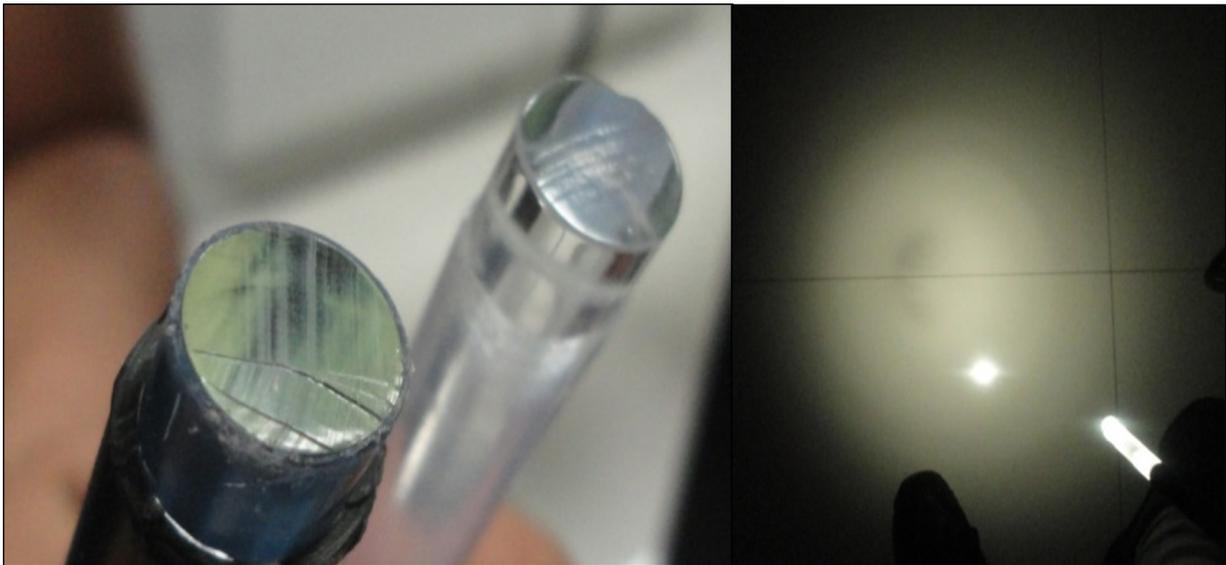


Figura 4.6: Se revisó la salida obtenida por la FOP debido a que se observó que las caras de la misma poseían muchas arañaduras y no tenían un aspecto claro (imagen izquierda). Como se observa (imagen derecha), la salida posee algunas manchas, además de que es de un color amarillento, debido probablemente a que alguno de los extremos de la FOP esté dañado, ya que situaciones como alta radiación IR sobre la misma ocasionan este tipo de problemas.

utilización de los materiales disponibles para el tratamiento de fibras de sílice y para el tratamiento de acrílicos.

4.3.1.1. Cortado de Fibras Plásticas

Antes de comenzar con el proceso de pulido de la fibra plástica se optó por hacer pruebas de corte para establecer la técnica que se empleará en caso de requerir cortar la fibra plástica, las opciones disponibles en el laboratorio eran:

- Corte por rotación empleando un mini taladro con sierra circular.
- Corte con calor empleando una navaja caliente.

Como se puede observar en la figura 4.7, resulta más conveniente hacer uso de la técnica de corte con calor debido a que las caras de la FOP resultan con rayaduras o fisuras en una sola dirección, disminuyendo la dificultad del proceso de pulido, mientras que en el caso del corte por rotación se tienen porosidades por toda la cara, requiriéndose una mayor dedicación para el pulido.

4.3.1.2. Pulido de FOP

Como ya se mencionó, no se encontró en la literatura información sobre cómo pulir fibras ópticas plásticas de núcleos grandes, razón por la cual, mediante la prueba y el error, se probaron

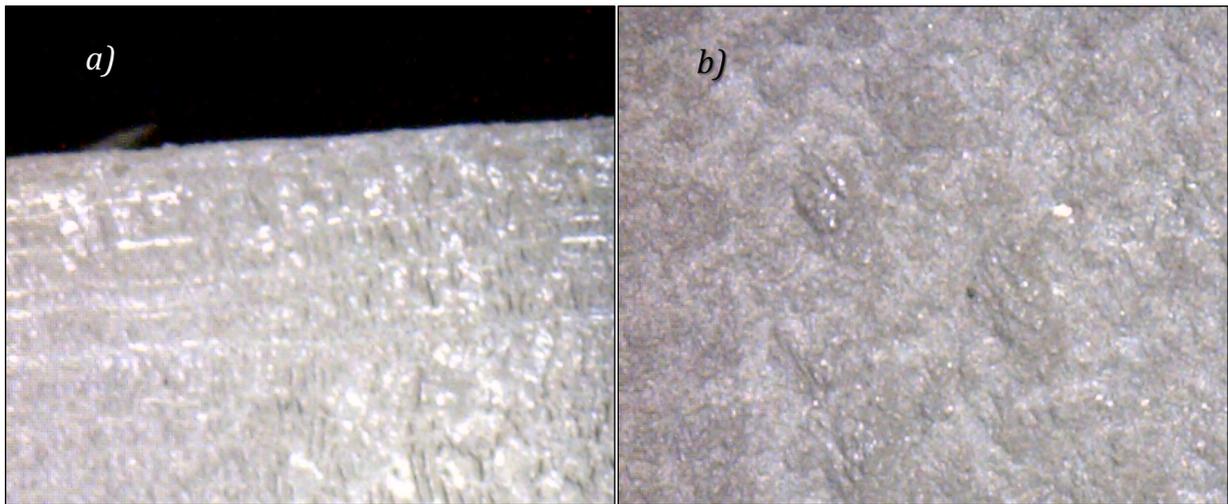


Figura 4.7: Resultado del uso del corte con calor (a) y del corte por rotación (b).

distintos materiales para el pulido, entre los que destacan lijas de agua, las lijas para fibra de Sílice y químicos para el pulido de acrílico. El proceso de pulir se realizó de la misma manera que se pule la fibra de Sílice, es decir, desplazando sobre la lija la fibra en movimientos que describen con su trayectoria el número '8'.

Después de múltiples combinaciones se estableció una técnica con la cual el proceso de pulido se demora alrededor de una hora y media, dicha técnica consiste en el uso de lo siguiente:

1. Lija de agua # 400
2. Lija de agua # 1500
3. Lija de diamante de $3 \mu\text{m}$
4. Lija de diamante de $1 \mu\text{m}$
5. Líquido removedor de rayaduras finas para acrílico
6. Lija de diamante de acabado final
7. Abrillantador de acrílico

Ya se mencionó que el proceso toma alrededor de una hora y media, sin embargo este tiempo varía debido a cómo se encuentre la superficie de la fibra y a la fuerza aplicada al proceso de pulido.

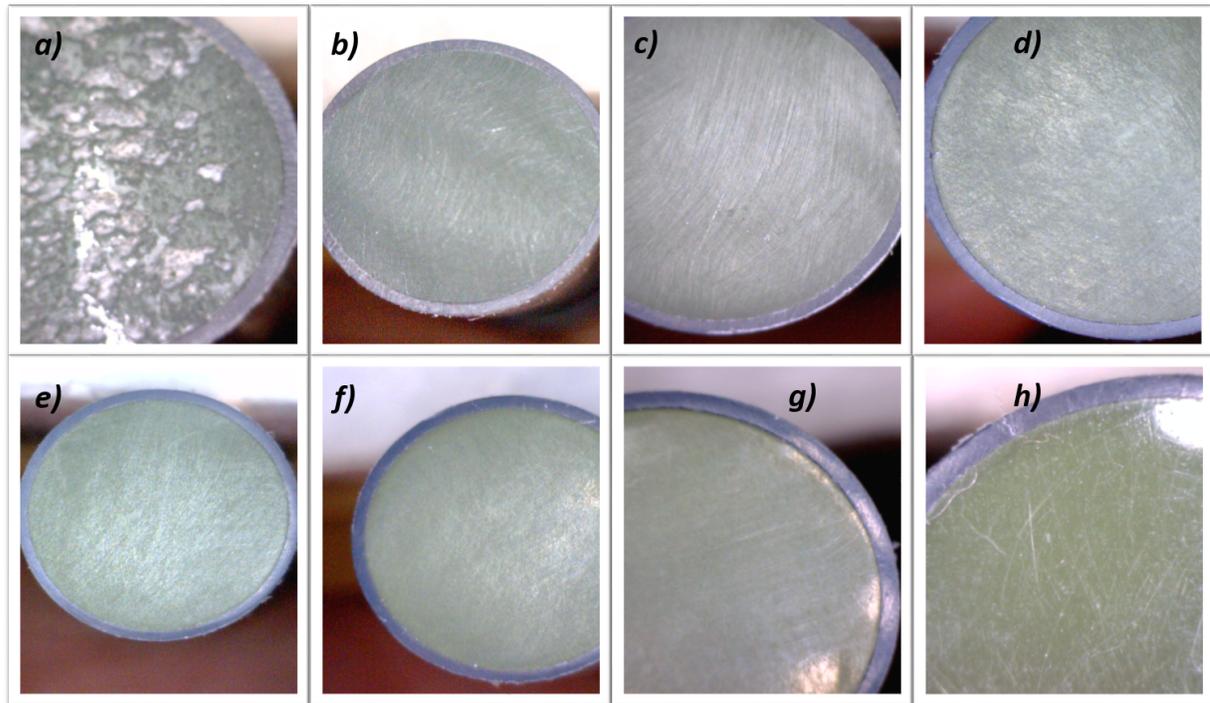


Figura 4.8: Cada una de las fotografías muestra la evolución del proceso de pulido de la FOP, comenzando por la fibra sin pulir, pasando por cada uno de los acabados producidos por las distintas lijas o sustancias, para finalmente tener y superficie plana, casi sin rayaduras y con una mayor claridad.

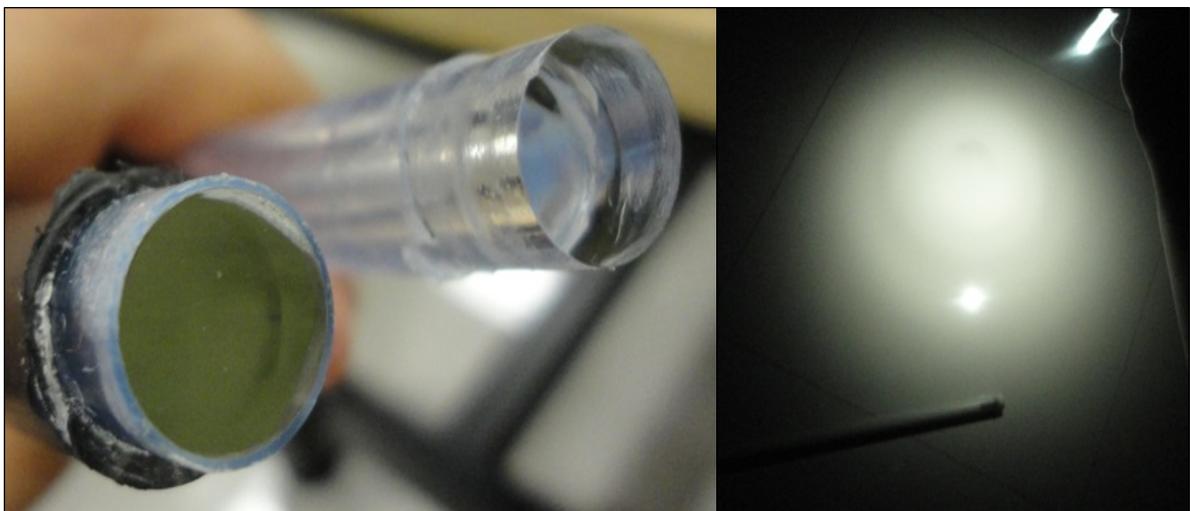


Figura 4.9: Resultado final obtenido después de cortar y pulir la fibra.

El resultado final se observa en la figura 4.9, la cual muestra claramente que la superficie de las caras de la FOP casi no posee rayaduras y es sumamente clara, permitiendo así el paso de una

mayor cantidad de luz. La imagen de la salida de la fibra plástica comprueba que después de nuestro corte y pulido tuvimos una salida más uniforme y blanca.

4.3.2. Caracterización de la FOP

El siguiente paso a realizar con la fibra fue el caracterizar su salida, es decir, a que ángulo sale la luz de ella. Para esto se usó un láser rojo (633 nm) y se hizo incidir el láser a diferentes ángulos en la entrada de la FOP, siendo un ángulo aproximado de 30° el semi-ángulo máximo de aceptación y salida encontrado, lo cual también corresponde con lo calculado en el capítulo anterior.



Figura 4.10: Prueba para conocer el semi cono de aceptación de la FOP.

4.4. Varilla Disipadora de Borosilicato

Para seleccionar el disipador más adecuado a nuestras necesidades, primero decidimos probar su transmitancia, razón por la cual se diseñó un pequeño arreglo experimental con los siguientes componentes (Fig. 4.11):

- Láser rojo (633 nm) de 0.5 mW
- Un aumento para microscopio de 40x
- Lente de bicóncavo de 15x
- Lente de Fresnel
- Distintos disipadores (4.12)
- Luxómetro

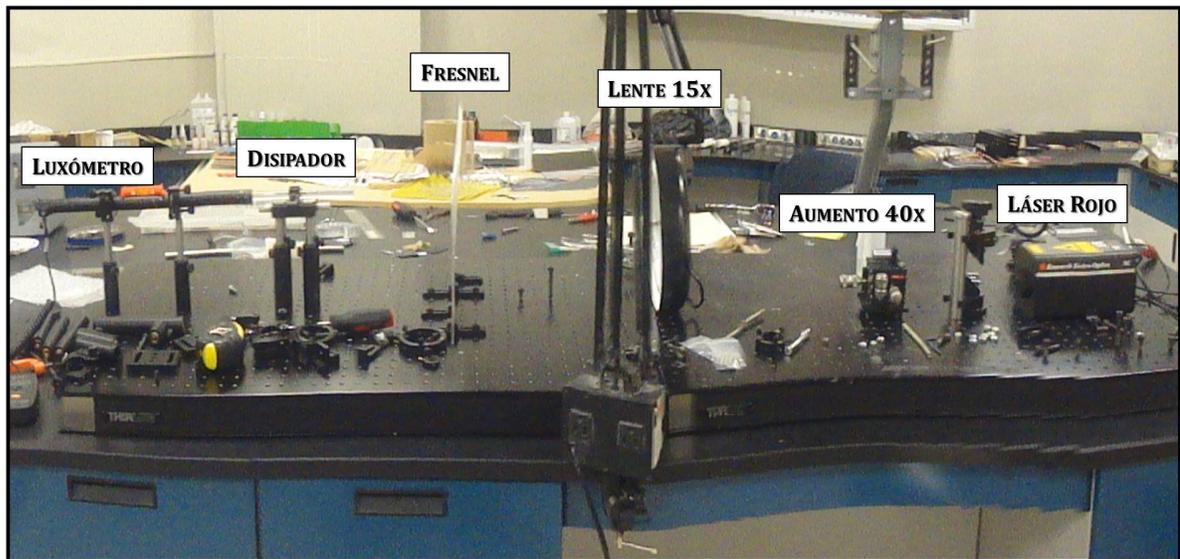


Figura 4.11: Arreglo para caracterización de varillas disipadoras de borosilicato.



Figura 4.12: Distintas varillas disipadoras de borosilicato.

Se aprovecharon los 2 lentes para aumentar el ancho del haz del láser y que estuviera colimado, posteriormente, se centro dicho haz láser para que incidiera en el centro a nuestro Fresnel, el cual enfocará la luz dentro de la varilla disipadora. A la salida de la varilla disipadora se colocó el detector del luxómetro y con esto se pudieron analizar las densidades de potencia de salida.

ID	Longitud (in)	Iluminancia 1 (lx)	Iluminancia 2 (lx)
Pyrex130	5.12	82	81
Pyrex160	6.30	77	90
Pyrex180	7.08	96	76
Pyrex200	7.87	67	67
Pyrex300	11.81	80	87

Tabla 4.1: La tabla muestra los diferentes disipadores, incluido el disipador de 0.19 pulgadas de radio, el 'Pyrex300', y la iluminancia detectada por nuestro luxómetro.

La tabla 4.1 nos muestra diferentes niveles de iluminación detectados al probar las diferentes varillas disipadoras, sin embargo, como puede observarse, el arreglo experimental no nos arroja resultados repetibles, por lo cual debemos descartar este método como una alternativa para la selección del disipador. La razón por la cual no nos da resultados repetibles se puede deber a que la salida del disipador no tiene el mismo tamaño siempre, por lo que no incide de la misma manera en el detector.

Para decidir cuál de los disipadores se usará procedimos a realizar las pruebas de calor, siendo éstas las que tomaremos como definitivas para el proceso de selección.

4.5. Pruebas de Calor

Debido a que no se cuenta con una fuente de calor que nos permita hacer un análisis de la capacidad de disipación del calor de las varillas de borosilicato, optaremos por montar una parte de nuestro sistema de iluminación y probar directamente con el Sol las capacidades de cada disipador.

4.5.1. Concentración de Calor en el Foco

Antes de probar los disipadores, es necesario saber un aproximado de la temperatura que se concentra en el foco, para lo cual se montó el lente de Fresnel en una estructura metálica usada comúnmente para sostener antenas de sistemas de televisión satelital.

Ya que se tuvo montado el lente, se procedió a alínearlo para que recibiera la luz del Sol de manera perpendicular al mismo y se utilizó un termopar para registrar la temperatura alcanzada (Fig. 4.13).

El termopar utilizado sólo tiene capacidad de detectar hasta 1200° C, pero sus condiciones de operaciones permiten que resista hasta 1400° sin dañarse. La mayor temperatura registrada fue 1250°, por lo cual se asume que al menos se llega a 1200° en el foco, aunque existen picos de temperatura por encima de este valor, los cuales no superan los 1400°.

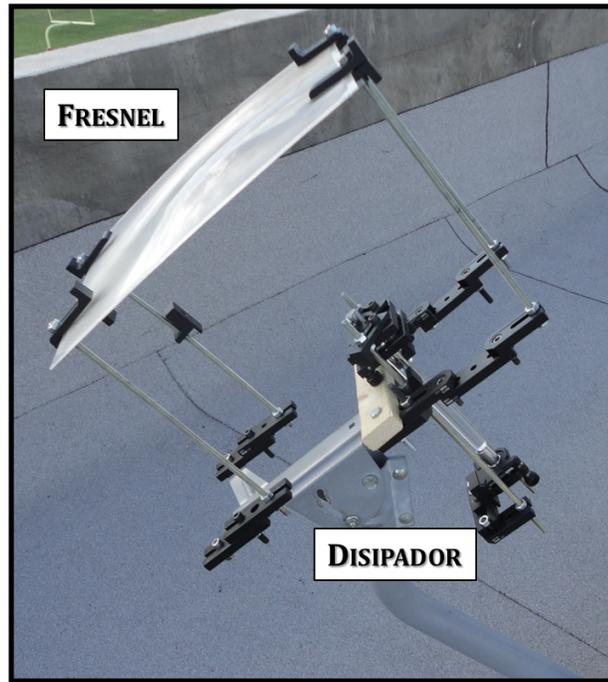


Figura 4.13: Arreglo usado para medir el calor concentrado en el foco y a la salida de los disipadores.

4.5.2. Disipación de Calor por medio de Varillas de Borosilicato

Ahora probaremos las múltiples varillas de borosilicato para encontrar cual es la que logra disipar la mayor cantidad de calor. Para esto colocamos el termopar en el foco, para tener la temperatura base de cada medición, y, posteriormente, usamos otro termopar para medir la temperatura de salida del disipador. Los resultados se muestran en la gráfica de la figura 4.14.

Si bien contamos con muy buenos resultados en cuanto a la disipación de calor, aún no logramos disipar el calor suficiente, por esta razón la exposición de la FOP a la salida de la varilla de borosilicato no podrá ser muy prolongada, ya que, en caso contrario, podríamos dañarla. El disipador de borosilicato que emplearemos para las siguientes pruebas será el de 7.08 pulgadas de longitud.

4.6. Armado del Sistema

El arreglo experimental completo fue montado en la base de la antena de televisión satelital, con la ayuda de piezas de laboratorio para sujeción de lentes y otros elementos ópticos, en general está constituido por los elementos que ya conocemos (Fig. 4.15):

- Lente de Fresnel
- Una mesa con desplazamiento en los ejes 'z' y 'y' donde se sujeta el disipador de borosilicato

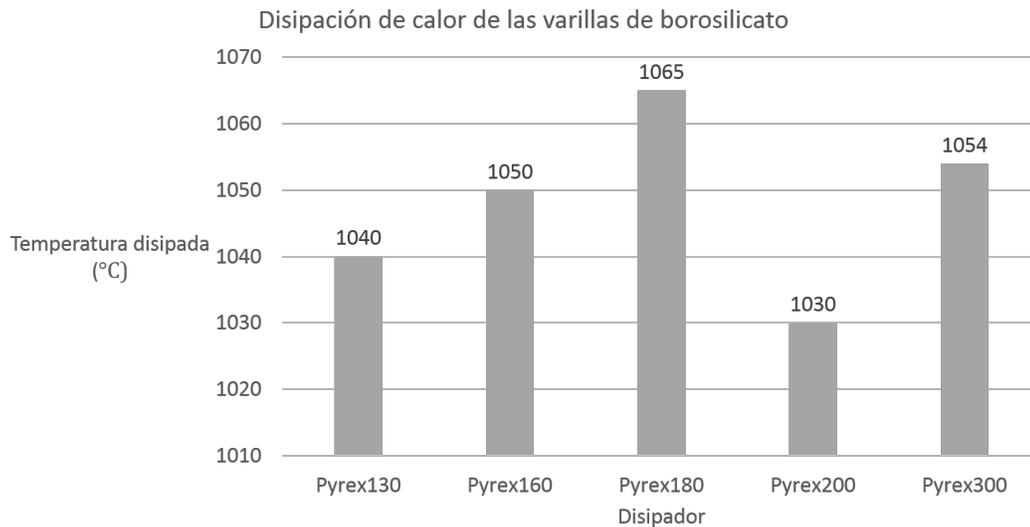


Figura 4.14: Resultados de las mediciones de disipación de calor de los disipadores, el eje 'x' enumera los distintos disipadores probados, mientras que el eje 'y' muestra la temperatura disipada por cada uno.

- Un portalentes montado en un vástago que permite ajustarlo con respecto al eje 'y', el cual sostiene la fibra plástica

El extremo de la fibra por donde obtendremos la salida (Fig. 4.16) se introdujo al interior de un laboratorio, el cual tenía selladas puertas y ventanas, para probar la potencia lumínica resultante.

4.7. Pruebas de Iluminación

Ya con el sistema armado se procedió a realizar las pruebas de iluminación. La salida de la fibra fue medida por el luxómetro a distancias que iban desde los 0 cm, hasta los 2 metros, haciendo incrementos de 5 centímetros en los primeros 10 cm, y de 10 centímetros en el 1.90 m siguientes. Es importante señalar que el luxómetro se satura en los 250,000 lúxes.

En la gráfica 4.17, podemos observar como varía la densidad de potencia de salida conforme alejamos nuestro detector, sin embargo debemos señalar que la iluminancia medida es un resultado aproximado, debido a que la salida de la FOP no es uniforme, razón por la cual es difícil hacer una medición precisa de la salida. Aún así se encontraron resultados favorables, dado que, por ejemplo, según la IESNA en una oficina debe haber alrededor de 400 luxes en los escritorios, los cuales los cumplimos si colocamos nuestra fibra a una altura de 1.30 metros respecto al escritorio [56].

Como no es posible visualizar claramente los resultados obtenidos al mostrar sólo la gráfica 4.17, decidimos hacer una comparativa iluminando un área cerrada y sin ninguna otra fuente de iluminación con nuestro sistema y, posteriormente, con un foco dicróico de 40W, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.18. Como se observa se tienen niveles muy similares de iluminación, aunque el resultado obtenido con el foco dicróico posee más intensidad, sin embargo, se

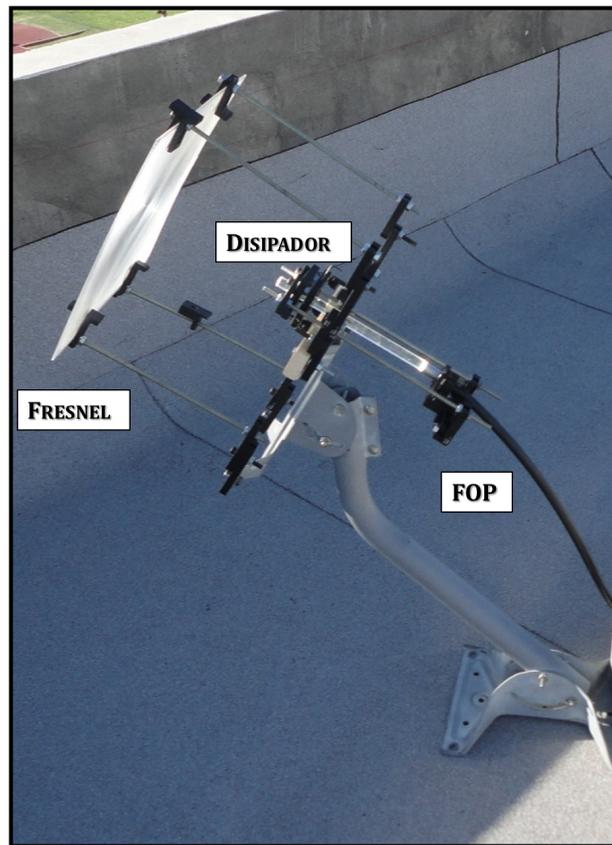


Figura 4.15: Sistema de Iluminación Solar de Interiores propuesto montado en una base de antena satelital y sin sistema de seguimiento solar.

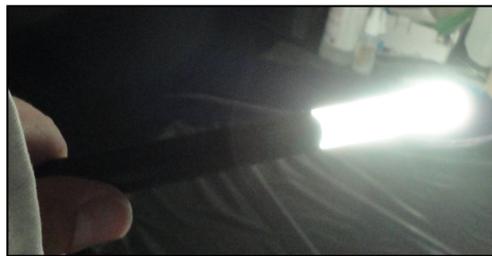


Figura 4.16: Salida final del sistema.

logra distinguir que la luz proporcionada por el Sistema de Iluminación Natural es más blanca que la otra.

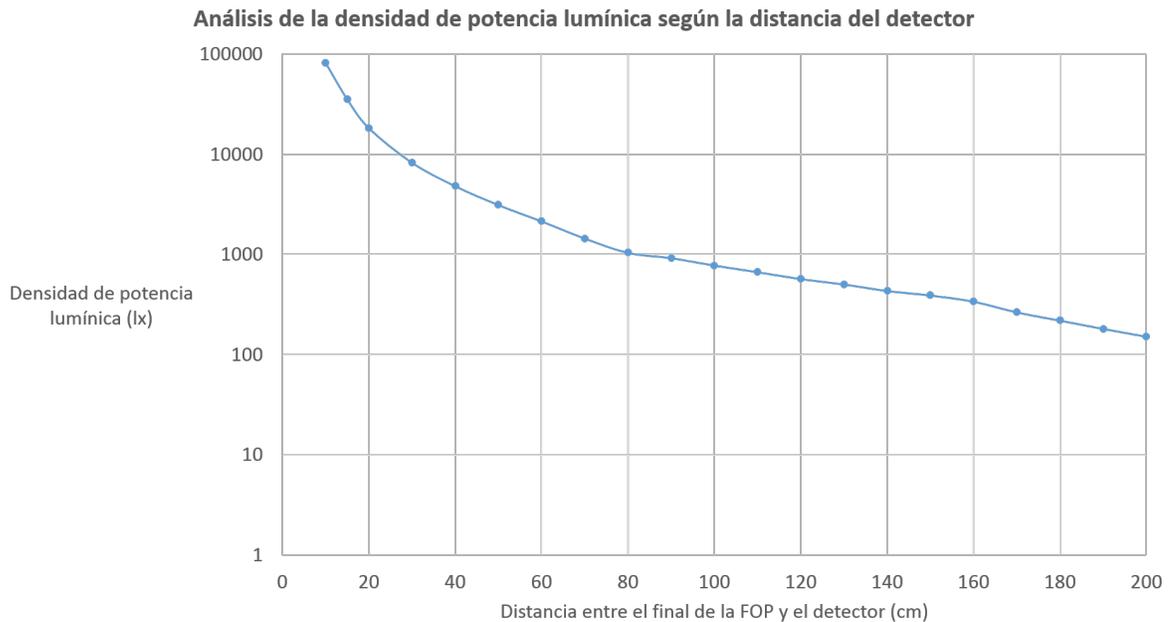


Figura 4.17: La gráfica muestra la densidad de potencia lumínica (eje 'y' en escala logarítmica base 10) respecto a la distancia entre el detector del luxómetro y la FOP. Cuando el detector estaba a 5 cm o menos, el luxómetro se saturaba.

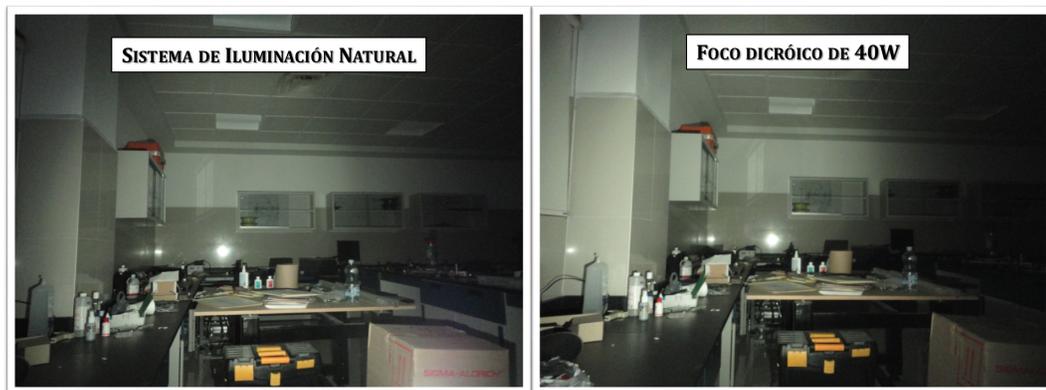


Figura 4.18: A la izquierda se observa un cuarto iluminado por el Sistema de Iluminación Natural, mientras que a la derecha se tiene el mismo cuarto iluminado con un foco dicróico de 40 W.

4.7.1. Variaciones en la Potencia de la Fuente debido al Desplazamiento del Disco Solar

Otro punto importante es que, dado que no contamos con un sistema de seguimiento solar, no podemos garantizar que la fuente sea constante y de hecho, por el comportamiento del Sol, sabemos que no lo es, la radiación solar cambia a lo largo del día y de los días. Para probar este hecho se

dejó fijo el colector (lente de Fresnel) para que estuviera perpendicular a los rayos solares y se procedió a ubicar el foco, pasados 10 minutos se volvió a ubicar el foco sobre el mismo sistema de referencia, posteriormente, se realizó el mismo proceso hasta completar 30 minutos; los resultados finales arrojaron que en 30 minutos, habiendo un correspondiente desplazamiento del disco solar de aproximadamente 5° según la carta solar del día, el foco se desplazó 1.5 centímetros (Fig. 4.19). El resultado obtenido nos demuestra que no podemos garantizar que la fuente es constante para nuestro Sistema.

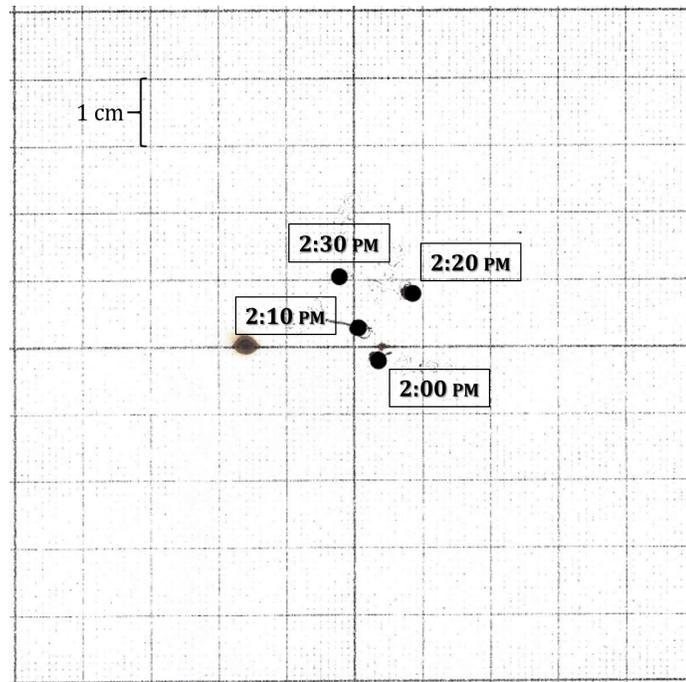


Figura 4.19: Desplazamiento del foco del lente de Fresnel en un lapso de 30 minutos.

Habiendo mostrado las pruebas de iluminación a la salida del sistema propuesto en esta investigación, concluimos el presente capítulo referente a la implementación experimental de nuestro Sistema de Iluminación Solar basado en una lente de Fresnel y Fibra Óptica Plástica, el siguiente capítulo será dedicado a las conclusiones derivadas de la presente investigación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Con este trabajo se cierra la etapa inicial del presente proyecto de investigación, sin embargo, aún existen múltiples áreas de oportunidad, sobre todo en la parte de implementación experimental del sistema de iluminación.

Antes de comenzar a tratar las diversas conclusiones obtenidas del presente trabajo, resulta importante resaltar que la mayor aportación que se pretende realizar con esta tesis es la existencia de un análisis matemático y numérico a fondo, que nos permita conocer los puntos críticos del sistema y, sobre todo, que sirva de guía para la optimización de sistemas futuros con esquemas similares, para que se incremente al máximo su eficiencia gracias al acoplamiento óptico, y no por el uso de sofisticados y costosos sistemas de seguimiento solar.

Después de haber realizado un extenso análisis teórico, empleando herramientas numéricas y matemáticas, sobre el comportamiento del sistema de iluminación solar propuesto y, sobre todo, un detallado estudio sobre sus tolerancias de alineación, además de llevar a cabo la implementación experimental básica del sistema para corroborar lo simulado, resulta importante destacar los principales logros obtenidos a través de la presente investigación, así como plantear las posibilidades de trabajo a futuro que surgen al dar por concluida la misma.

5.1. Recapitulación

La presente tesis hizo un estudio completo sobre el estado del arte de los principales sistemas de iluminación, brindando especial atención a aquellos sistemas que emplean la luz del Sol como la fuente de energía principal y directa para cumplir su función.

A su vez, se construyó un completo marco teórico que abarco todos los temas necesarios para comprender el funcionamiento de los Sistemas de Iluminación Solar basados en lentes de Fresnel y Fibras Ópticas Plásticas. Se comenzó revisando las principales cantidades radiométricas y fotométricas, así como su relación con teorías como la radiación del cuerpo negro o las leyes de la Termodinámica; después se cubrieron los conceptos básicos relacionados con la Óptica Geométrica resaltando la teoría necesaria para comprender el funcionamiento de los lentes y los espejos cóncavos y convexos, sin pasar por alto los principios de la Óptica Anidólica, que resulta ser la rama de la Óptica Geométrica que nos permite analizar de la manera más adecuada lo que ocurre en los sistemas de iluminación. Finalmente, se revisó toda la teoría relacionada con las fibras ópticas

plásticas y los lentes de Fresnel, considerando ambos puntos de vista, el de la Óptica Geométrica y el de la Óptica Anidólica.

Posteriormente, se aprovecharon los conceptos vistos en el capítulo concerniente al Marco Teórico para realizar un análisis matemático de los componentes involucrados en el sistema de iluminación propuesto. Se prosiguió con un análisis completo del sistema usando los programas de diseño de sistemas ópticos: *OSLO*® y *ZEMAX*® para corroborar los datos obtenidos matemáticamente y, en especial, para hacer simulaciones que nos permitieron conocer las tolerancias de alíneación para el acoplamiento del sistema.

Finalmente, se llevó el sistema propuesto a su implementación experimental de una manera simple, lo cual nos permitió analizar la viabilidad del diseño propuesto.

5.2. Contribuciones

La presente sección enumerará las principales contribuciones logradas con esta investigación.

5.2.1. Contribuciones a la Investigación en México

- Se logró construir una muy completa referencia sobre la evolución de los sistemas de iluminación, su impacto en el ambiente y la sociedad, así como una revisión de las principales técnicas para lograr una iluminación sustentable.
- Se construyó una de las pocas fuentes de información que reúne toda la información teórica básica necesaria para la comprensión, modelado y construcción de este tipo de sistemas de iluminación, siendo, probablemente, la primera fuente de origen mexicano en cubrir todas las áreas.
- Se propuso uno de los primeros sistemas de iluminación de esta clase de origen mexicano, lo cual nos permite ser precursores en esta área de investigación acerca de iluminación solar directa.
- Se planteó una técnica para el pulido de FOP, lo cual no se encuentra actualmente en la literatura.
- Se logró conocer, desde un punto de vista puramente óptico, los factores críticos que afectan la eficiencia del sistema como las tolerancias en la alíneación y los parámetros de la fibra plástica.

5.2.2. Construcción del Sistema de Iluminación Natural

5.2.2.1. Caracterización de Componentes

- Se obtuvo, a partir de conocer el diámetro de apertura libre y la longitud focal del lente de Fresnel, el radio de apertura de la curvatura del lente, la cual no nos fue brindada por el fabricante del Fresnel.

- Se pudo deducir el problema de desalineamiento existente en nuestro sistema gracias a que se calcularon las aperturas numéricas y semi conos máximos del lente de Fresnel y de la FOP.
- Se obtuvieron los rangos del espectro solar que se ven atenuados al pasar por el disipador, para así corroborar que la radiación visible no se ve afectada por nuestro medio de disipación del calor.

5.2.2.2. Manipulación de Fibra Óptica Plástica

- El presente proyecto mostró la importancia de saber manipular y dar mantenimiento a las fibras ópticas plásticas, debido a que si sus caras se encuentran en mal estado, nuestra salida se verá afectada con coloraciones y manchas que impiden la correcta transmisión de la luz.

5.2.2.3. Disipación de Calor

- Durante esta investigación se logró disipar drásticamente el calor colectado por el sistema, sin embargo, nuestras temperaturas de salida del disipador aún se encuentran entre los 100° y los 200°, existiendo aún el riesgo de dañar la FOP, por lo cual aún es necesario buscar métodos complementarios de disipación del calor.

5.2.2.4. Acoplamiento de Colector y FOP

- A nivel teórico se logró comprobar que no existe un total acoplamiento entre el Fresnel y la FOP, razón por la cual, si se desea tener un sistema con menos pérdidas, deberá considerarse el cambiar el lente de Fresnel por uno que si sea compatible con la fibra.
- Se plantearon diversas posibilidades para corregir los problemas por acoplamiento para implementaciones futuras.

5.2.3. Análisis de Tolerancias

El estudio de las tolerancias fue la parte más crítica de la presente investigación, logrando destacar los puntos que se describen a continuación.

5.2.3.1. Lente de Fresnel

- El lente de Fresnel tiene una tolerancia de aproximadamente 0.5 pulgadas para encontrar su foco, teniendo en este rango una potencia de al menos un 74% y una macha focal que no rebasa las 0.25 pulgadas de diámetro. Estas tolerancias se consideran altas, ya que nos permiten tener un sistema más flexible y que continúe siendo eficiente en la mayor parte de los casos.

- Por otra parte, si revisamos las tolerancias angulares del lente de Fresnel, encontramos que es un componente altamente sensible, que deja de funcionar de manera adecuada a desalineamientos angulares mayores a 0.8° , por lo cual es importante garantizar la perpendicularidad de los rayos solares con respecto al lente.

5.2.3.2. Disipador de Borosilicato

- Las tolerancias de alineación espacial consisten un factor importante para lograr un mayor aprovechamiento de la luz introducida al sistema, debido a que si se logra mantener el disipador dentro del rango de la longitud focal del lente de Fresnel y este no se encuentra desalineado con respecto al eje axial, lograremos captar la mayoría de la luz enfocada por el Fresnel.
- Por otro lado, las desalineaciones angulares pueden jugar un papel crítico ya que implican un incremento en el cono de salida de la varilla o un desfase total de la cara de la fibra, razón por la cual se deben reducir al máximo estas desalineaciones.

5.2.3.3. Fibra Óptica Plástica

- Las tolerancias de alineación espaciales de la FOP son fundamentales, ya que ligeras desviaciones en cualquiera de los ejes representan pérdidas de luz en la salida del sistema.
- Sin embargo, la FOP posee una alta tolerancia a las desalineaciones angulares, viéndose prácticamente exenta de pérdidas considerables cuando se desalinea angularmente.

5.3. Áreas de Oportunidad y Trabajo a Futuro

La presente investigación representa solo el inicio para este tipo de proyectos de iluminación sustentable. A continuación se listan las áreas de oportunidad, es decir las áreas que exceden los alcances de esta tesis, pero que se pueden implementar para producir un prototipo funcional; y el trabajo a futuro derivado de la misma, en otras palabras, nuevas investigaciones que enriquecerán el presente trabajo.

5.3.1. Áreas de Oportunidad

- Realizar una implementación experimental completa que permita ratificar todos los datos obtenidos de las simulaciones.
- Introducción de filtros complementarios al sistema para lograr una mayor disipación del calor concentrado
- Buscar y utilizar otros dispositivos más eficientes para la realización de las mediciones de temperatura y de iluminación del sistema.

- Determinar un procedimiento para hacer una conversión entre cantidades radiométricas a fotométricas, con lo que se podrá realizar una verdadera comparación entre los datos teóricos y los experimentales.
- Diseño e implementación de un sistema de seguimiento solar que permita, en base a las tolerancias estudiadas, mantener el lente de Fresnel alineado con la radiación solar.

5.3.2. Trabajo a Futuro

- Complementar la presente tesis con otras investigaciones relacionadas con la creación de luminarias para este tipo de sistemas, lo cual permitirá construir luminarias para la distribución final de la luz colectada.
- Diseñar una nueva geometría para el disipador de vidrio que nos permita incrementar las tolerancias del lente de Fresnel y, a su vez, que reduzca la apertura numérica de la salida del disipador.
- Implementar los trabajos existentes acerca de modificaciones en la geometría de las puntas de las fibras plásticas para incrementar su cono de aceptación.
- Diseñar un dispositivo óptico secundario que evite que se requiera un sistema de seguimiento solar.
- Modificar la geometría del Fresnel para aumentar la eficiencia y las tolerancias.

Aquí se concluye el presente trabajo de investigación, posterior a la bibliografía se encuentra el Apéndice que contiene las Macros diseñadas para la elaboración de las simulaciones correspondientes al modelado numérico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Why we're here: The 230 billion global lighting energy bill*, France, 2002.
- [2] *Hybrid solar lighting illuminates energy savings for government facilities*, Washington, D.C.: U.S., 2007. U.S. Dept. of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- [3] *High-performance Kohler concentrators with uniform irradiance on solar cell*, volume 7059, 2008.
- [4] *Design and optimization of fiber lenses in plastic optical fibers for indoor illumination*, volume 8834, 2013.
- [5] 3M. Factors influencing the optical efficiency of fresnel lens concentrators.
- [6] Mauricio Acevedo. Apuntes de astronomía. Blog, Marzo 2013.
- [7] A.V. Arecchi, R.J. Koschel, and T. Messadi. *Field Guide to Illumination*. Field Guide Series. SPIE, 2007.
- [8] M. Bass and Estados Unidos) Optical Society of America (Washington (D.C.). *Handbook of Optics*. McGraw-Hill, 1995.
- [9] R.W. Boyd. *Radiometry and the detection of optical radiation*. Wiley series in pure and applied optics. Wiley, 1983.
- [10] P. Camporeale and G. Dutt. Manual de iluminación eficiente seminario de iluminación eficiente. Sitio Web de la ELI.
- [11] Camilo José Carrillo-González. Eficiencia y sostenibilidad energética en la empresa. PDF en Página Web, Octubre 2009.
- [12] J. Chaves. *Introduction to Nonimaging Optics*. Optical Science and Engineering. Taylor & Francis, 2008.
- [13] Michael Cheadle. A predictive thermal model of heat transfer in a fiber optic bundle for a hybrid solar lighting system. Master's thesis, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, 2005.

- [14] Aleksandra Cvetković. *Free-Form Optical System for Nonimaging Applications*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [15] Secretaría de Energía. El consumo energético por iluminación en México. Página Web, Enero 2012.
- [16] Ministerio de Industria Energía y Minería de Uruguay. *Manual de Iluminación eficiente*. Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, Uruguay.
- [17] Diario Oficial de la Federación, editor. *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012*, 2009.
- [18] Pedro Fernández Díez. *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*. Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 1992.
- [19] Marie-Claude Dubois and A. Blomsterberg. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future north european, low energy office buildings: A literature review. *Energy and Buildings*, 43(10):2572 – 2582, 2011.
- [20] J.A. Duffie and W.A. Beckman. *Solar Energy Thermal Processes*. A Wiley-Interscience Publication. Wiley : New York., 1974.
- [21] M. A. Duguay and R. M. Edgar. Lighting with sunlight using sun tracking concentrators. *Appl. Opt.*, 16(5):1444–1446, May 1977.
- [22] L. Edwards, P.A. Torcellini, and National Renewable Energy Laboratory (U.S.). *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants*. National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [23] Alejandro Estrada. Proyecto nacional de eficiencia energética en alumbrado público municipal, 2012.
- [24] Melissa Lapsa et al. Hybrid solar lighting provides energy savings and reduces waste heat. *Energy Engineering*, 104(4):7–20, 2007.
- [25] S. A. de C. V. Everlux. Funcionamiento de solatube. Flash.
- [26] Gas Natural Fenosa. Sistemas de iluminación: Lámparas y luminarias eficientes. Technical report, Canal de Eficiencia Energética Gas Natural Fenosa, 2013.
- [27] Hanna M. Kirsi G. Sipila A. Ferenets, M. and A. Harlin. Manufacturing methods for multi step index plastic optical fiber materials. *AUTEX Research*, 4:164 – 174, 2004.
- [28] Antonio Álvarez Fernández Balbuena. *Sistemas Ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid. Escuela Universitaria de Óptica, 2011.

- [29] Leandro Ferrón, Andrea Pattini, and Ángel Lara. Disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural. *Avances en Energías renovables y Medio Ambiente*, 9:109–114, 2005.
- [30] L. M. Fraas, W. R. Pyle, and P. R. Ryason. Concentrated and piped sunlight for indoor illumination. *Appl. Opt.*, 22(4):578–582, Feb 1983.
- [31] A. Ghatak and K. Thyagarajan. Module 1.7 optical waveguides and fibers. PDF Format, 2007. Es parte del material del curso en línea Fundamentals of Photonics.
- [32] A.A.K. Ghatak and K. Thyagarajan. *An Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 1998.
- [33] B.G. Grant. *Field Guide to Radiometry*. Field Guide Series. SPIE, 2011.
- [34] W. Grisé and C. Patrick. Passive solar lighting using fiber optics. *Journal of Industrial Technology*, 19:1, 2003.
- [35] E. Gutierrez, S. Ortega, R. Ortega, L. Bustamante, B. Quichimbo, and J. Jaramillo. Sistemas de iluminación basados en utilización de fibra óptica solar. Technical report, Universidad Técnica Particular de Loja, 2010.
- [36] E. Hecht. *Óptica*. Fuera de colección Out of series. Addison-Wesley Iberoamericana Espana, S.A., 2000.
- [37] Fresnel Technologies Inc. Fresnel lenses. Technical report, Fresnel Technologies Inc., 2012.
- [38] Huelsz G. Jaramillo, O. A. and J. A. del Río. A theoretical and experimental study of sio2 optical fibres transmitting concentrated radiative energy. *Applied Physics*, 35:95 – 102, 2001.
- [39] O A Jaramillo, J A del Río, and G Huelsz. A thermal study of optical fibres transmitting concentrated solar energy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(9):1000, 1999.
- [40] Oscar Alfredo Jaramillo Salgado. Transporte de energía solar concentrada a través de fibra óptica. acoplamiento fibra concentrador y estudio térmico. Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.
- [41] L. Jutglar. *Energía solar*. Energías alternativas y medio ambiente. CEAC, 2004.
- [42] C. Kandilli and K. Ulgen. Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1):67 – 84, 2009.
- [43] R.P. Leslie. Capturing the daylight dividend in buildings: why and how? *Building and Environment*, 38(2):381 – 385, 2003.
- [44] Danny H.W. Li and Joseph C. Lam. An investigation of daylighting performance and energy saving in a daylit corridor. *Energy and Buildings*, 35(4):365 – 373, 2003.

- [45] David Lingfors and Tarja Volotinen. Illumination performance and energy saving of a solar fiber optic lightingsystem. *Opt. Express*, 21(S4):A642–A655, Jul 2013.
- [46] A.B. Meinel and M.P. Meinel. *Aplicaciones de la energía solar*. Reverté, 1982.
- [47] Manuel Muñoz Herrera. Imagen.
- [48] Jeff D. Muhs. Hybrid solar lighting doubles the efficiency and affordability of solar energy in commercial buildings. *CADDET Energy Efficiency*, 4:6–9, 2000.
- [49] Nasif Nahle Sabag. Radiación solar en la capa exterior de la atmósfera terrestre y sobre la superficie terrestre. *Biology Cabinet, Suelo y Océano*:13, 2011.
- [50] K. Okamoto. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Electronics & Electrical. Elsevier, 2006.
- [51] J.M. Palmer and B.G. Grant. *The Art of Radiometry*. SPIE Press Monograph. SPIE Press, 2010.
- [52] Rüdiger Pashotta. Rp photonis encyclopedia.
- [53] Stephen M. Pauley. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63(4):588 – 596, 2004.
- [54] Leno S. Pedrotti. Module 1.3 basic geometrical optics. PDF Format, 2003. Es parte del material del curso en línea Fundamentals of Photonics.
- [55] Christof Pruss, Eugenio Garbusi, and Wolfgang Osten. Testing aspheres. *Opt. Photon. News*, 19(4):24–29, Apr 2008.
- [56] M.S. Rea and Illuminating Engineering Society of North America. *The Iesna Lighting Handbook: Reference & Application*. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA/LIGHTING HANDBOOK. Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [57] R. Resnick. *Fundamentos de Física - Volumen 1*. Grupo Editorial Patria, 5 edition, 2002.
- [58] Jae-Hyun Ryou and Russell D. Dupuis. Introduction: Optics in leds for lighting. *Opt. Express*, 19(S4):A897–A899, Jul 2011.
- [59] J. Schanda. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007.
- [60] SOLATUBE. Solatube web site. Technical report, SOLATUBE, 2013.
- [61] SPIE, editor. *Fresnel lens solar concentrator derivations and simulations*, volume 8129 of *Novel Optical Systems Design and Optimization*. SPIE, SPIE, 2011.
- [62] Herse M. Simon P. C. Labs D. Mandel H. Gillotay D. Thuillier, G. and T. Foujols. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the atlas 1 2 3 and eureka missions. *Sol. Phys.*, 214:1–22, 2003.

-
- [63] Chih-Hsuan Tsuei, Jui-Wen Pen, and Wen-Shing Sun. Simulating the illuminance and the efficiency of the led and fluorescent lights used in indoor lighting design. *Opt. Express*, 16(23):18692–18701, Nov 2008.
- [64] Chih-Hsuan Tsuei, Wen-Shing Sun, and Chien-Cheng Kuo. Hybrid sunlight/led illumination and renewable solar energy saving concepts for indoor lighting. *Opt. Express*, 18(S4):A640–A653, Nov 2010.
- [65] Irfan Ullah and Seoyong Shin. Development of optical fiber-based daydaylight system with uniform illumination. *Optical Society of Korea*, 16:247 – 255, 2012.
- [66] Sánchez G. Ceballos D. Selvas R. Viera, P. Characterization of fresnel lenses for applications in indoor solar lighting systems. In *Mexican Optics and Photonics Meeting 2013*, 2013.
- [67] M.J. Weber. *Handbook of Optical Materials*. Laser & Optical Science & Technology. Taylor & Francis, 2002.
- [68] R. Winston, J.C. Miñano, and P. Benítez. *Nonimaging Optics*. Electronics & Electrical. Elsevier Academic Press, 2005.
- [69] W.L. Wolfe. *Introduction to Radiometry*. SPIE tutorial texts. SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [70] Ken Yeang. Light pipes an innovative design device for bringing natural daylight and illumination into buildings with deep floor plan. Technical report, Global Entrepolis, 2003.
- [71] Development Corporation ZEMAX. *ZEMAX User's Guide*. ZEMAX, 2009.

APÉNDICE A

MACROS DE ZEMAX[©]

En este Apéndice se incluyen todas las macros que se utilizaron para la realización de las simulaciones en ZEMAX[©].

Para la realización de cada uno de ellos se utilizó el lenguaje de programación de ZEMAX[©] [71].

A.1. FresnelFoco1.zpl

```
FOR i,0,15,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea movemos el detector
SETNSCPOSITION 1,3,3,6.125+i/10
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
PRINT i/10+6.125
NOMBREARCHIVO$=$str(i)
DIRGUARDADO1$ =‘D:\ZemaxCosas\Foco\Diagrama’
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$=‘D:\ZemaxCosas\Foco\Mancha’
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i
PRINT ‘FIN’
```

A.2. FresnelFoco2.zpl

```

FOR i,0,30,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea movemos el detector
SETNSCPOSITION 1,3,3,6.40+i/100
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
PRINT i/100+6.40
NOMBREARCHIVO$=$str(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Foco2\Diagrama'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Foco2\Mancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i
PRINT 'FIN'

```

A.3. Disipador.zpl

```

FOR i,0,15,1
SETNSCPOSITION 1, 3, 3, 6.42+i/20
SETNSCPOSITION 1, 4, 3, 5.27
dummy = NSDD(1,0,1,0)
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!GUARDAMOS Pyrex 5.12
NOMBREARCHIVO$='Pyrex130+'+$str(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Mancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 1000
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Linea'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 1000
PRINT 6.42+i/20
NEXT i
FOR i,0,15,1
!Cambiamos posición del disipador
SETNSCPOSITION 1, 3, 3, 6.42+i/20
!Cambiar a Pyrex 160 = 6.3 Cambiar parámetro 2
SETNSCPARAMETER 1, 3, 2, 6.3

```

```
!Cambiamos posición del detector
SETNSCPOSITION 1, 4, 3, 6.45
!Trazado de Rayos
dummy = NSDD(1,0,1,0)
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!GUARDAMOS Pyrex 6.30
NOMBREARCHIVO$="Pyrex160+"+$str(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Mancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 1000
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Linea"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 1000
NEXT i
FOR i,0,15,1
!Cambiamos posición del disipador
SETNSCPOSITION 1, 3, 3, 6.42+i/20
!Cambiar a Pyrex 180 = 7.08 Cambiar parámetro 2
SETNSCPARAMETER 1, 3, 2, 7.08
!Cambiamos posición del detector
SETNSCPOSITION 1, 4, 3, 7.23
!Trazado de Rayos
dummy = NSDD(1,0,1,0)
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!GUARDAMOS Pyrex 7.08
NOMBREARCHIVO$="Pyrex180+"+$str(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Mancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 1000
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Linea"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 1000
NEXT i
FOR i,0,15,1
!Cambiamos posición del disipador
SETNSCPOSITION 1, 3, 3, 6.42+i/20
!Cambiar a Pyrex 200 = 7.87 Cambiar parámetro 2
SETNSCPARAMETER 1, 3, 2, 7.87
!Cambiamos posición del detector
SETNSCPOSITION 1, 4, 3, 8.02
```

```
!Trazado de Rayos
dummy = NSDD(1,0,1,0)
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!GUARDAMOS Pyrex 7.87
NOMBREARCHIVO$="Pyrex200"+$str(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Mancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 1000
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Linea"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 1000
NEXT i
FOR i,0,15,1
!Cambiamos posición del disipador
SETNSCPOSITION 1, 3, 3, 6.42+i/20
!Cambiar a Pyrex 300 = 11.81 Cambiar parámetro 2
SETNSCPARAMETER 1, 3, 2, 11.81
!Cambiar radio del Pyrex. Parametro 1
SETNSCPARAMETER 1, 3, 1, 0.19
!Cambiamos posición del detector
SETNSCPOSITION 1, 4, 3, 11.96
!Trazado de Rayos
dummy = NSDD(1,0,1,0)
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!GUARDAMOS Pyrex 11.81
NOMBREARCHIVO$="Pyrex300"+$str(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Mancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 1000
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Linea"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 1000
NEXT i
```

A.4. FOPMov.zpl

```
FOR i,0,25,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con está línea cambiamos el parámetro 4, del objeto 3
SETNSCPOSITION 1,4,3,5.13+i/10
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
PRINT i/10+5.13
!GUARDAMOS
NOMBREARCHIVO$=$str(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Fibra\Diagrama'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Fibra\Mancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO3$='D:\ZemaxCosas\Fibra\Grados'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i
PRINT 'FIN'
```

A.5. FOPMovY.zpl

```
FOR i,0,15,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con está línea cambiamos el parámetro 3, del objeto 4
SETNSCPOSITION 1,4,2,i/10
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
PRINT i/10
!GUARDAMOS
NOMBREARCHIVO$=$str(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Fibra\Diagrama'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Fibra\Mancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
```

```

DIRGUARDADO3$="D:\ZemaxCosas\Fibra\Grados"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i

```

A.6. TolTiltSource.zpl

```

FOR i,0,10,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente
SETNSCPOSITION 1,1,4,i
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!Guardamos el archivo
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\TiltSource\Diagrama"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$="D:\ZemaxCosas\TiltSource\Mancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO3$="D:\ZemaxCosas\TiltSource\Graf"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 5, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i

```

A.7. TolTiltSource2.zpl

```

FOR i,0,40 ,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente
SETNSCPOSITION 1,3,4,i/10
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!Guardamos el archivo
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\Diagrama"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500

```

```

DIRGUARDADO2$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\TamMancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO3$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\Distribucion"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO4$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\GradMancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO4$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i

```

A.8. PyrexTilt.zpl

```

FOR i,0,25,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente
SETNSCPOSITION 1,3,4,i
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!Guardamos el archivo
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)
DIRGUARDADO1$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\Diagrama"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\TamMancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO3$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\Distribucion"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO4$="D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt1\GradMancha"
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO4$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i

```

A.9. PyrexTilt2.zpl

```

FOR i,0,5,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente
SETNSCPOSITION 1,3,4,i
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!Guardamos el archivo
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt2\Diagrama'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt2\TamMancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO3$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt2\Distribucion'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO4$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt2\GradMancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO4$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500
NEXT i

```

A.10. PyrexTilt3.zpl

```

FOR i,0,25,1
dummy = NSDD(1,0,1,0)
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente
SETNSCPOSITION 1,3,4,i
!Corremos el trazado
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0
UPDATE ALL
!Guardamos el archivo
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt3\Diagrama'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt3\TamMancha'
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500

```

```
DIRGUARDADO3$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt3\Distribucion'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500  
DIRGUARDADO4$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\Tilt3\GradMancha'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO4$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500  
NEXT i
```

A.11. FOPTilt.zpl

```
FOR i,0,6,1  
dummy = NSDD(1,0,1,0)  
!Con esta línea definimos el tilt de la fuente  
SETNSCPOSITION 1,5,4,i  
!Corremos el trazado  
NSTR 1,0,1,0,0,1,1,0,0,0  
UPDATE ALL  
!Guardamos el archivo  
NOMBREARCHIVO$=$STR(i)  
DIRGUARDADO1$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\TiltFOP\Diagrama'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO1$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA$, 500  
DIRGUARDADO2$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\TiltFOP\TamMancha'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO2$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA$, 500  
DIRGUARDADO3$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\TiltFOP\Distribucion'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO3$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 4, DIRCOMPLETA$, 500  
DIRGUARDADO4$='D:\ZemaxCosas\Pyrex\TiltFOP\GradMancha'  
DIRCOMPLETA$=DIRGUARDADO4$+NOMBREARCHIVO$  
EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA$, 500  
NEXT i
```

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Perla Marlene Viera González

Candidata para el grado de
Maestra en Ingeniería Física Industrial

Tesis:

ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR CON
FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS PARA LA ILUMINACIÓN DE
INTERIORES

Campo de Estudio: Ciencias Exactas

Nació el 19 de diciembre de 1988 en Monterrey, N.L., es hija de María Andrea González Garza y Sergio Ramiro Viera Ramírez.

Desde el inicio de sus estudios fue considerada una alumna destacada y dedicada, con especial interés en las Matemáticas y las Ciencias Exactas y Naturales. A pesar de haber realizado un Bachillerato Técnico en el área de las Ciencias Sociales, emprendió sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas en donde logró titularse con honores, siendo el primer lugar de la generación 2006 - 2010 de su Licenciatura.

Posteriormente, se desempeñó como becaria en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UANL, donde trabajó en diversos proyectos de Telecomunicaciones, Óptica y Divulgación Científica, siendo los dos últimos los que la llevaron al inicio de sus estudios de Maestría en el área de la Ingeniería Física Industrial.