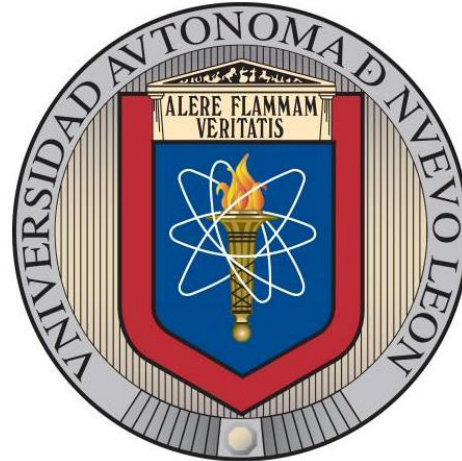


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



TESIS

**DISEÑO DE UN COLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN LENTES
DE FRESNEL ANIDÓLICOS PARA APLICACIONES DE ILUMINACIÓN**

POR

PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ

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

ENERO, 2019

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



TESIS

**DISEÑO DE UN COLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN LENTES
DE FRESNEL ANIDÓLICOS PARA APLICACIONES DE ILUMINACIÓN**

POR

PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ

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

ENERO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis DISEÑO DE UN COLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR BASADO EN LENTES DE FRESNEL ANIDÓLICOS PARA APLICACIONES DE ILUMINACIÓN, realizada por la alumna PERLA MARLENE VIERA GONZALEZ, con número de matrícula 1311766, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctora en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Edgar Martínez Guerra
Presidente
Asesor de tesis (interno)

Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
Secretario
Coasesor de Tesis (externo)

Dr. Iván Moreno Hernández
1er vocal (externo)

Dr. Guillermo Salceda Delgado
2do vocal (interno)

Dr. Daniel Toral Acosta
3er vocal (interno)

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 2019

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

James M. Palmer

If you have knowledge, let others light their candles with it

Margaret Fuller

Dedicado a mi familia: mamá, abue, Memo.

AGRADECIMIENTOS

La culminación de mis estudios de posgrado a través de la escritura y presentación de esta tesis acerca de mi investigación doctoral representa la suma de muchos esfuerzos, no solo personales, sino de muchas personas que directa o indirectamente formaron parte de este proceso de formación y crecimiento personal y profesional.

Quiero agradecer a mi compañero favorito, quien me ha acompañado en cada paso que dí, Guillermo Sánchez, muchas gracias por todo, gran parte de este logro es también tuyo.

También quiero agradecer al Dr. Daniel Ceballos, mi asesor y el primer doctor que realmente creyó en mí, gracias por guiarme y por seguir apoyándome sin importar las adversidades ni la distancia. Además, quiero agradecer al Dr. Edgar Martínez, mi otro asesor, gracias por adoptarme, por apoyarme, seguir mis locuras, tenerme paciencia y gracias por esa confianza, espero este sea el primero de muchos proyectos que hagamos en colaboración. Gracias a lo dos, sin ustedes esto no se hubiera logrado.

Agradezco a mi familia, es especial a mi mamá, María Andrea González, por siempre apoyarme, pero sobre todo por educarme como una mujer responsable e independiente, por enseñarme los valores que ahora me distinguen y me permiten decir que son una investigadora con ética y principios, mis logros siempre serán sus logros. De igual forma, agradezco a mi Abue, María Andrea Garza, gracias por ser ese recibimiento cálido que uno requiere después de un largo día de trabajo, que me brindó fuerza e inspiración para hacer este proyecto. También agradezco a mi madrina, María Pinedo, por ser un apoyo durante todo este tiempo, y por siempre disfrutar y festejar mis logros. Además, quiero agradecer a mi tío, Miguel González, por estar ahí sin pensarlo cada que pedí su ayuda, por preocuparse por mí y por apoyarnos.

Gran parte de este proceso de doctorado fue posible gracias al apoyo de la administración de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, especialmente del Dr. Rogelio Sepúlveda, quien desde que fue mi maestro en la Licenciatura en Ciencias Computacionales ha creído en mis capacidades y me ha apoyado y brindado oportunidades para mi crecimiento académico y profesional, espero poner muy en alto el nombre de mi segunda casa, la FCFM. Así mismo, gracias a mis “profes”, quienes me han brindado su consejo para seguir avanzado y combinar la vida de estudiante de doctorado y mi labor como docente, gracias Dr. Álvaro Reyes y gracias Dr. José Apolinar Loyola. También, agradezco al Dr. Atilano Martínez por su confianza, creer en nosotros y por brindarnos su ayuda cuando la requerimos. En especial, gracias a los cuatro por apoyarnos, cada quien en sus distintos roles, en el proceso de transición

de cambio de asesor.

Parte de lo logrado en esta tesis se lo debo a mis amigos, quienes con escucharme, con dedicarme su tiempo, me dieron las fuerzas, los ánimos y los ratos de desestrés necesarios para seguir, gracias: Mimi, Lucy, Aalan, Andrés, Richard.

También agradezco a mis “Patitos”, quienes me ayudaron para seguir con la divulgación de la ciencia, sin descuidar mis trabajos de investigación, gracias por entender cuando desaparecía y por sacar adelante pendientes cuando no estaba, en especial muchas gracias a Isma, Borjas, Max, Fab y todos los patitos que han ayudado, tanto veteranos, como recién llegados.

Gracias también a mis sinodales, el Dr. Iván Moreno, el Dr. Daniel Toral y el Dr. Guillermo Salceda, por su dedicación a la evaluación y retroalimentación brindada a este trabajo de investigación, todas sus contribuciones han sido importantes para la mejora de este proyecto.

Agradezco además, al Dr. Miguel Torres Cisneros por ser un ejemplo a seguir y por todos los consejos que contribuyeron en mi formación académica. De igual forma, al Dr. Selvas por el apoyo brindado en mis estudios de doctorado.

Además, quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto a través de la beca 387533.

Finalmente, me permitió cambiar el idioma para agradecer a una parte fundamental de mi formación profesional y académica, la SPIE. I want to thank the International Society for Optics and Photonics (SPIE) for all the support received, thanks for always look for the development of the students and Early Career Professionals, thanks for the support with the travel grants, the optics education scholarships and the optics outreach grants that allow me to continue my work in optics and photonics and spread the word about how amazing light is. Thank you SPIE for let me be part of something bigger, for being like another great group of friends to hang out and talk about science and academic stuff, thanks for all the networking and thanks for believe in me, in every fall I suffered during my Ph. D. studies I received an excellent new, an opportunity or a recognition from this great and fantastic Society. I want to thank especially some people that were an essential part of my integration in this society: thank you, Dirk Fabian, you're and always will be a great friend to me, your support and words help me a lot; thanks Tasha, June, Meg, Pascale, Krisinda, Bonnie and Emily, you girls give me the chance to be involved every time a little more in the society, help me to believe in myself and to continue doing outreach combined with my research, with every opportunity I received, I grew up a little more and advanced to accomplish my goals, including my Ph. D. thesis; thanks SEarCarP/FLC members you are awesome and, it was great to be part of such a fantastic group, especially thanks to Christina Willis for being such a great friend, you're the extrovert friend that every introvert (as me) needs; and finally, thanks to Judy Donnelly, Anne-Sophie, Laura Tobin, Mike McKee and all the other people that had inspired me to do outreach, you taught me a lot and that knowledge help me to be a better researcher.

PRÓLOGO

La presente tesis describe un trabajo de investigación realizado durante mis estudios del Doctorado en Ingeniería Física Industrial en la Facultad Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde me especialicé en el diseño óptico anidólico de colectores de radiación solar.

Este trabajo propone una nueva metodología para diseñar, modelar y analizar novedosos esquemas de lentes de Fresnel anidólicos compuestos, con el objetivo de formar colectores solares con menor dependencia a mecanismos de seguimiento solar. Lo anterior es de gran interés para la comunidad científica y para México, debido al potencial impacto que presentan estos colectores para el uso eficiente de la radiación solar. En particular, el colector diseñado con este formalismo permitirá el desarrollo de nuevos sistemas de iluminación solar que estarán conformadas por el colector propuesto y que pueden ser complementados con elementos ópticos secundarios, tales como fibras ópticas plásticas y tubos de luz, lo que permitirá guiar la luz solar colectada. La principal ventaja de utilizar colectores solares sin mecanismos de seguimiento solar consiste en que estos nuevos colectores serán más fáciles de integrar e instalar en las edificaciones respectivamente.

Los resultados del presente proyecto de investigación se presentan en un documento estructurado en 6 capítulos. El primero de ellos describe la motivación de la investigación, así como el planteamiento del problema general. Asimismo, incluirá la evolución de los sistemas de iluminación artificial y natural, así como una recopilación del estado del arte de diversos colectores solares, incluyendo un apartado especial referente al estado del arte de los lentes de Fresnel.

El marco teórico necesario para la realización de este proyecto será abordado en el capítulo 2, donde se incluirán las bases teóricas de la Radiometría, la Óptica Geométrica y la Óptica Anidólica. También se revisará a detalle la teoría detrás de los prismas que integran los lentes de Fresnel, así como las ecuaciones que rigen su diseño. Finalmente, se describirán los algoritmos para diseñar lentes de Fresnel de imagen y anidólicos, incluyendo las características, ventajas y desventajas de cada lente.

Para abordar el diseño del colector solar propuesto se contará con 2 capítulos. El capítulo 3 describirá la propuesta de diseño de un domo segmentado compuesto por lentes de Fresnel anidólicos, así como la técnica seguida para su diseño. En el capítulo 4 se hablará sobre el diseño del colector propuesto y se incluirá lo referente a los experimentos numéricos y los resultados obtenidos con el modelado del mismo.

Posterior al diseño del colector, en el capítulo 5 se abordará el análisis de las

pérdidas del colector y la propuesta de técnicas de optimización para incrementar la transmitancia y la eficiencia del diseño propuesto, destacando medidas para disminuir la aberración cromática y las pérdidas por reflexión de Fresnel.

Finalmente, el capítulo 6 incluirá un resumen de lo realizado en el proyecto de investigación, así como el análisis de los resultados obtenidos, incluyendo las contribuciones realizadas a la generación de conocimiento científico, áreas de oportunidad y trabajo a futuro.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

Como resultado del trabajo de investigación doctoral se han publicado 3 artículos, dos de ellos en revistas indexadas:

- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Martínez-Guerra, E., & Ceballos-Herrera, D. E. (2018). “Mathematical Analysis of Nonimaging Fresnel Lenses Using Refractive and Total Internal Reflection Prisms for Sunlight concentration”. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(7), 4654795. DOI: 10.1155/2018/4654795.
- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Martínez-Guerra, E., & Ceballos-Herrera, D. E. (2017). “Design of a segmented nonimaging Fresnel dome for nontracking solar collection”. *Optical Engineering*, 56(7), 075103. DOI: 10.1117/1.OE.56.7.075103.
- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Ceballos-Herrera, D. E. & Selvas-Aguilar R. (2017). “Radiant Flux Analysis of a System based in Imaging Fresnel Lens and Plastic Optical Fiber with Piber Lenses”. *Research in Computing Science*, 131(119), ISSN 1870-4096.

Así mismo, los avances de la investigación fueron publicados en las siguientes memorias en extenso presentadas en congresos internacionales organizados por la Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica (SPIE):

- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Martínez-Guerra, E., & Ceballos-Herrera, D. E. (2017, Septiembre). “Optimization design of nonimaging Fresnel lens using total internal reflection prisms for sunlight concentration”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIV* (Vol. 10379, p. 103790R). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2273095.
- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Ceballos-Herrera, D. E., & Martínez-Guerra, E. (2016, Septiembre). “Design of a segmented nonimaging Fresnel lens optimized for non-tracking solar collection”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIII—Commemorating the 50th Anniversary of Nonimaging Optics* (Vol. 9955, p. 99550O). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2237781.

- Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Ceballos-Herrera, D. E., & Selvas-Aguilar, R. (2015, Agosto). “Design of a solar collector system formed by a Fresnel lens and a CEC coupled to plastic fibers”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XII* (Vol. 9572, p. 95720B). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2188222.

Adicionalmente, se ha colaborado como co-autora del siguiente artículo que ha sido enviado para su revisión:

- Sánchez-Guerrero, G. E., Viera-González, P. M., Martínez-Guerra, E., & Ceballos-Herrera, D. E. (2018). “Analysis of light extraction in square-straight light pipes by using linear and elliptical grooves”. *Optical Review*.

Así como en las siguientes memorias extenso en congresos internacionales organizados por la SPIE:

- Sánchez-Guerrero, G. E., Viera-González, P. M., Martínez-Guerra, E., & Ceballos-Herrera, D. E. (2017, Septiembre). “Numerical analysis of lateral illumination lightpipes using elliptical grooves”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIV* (Vol. 10379, p. 103790S). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2273096.
- Sánchez-Guerrero, G. E., Viera-González, P. M., Ceballos-Herrera, D. E., & Martínez-Guerra, E. (2016, Septiembre). “Modeling of efficient light extraction in light-pipes through specular surfaces with elliptical and lineal front shapes”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIII—Commemorating the 50th Anniversary of Nonimaging Optics* (Vol. 9955, p. 99550P). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2237829.
- Sánchez-Guerrero, G. E., Viera-González, P. M., Ceballos-Herrera, D. E., & Selvas-Aguilar, R. (2015, Agosto). “Light extraction method for mixing rods based in grooves with elliptical shape”. In *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XII* (Vol. 9572, p. 95720I). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2188303.

También, gracias a la formación recibida en Ingeniería Física durante mis estudios de Doctorado, se han publicado los siguientes trabajos en conferencias de divulgación de óptica y fotónica:

- Viera-González, P. M., & Sánchez-Guerrero, G. E. (2018, Septiembre). “IDL in Monterrey: science, art and culture of light”. In *Optics Education and Outreach V* (Vol. 10741, p. 107410Q). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2320308.
- Sánchez-Guerrero, G. E., & Viera-González, P. M. (2018, Septiembre). “Optics outreach activities: measuring learning outcomes”. In *Optics Education and Outreach V* (Vol. 10741, p. 107410N). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2320330.

-
- Viera-González, P. M., & Sánchez-Guerrero, G. E. (2016, Septiembre). “Optics 4 every1, the hands-on optics outreach program of the Universidad Autonoma de Nuevo Leon”. In *Optics Education and Outreach IV* (Vol. 9946, p. 994615). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2238070.
 - Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Ruiz-Mendoza, J. C., Cárdenas-Ortiz, G. A., Ceballos-Herrera, D. E., & Selvas-Aguilar, R. (2014, Septiembre). “Optics outreach activities with elementary school kids from public education in Mexico”. In *Optics Education and Outreach III* (Vol. 9188, p. 91880P). International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2058071.

TABLA DE CONTENIDO

1. Conceptos básicos de colectores solares	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado del Arte	2
1.2.1. Evolución de los sistemas de iluminación	2
1.2.2. Sistemas de iluminación natural	2
1.2.3. Colectores de radiación solar	10
1.2.4. Colectores basados en lentes de Fresnel	12
1.2.4.1. Antecedentes	14
1.2.4.2. Aplicaciones de lentes de Fresnel	15
1.3. Sistemas de colección de energía solar	16
1.3.1. Componentes de los sistemas de colección de energía solar	17
1.3.2. Desplazamiento del disco solar	18
1.3.2.1. Sistemas de seguimiento solar	19
1.4. Planteamiento del problema	21
1.4.1. Hipótesis	22
1.4.2. Objetivos	22
2. Lentes de Fresnel	24
2.1. Fundamentos teóricos	24
2.1.1. Radiometría	24
2.1.1.1. Radiación Óptica	26
2.1.1.2. Cantidades radiométricas fundamentales	28
2.1.1.3. Fotometría	29
2.1.1.4. Fuentes de luz	31
2.1.1.5. El Sol	33
2.1.1.6. Detectores	34
2.1.2. Óptica Geométrica	37
2.1.2.1. Transmisión, reflexión, absorción y emisión	39
2.1.2.2. Fundamentos de Óptica Geométrica	41
2.1.2.3. Elementos ópticos	43
2.1.3. Óptica Anidólica	45
2.1.3.1. Método de diseño del rayo marginal	46
2.2. Prismas	46
2.2.1. Prisma de refracción	47
2.3. Lentes de Fresnel de imagen	47

2.3.1.	Método de diseño	48
2.4.	Lentes de Fresnel anidólicos	51
2.4.1.	Método de diseño	51
2.4.1.1.	Parámetros en el diseño de lentes de Fresnel anidólicos	52
2.4.1.2.	Ecuaciones matemáticas para el diseño	53
2.4.1.3.	Algoritmo de diseño	56
2.5.	Pérdidas y aberraciones en lentes de Fresnel	58
2.5.1.	Aberración cromática	59
2.5.2.	Reflexión de Fresnel	60
3.	Diseño propuesto de colectores tipo lentes de Fresnel	62
3.1.	Método de diseño propuesto	63
3.1.1.	Análisis del desplazamiento del disco solar	63
3.1.2.	Diseño del lente de Fresnel anidólico base	64
3.1.3.	Ensamble del domo	64
3.2.	Diseño de un colector segmentado	65
3.2.1.	Desplazamiento del disco solar en CU	65
3.2.1.1.	Clasificación del desplazamiento solar acorde a θ_{in}	65
3.2.2.	Diseño del lente de Fresnel anidólico para domo de Ciudad Universitaria	68
3.2.2.1.	Proceso de diseño del lente de Fresnel anidólico	70
3.2.2.2.	Lente de Fresnel anidólico usado como base para el domo segmentado	73
3.2.3.	Alineación de segmentos e integración del domo	74
4.	Experimentos numéricos y resultados	79
4.1.	Simulaciones ópticas	79
4.1.1.	Fuente de radiación óptica	80
4.1.2.	Elemento óptico	81
4.1.3.	Detectores	82
4.1.4.	Elementos auxiliares	82
4.1.5.	Cálculo de la eficiencia	82
4.2.	Análisis de la eficiencia del domo segmentado	84
4.2.1.	Análisis de segmentos	84
4.2.1.1.	Mapeo de rangos angulares de los segmentos del domo	84
4.2.1.2.	Simulaciones individuales	86
4.2.2.	Simulación integral	92
4.2.3.	Comparativa	92
4.3.	Discusión de resultados	94
4.3.1.	Software de diseño de lentes de Fresnel anidólicos	94
4.3.2.	Metodología de diseño de domos semi-estacionarios segmentados	95
4.3.3.	Diseño de un domo segmentado semi-estacionario para Ciudad Universitaria	96
4.3.3.1.	Análisis numérico de la eficiencia del domo segmentado	96

5. Técnicas de Optimización	99
5.1. Pérdidas por reflexión de Fresnel	99
5.2. Prisma de reflexión total interna para lentes anidólicos	100
5.3. Lente de Fresnel anidólico con prismas RTI	102
5.3.1. Comparativa entre lentes con prismas refractivos y lentes con prismas RTI	104
5.3.1.1. Análisis de θ_{in}	104
5.3.1.2. Análisis del tamaño de prisma en relación con ω . . .	105
5.4. Lente de Fresnel híbrido anidólico	106
5.4.1. Comparativa de transmitancia final	108
5.5. Discusión de resultados	109
6. Conclusiones	112
6.1. Recapitulación	113
6.2. Contribuciones a la generación de conocimiento científico	113
6.3. Áreas de oportunidad y trabajo a futuro	114
6.3.1. Software de diseño de lentes de Fresnel	114
6.3.2. Colectores segmentados semi-estacionarios	115
6.3.3. Lentes con prismas de RTI y lentes híbridos	115
A .Desplazamiento solar en San Nicolás de los Garza, Nuevo León	122

LISTA DE TABLAS

1.1. Estado del Arte: Sistemas de Iluminación natural.	4
1.2. Clasificación de colectores solares.	13
2.1. Cantidades fotométricas fundamentales	30
2.2. Aproximaciones del índice de refracción en función de la longitud de onda	38
2.3. Procesos de la energía radiante incidente	41
2.4. Valores típicos para los parámetros de diseño de lentes de Fresnel anidólicos.	53
3.1. Clasificación de los desplazamientos de altitud angular y azimutal del disco solar.	68
3.2. Clasificación de los desplazamientos azimutales del disco solar.	70
4.1. Segmentos del domo semi-estacionario.	84
5.1. Parámetros de diseño de los lentes de Fresnel anidólicos.	104
5.2. Parámetros de diseño para lente refractivo, RTI e híbrido.	108
A .1. Ángulo de altitud solar α_s ($^\circ$)	123
A .2. Ángulo azimutal del Sol γ_s ($^\circ$)	125

LISTA DE FIGURAS

1.1. Evolución de las fuentes de iluminación.	3
1.2. Caminos de conversión de la radiación solar directa y sus usos.	11
1.3. Anillos escalonados de Buffon y perfil de lente de Fresnel	14
1.4. Aplicaciones de lentes de Fresnel	16
1.5. Sistema de colección de energía solar	18
1.6. Desplazamiento solar acorde a los ángulos de altitud y azimuth.	19
1.7. Aberración focal en lente de Fresnel de Imagen.	20
1.8. Sistemas de seguimiento solar de 2 ejes.	21
2.1. Ángulo plano	25
2.2. Ángulo sólido	25
2.3. Área proyectada	26
2.4. Ángulo sólido proyectado	26
2.5. Respuesta espectral del ojo humano.	29
2.6. Distribución espectral del Sol acorde al ATLAS.	34
2.7. Distribución espectral estándar D65 para un día soleado	35
2.8. Rayo de luz, frente de onda plano y frente de onda divergente	37
2.9. Flujo radiante incidente (Φ_i) en el material puede experimentar 3 fenómenos ópticos.	40
2.10. Refracción de un rayo de luz.	41
2.11. Reflexión de un rayo de luz.	42
2.12. Método de diseño del rayo marginal.	46
2.13. Trazado de rayos en un prisma de refracción.	48
2.14. Perfil de lente de Fresnel de imagen y prisma de lente de Fresnel de imagen.	49
2.15. Lente de Fresnel de Imagen circular.	50
2.16. Aceptancia angular de un prisma anidólico refractivo.	51
2.17. Perfil de lente de Fresnel anidólico.	52
2.18. Trazado de rayos para un prisma de un lente de Fresnel anidólico usando el rayo marginal izquierdo.	54
2.19. Trazado de rayos para un prisma de un lente de Fresnel anidólico usando el rayo marginal derecho.	55
2.20. Método para el diseño de lentes de Fresnel anidólicos.	57
2.21. Lente de Fresnel Anidólico tipo domo.	58

2.22. Manchas focales colectadas en el receptor de un sistema con un lente de Fresnel anidólico.	59
3.1. Altitud solar a lo largo del año	66
3.2. Ángulo azimutal a lo largo del año	67
3.3. Ángulo azimutal a lo largo del año y su clasificación en segmentos. . .	69
3.4. Lente de Fresnel anidólico tipo domo.	73
3.5. Lente de Fresnel anidólico generado como objeto tabular de Zemax [®] . . .	73
3.6. Proyección en el plano XY del domo tridimensional para observar la delimitación y alineación de los segmentos.	75
3.7. Segmentos del domo para colección de radiación solar.	75
3.8. Vistas en perspectiva del domo segmentado.	77
3.9. Vista del interior del domo.	78
4.1. Arreglo óptico para simulación.	80
4.2. Resultados de detectar la radiación proveniente de una fuente que simula ser el Sol.	83
4.3. Perfiles de simulaciones individuales a las 9:00 horas.	87
4.4. Perfiles de simulaciones individuales a las 12:00 horas.	88
4.5. Perfiles de simulaciones individuales a las 13:00 horas.	89
4.6. Perfiles de simulaciones individuales a las 15:00 horas.	90
4.7. Perfiles de simulaciones individuales a las 18:00 horas.	91
4.8. Simulación anual.	93
4.9. Eficiencia óptica de los 3 diferentes colectores.	93
4.10. Eficiencia óptica de los 3 diferentes colectores.	94
5.1. Aplicación del CLC en prismas de lentes de Fresnel anidólicos.	100
5.2. Prisma refractivo, prisma de reflexión total interna y prisma de doble reflexión total interna	101
5.3. Caminos ópticos en prismas RTI	102
5.4. Perfil de lente de Fresnel anidólico formado con prismas RTI.	103
5.5. Pérdidas en lente de RTI.	103
5.6. Comparativa de la transmitancia de acuerdo a θ_{in} para lentes con prismas refractivos y lentes con prismas RTI.	105
5.7. Comparativa de la transmitancia en relación con el tamaño y número de prismas.	106
5.8. Método para el diseño de lentes de Fresnel híbridos.	107
5.9. Perfiles de diferentes lentes de Fresnel.	109
5.10. Transmitancia de 3 lentes de Fresnel anidólicos.	110
5.11. Perfil de distribución espacial de los 3 lentes.	111
A .1. Mapa Solar para Ciudad Universitaria (UANL) en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.	122

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS BÁSICOS DE COLECTORES SOLARES

El manejo de la luz constituye el eje central de la **Fotónica** y de la **Ingeniería Óptica**, así como también su aprovechamiento para el bienestar de la sociedad. Además, el uso de la luz del Sol como fuente de energía limpia es un tema de estudio que ha sido impulsado en las últimas décadas con el fin de desarrollar nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente que permitan satisfacer las necesidades de la sociedad actual.

En ese sentido, el presente proyecto utiliza la Fotónica y la Ingeniería Óptica para *generar nuevo conocimiento científico en el diseño de colectores solares basados en lentes de Fresnel, utilizando técnicas de Óptica Anidólica (Óptica no formadora de imágenes), que tengan una gran aceptación angular para captar la mayor cantidad de flujo de radiación solar, y que permitan el uso de esta misma con fines de iluminación y aplicaciones afines.*

Para tal efecto, se presentan a continuación los conceptos básicos que fundamentan el diseño óptico anidólico y las teorías que sustentan las técnicas de colección de radiación solar, incluyendo además un estudio del estado del arte de dichas teorías y tecnologías.

1.1. Motivación

La era de los combustibles fósiles está llegando a su fin y por ende, la necesidad de encontrar fuentes alternativas de energía se ha vuelto evidente. La radiación solar, además de contribuir a la existencia de vida en nuestro planeta, representa una de las principales alternativas energéticas[1].

En este ámbito, se busca desarrollar sistemas que permitan el aprovechamiento de la luz solar para fines de iluminación en interiores. Sin embargo, esta tecnología no ha madurado y se encuentra en constante desarrollo e investigación, lo que representa un gran reto de interés científico debido a que se deben plantear diseños novedosos y eficientes de colectores solares.

1.2. Estado del Arte

La presente sección describe el estado del arte que sustenta el proyecto de investigación propuesto partiendo de los sistemas de iluminación en general, hasta llegar a la revisión particular de la evolución histórica de los lentes de Fresnel.

1.2.1. Evolución de los sistemas de iluminación

La **iluminación**, para los propósitos del presente proyecto, se define como la transferencia o transportación de luz, o radiación óptica visible, desde una fuente hasta irradiar un objetivo. Dicho término puede ser usado para el estudio de la transferencia de luz tanto en términos de óptica formadora de imagen, como de óptica anidólica.

Los sistemas de iluminación nacen con el descubrimiento del fuego hace aproximadamente 500,000 años, posterior a ello, el hombre fue inventando nuevos mecanismos para generar fuentes de iluminación, los cuales se mencionan en la Figura 1.1. Gracias a la invención de los diodos emisores de luz (LED), las fuentes de iluminación han incrementado su eficiencia, favoreciendo el ahorro energético.

Por otra parte, debemos considerar que los sistemas de iluminación no se limitan a aquellos que se constituyen por una fuente artificial de radiación visible o lámpara, ya que, el campo de la iluminación como tal, se considera que inició con el nacimiento de una fuente de iluminación para la Tierra, el Sol, por lo que al hablar de iluminación, los sistemas de iluminación natural también deben ser tomados en cuenta[2].

1.2.2. Sistemas de iluminación natural

El desarrollo de la iluminación sustentable tiene como objetivo contar con niveles de luz adecuados en edificaciones, los cuales permitan la realización de las actividades pertinentes, pero haciendo uso de la menor cantidad posible de energía eléctrica.

Los sistemas de iluminación natural son aquellos que aprovechan la luz proveniente del Sol, tanto directa como difusa, para iluminar el interior de edificaciones, lo cual tiene 2 ventajas[3]:

- **Ahorro energético.** Al contar con iluminación proveniente del exterior, la cantidad de electricidad gastada para lámparas dentro del edificio se ve reducida.
- **Mejorar la calidad de vida de las personas.** Los beneficios de la luz natural en la salud de sus ocupantes acorde a estudios sobre el ciclo circadiano y los efectos nocivos que tienen las lámparas cuyos espectros de emisión no son similares a los que genéticamente estamos acostumbrados, como la luz solar[4, 5].



Figura 1.1: Evolución de las fuentes de iluminación[2].

Actualmente, gracias a los avances en Óptica Geométrica y Óptica Anidólica, existen diversos sistemas que permiten tener iluminación natural en el interior de edificaciones, los cuales van más allá de simples ventanas o tragaluces, sino que consisten en uno o más elementos ópticos que permiten coleccionar luz del exterior (directa o difusa, según el sistema) y luego se entrega al interior con una determinada distribución e, incluso, en lugares donde, por la arquitectura de la edificación, no es posible contar con ventanas o alguna otra entrada natural de luz. Algunos de estos sistemas se listan y describen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Estado del Arte: Sistemas de Iluminación natural. Imágenes e información extraídas del Reporte de Proyecto "Daylight in Buildings"[3, 6].

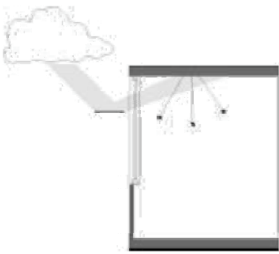
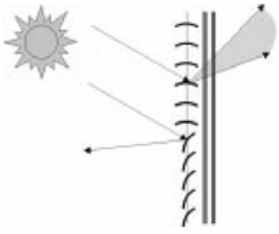
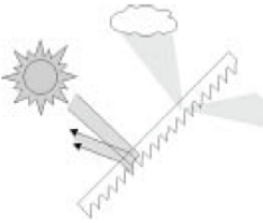
Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
Estante de Luz		Sistema clásico de iluminación natural inventado por los faraones de Egipto. Consiste en un sistema diseñado para dar sombra, pero a la vez reflejar luz en su superficie, disminuyendo el resplandor directo del cielo.	Se utiliza generalmente en la parte superior de las ventanas. En general, disminuyen la cantidad de luz dentro de la habitación, pero la distribuyen mejor.
Sistema de persiana		Es un sistema usado para brindar algo de sombra en el interior, protegiendo así de la radiación directa y re-dirigiéndola.	Usualmente se coloca dentro o fuera de las ventanas o en medio de paneles de vidrio.
Panel prismático		Es un dispositivo delgado, moldeado con una cara plana y otra compuesta por prismas o cuñas triangulares, generalmente hecho de acrílico. Su funcionamiento consiste en re-dirigir o refractar la luz natural.	Puede ser utilizado como sistema de sombra, para refractar la luz del Sol, pero transmitir su radiación difusa, así como para guiar la luz solar hacia otro punto.

Tabla 1.1: Continuación del Estado del Arte de los Sistemas de Iluminación Natural.

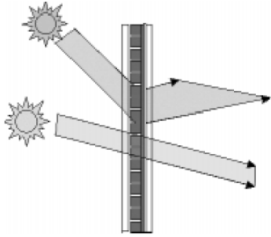
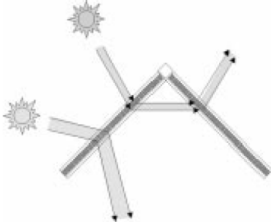
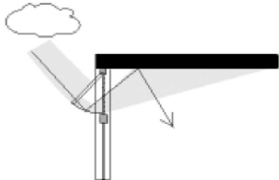
Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
Panel cortado con láser		<p>Es un sistema de redireccionamiento de luz natural, el cual se hace con micro cortes láser en un panel delgado hecho de acrílico claro. Donde cada corte se convierte en un espejo pequeño, el cual desvía la luz a través del panel, formando así un arreglo conformado por elementos rectangulares.</p>	<p>Se usa sobre las ventanas, aunque la mayor parte de la vista es bloqueada.</p>
Tragaluz selectivo angular		<p>Posee forma de pirámide y está compuesto por paneles que desvían la luz, para así transmitir más luz de alta elevación, que de baja, es decir, con un ángulo mayor respecto a la vertical.</p>	<p>Se usa para proveer relativamente irradiancia constante durante el día. Su principal aplicación es iluminar naturalmente lugares ventilados o con aire acondicionado que cuentan con pisos de gran área y techos angulares.</p>
Sombra de guía de Luz		<p>Sistema externo de sombras que dirige la luz del exterior hacia el techo.</p>	<p>Se usa para mejorar la iluminación natural de interiores en climas subtropicales, donde los edificios tienen grandes alerones externos para dar sombra, reduciendo así el calor que entra por las ventanas.</p>

Tabla 1.1: Continuación del Estado del Arte de los Sistemas de Iluminación Natural.

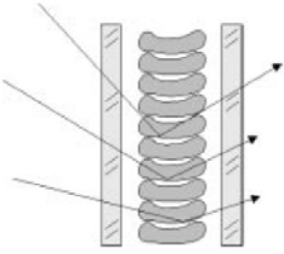
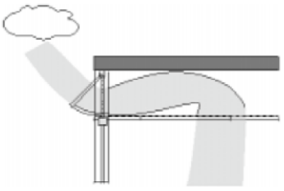
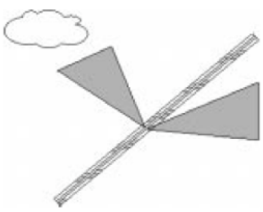
Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
<p>Vidrio director de radiación solar</p>		<p>Su principal componente es una unidad sellada de doble acristalamiento que sostiene elementos acrílicos cóncavos, los cuales se apilan verticalmente dentro de dicha unidad, para así redireccionar la luz que viene de todos los ángulos de incidencia hacia el cielo.</p>	<p>Se utiliza en especial en zonas de clima moderado, pero sólo resulta realmente útil en las mañanas o en las tardes.</p>
<p>Cielo Anidólico</p>		<p>Es un sistema que usa las propiedades de concentradores parabólicos compuestos para colectar la luz difusa proveniente del exterior. El concentrador generalmente se acopla a un ducto especular sobre el techo, para transportar así la luz dentro de la edificación.</p>	<p>Se usa principalmente para iluminar interiores en lugares con condiciones predominantemente nubladas. Generalmente se usa para edificios no residenciales.</p>
<p>Cristal guiador de luz con elementos ópticos holográficos</p>		<p>Redirecciona la luz natural exterior en el interior de edificaciones. Su principal componente es una película con rejillas holográficas de difracción, el cual se encuentra laminado entre dos paneles de vidrio.</p>	<p>Se recomienda que sólo se use en fachadas que no reciban luz directa del Sol, ya que por sus rejillas de difracción, se genera dispersión cromática.</p>

Tabla 1.1: Continuación del Estado del Arte de los Sistemas de Iluminación Natural.

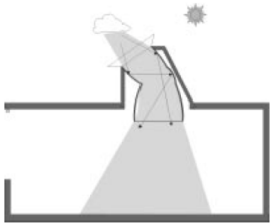
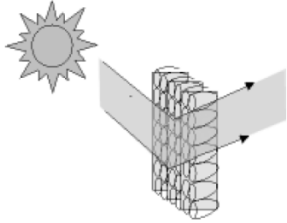
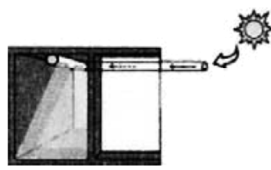
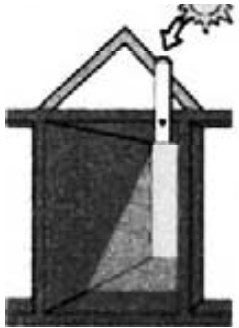
Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
Apertura anidólica cenital		<p>Es un sistema de iluminación natural usado para coleccionar luz difusa de una gran porción del cielo sin permitir que la radiación directa penetre la edificación. Esta basado en un concentrador parabólico compuesto, cuyo eje mayor se orienta de este a oeste.</p>	<p>Es principalmente usado en tiendas departamentales, atrios, edificios de múltiples pisos o plantas altas.</p>
Persiana solar anidólica		<p>Consiste en una rejilla de elementos reflectivos huecos, donde cada uno se compone de 2 concentradores compuestos parabólicos 3D. Su diseño permite recibir la luz del Sol por un costado y proveer transmisión selectiva acorde al ángulo de llegada.</p>	<p>Se usa generalmente sobre ventanas, ya sea total o parcialmente en la parte superior, pero se recomienda que se coloque en medio de dos paneles de vidrio para protegerla del polvo y otros elementos que pudieran dañarla.</p>
Tubo guiador de luz		<p>Se usa para transportar luz de Sol colectada a través de largas distancias al interior de edificaciones. Puede tener salida puntual de luz o emisión lateral a través de su longitud.</p>	<p>Generalmente es usado como elemento final de los sistemas de iluminación natural, ya que requieren de un elemento primario que colecciona la luz que será transportada a través de ellos.</p>
Tubo Solar		<p>Sistema compuesto de un elemento primario colector de radiación solar que, posteriormente, usa ductos reflectantes para permitir que la luz colectada viaje hacia paneles que permiten su distribución para uso en interiores.</p>	<p>Su instalación común es en techos y se usa para iluminar áreas con acceso limitado a ventanas, pero que no se encuentran a más de 15 metros del colector.</p>

Tabla 1.1: Continuación del Estado del Arte de los Sistemas de Iluminación Natural.

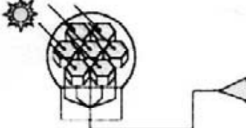
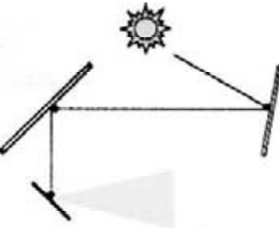
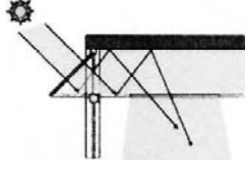
Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
Sistema de fibras		<p>Al igual que en el caso de los tubos guadores de luz, es usado para distribuir la luz colectada en el interior de edificaciones. Si su núcleo es grueso, generalmente, se utilizan de manera individual, si son fibras delgadas, como las de telecomunicaciones, se instalan como un “manejo” o en una configuración coaxial (<i>bundle</i>).</p>	<p>Generalmente se usa como elementos finales de los sistemas de iluminación natural o elemento previo a la luminaria.</p>
Helióstato		<p>Se encarga de guiar la luz a interiores a través de elementos ópticos reflectantes. Requiere de un sistema de seguimiento solar.</p>	<p>Generalmente se usan en espacios abiertos o sobre techos que redirigen hacia interiores.</p>
Techo guiador de luz		<p>Sistema similar a los techos anidólicos, pero generalmente usa elementos refractivos para conducir la luz al interior de ductos que la distribuyen a lo largo del techo.</p>	<p>Son aprovechados en climas con condiciones soleadas, se colocan en la parte superior de las edificaciones. Aún se encuentran bajo investigación y desarrollo para garantizar la uniformidad.</p>

Tabla 1.1: Continuación del Estado del Arte de los Sistemas de Iluminación Natural.

Nombre	Imagen Ilustrativa	Descripción	Aplicaciones
Sistema de sombreo selectivo direccional con elementos ópticos holográficos		Este tipo de sistemas rechaza la luz incidente desde áreas angulares pequeñas de la bóveda celeste. Con ello, puede redireccionar o reflejar la luz incidente del Sol, mientras transmite luz difusa desde otras direcciones. Estos sistemas usan rejillas de difracción holográficas sobre vidrio y la radiación directa del Sol puede ser redireccionada hacia afuera o hacia un elemento secundario para un uso alternativo. El sistema completo requiere del uso de seguidores solares.	Se recomienda colocar el sistema en fachadas o techos.

Según su funcionamiento, los sistemas de iluminación natural pueden ser clasificados en: (a) **activos**, cuando siguen activamente al Sol; (b) **pasivos**, cuando su geometría óptica les permite captar la luz del Sol en un rango de tiempo, sin el uso de seguidores solares; y (c) **sistemas con componentes ópticos secundarios**, que son sistemas que tienen que emplear elementos adicionales para la distribución de luz solar, después de ser colectada[3, 6]. En la práctica, los sistemas combinan distintas tecnologías buscando una mayor eficiencia y una mejor integración, pero en general, acorde a la IESNA (Sociedad de Ingeniería en Iluminación de Norte América, por sus siglas en inglés), se recomiendan las siguientes prácticas[7]:

- Bloquear la radiación solar directa en las proximidades de las áreas de trabajo.
- Diseñar ventanas que minimicen el brillo directo del Sol.
- Integrar iluminación eléctrica para controlar de manera responsiva los niveles de luz a lo largo del día, lo que da lugar a la iluminación híbrida, que integra la iluminación natural con alguna otra fuente, como la iluminación LED.

Los *sistemas activos* como las persianas, los helióstatos y los sistemas de sombreo selectivo direccional requieren, en la mayoría de los casos, mecanismos de seguimiento solar para alcanzar su mayor rendimiento, lo cual los convierte en tecnologías con coste extra de implementación, en especial en países con economías emergentes, como México, debido a lo costoso que resulta importar o generar tecnología de seguimiento solar de alta precisión.

Los *sistemas pasivos*, tales como los estantes de luz, los paneles, los tragaluces, las sombras de guía de luz, los vidrios directores, los cielos anidólicos, los cristales guidores de luz, las aperturas anidólicas y los tubos solares, en contraste con los sistemas activos, no requieren el uso de seguidores solares, pero su eficiencia e, incluso su horario de operación, se encuentra delimitado a periodos específicos del día y del año.

Los sistemas que emplean fibras y tubos guidores de luz dependen de la implementación de algún elemento óptico que colecte la radiación solar, el cual puede ser activo o pasivo, incluyendo así las desventajas correspondientes al tipo de colección al sistema de iluminación[3, 6].

Analizando la Tabla 1.1, es posible concluir que los sistemas de iluminación natural requieren colectar la luz solar para aprovecharla en el interior de las edificaciones y, para lograr esto, se requiere del uso de elementos ópticos que colecten la radiación del Sol en forma eficiente y con facilidad para ser integrados en las edificaciones, para posteriormente guiarla a donde será utilizada.

1.2.3. Colectores de radiación solar

Del total de energía que recibe nuestro planeta, la radiación solar directa representa alrededor del 43 %, por lo que contar con elementos que permitan su colección, es una pieza fundamental del uso de energía solar como alternativa sustentable[1]. En la Figura 1.2 se clasifican y listan los diferentes usos que puede tener la radiación solar directa, siendo su uso para iluminación el eje central del presente proyecto de investigación.

Independientemente del uso que vaya a tener la radiación solar, el primer paso para su aprovechamiento es captarla o colectarla, lo cual requiere de elementos o sistemas ópticos, los cuales pueden clasificarse según el principio óptico que utilicen para dirigir la luz[8, 9]:

- **Refractivos o Dióptricos.** Usan la refracción de la luz. Son lentes que, según su geometría, permiten obtener diversas distribuciones de flujo luminoso.
- **Reflectivos o Catóptricos.** Son elementos ópticos constituidos de superficies reflectantes.
- **Dispersivos.** Emplean prismas u hologramas para la dispersión de la luz.
- **Luminiscentes.** Concentradores de radiación global, los cuales poseen tintas fluorescentes embebidas en su superficie.

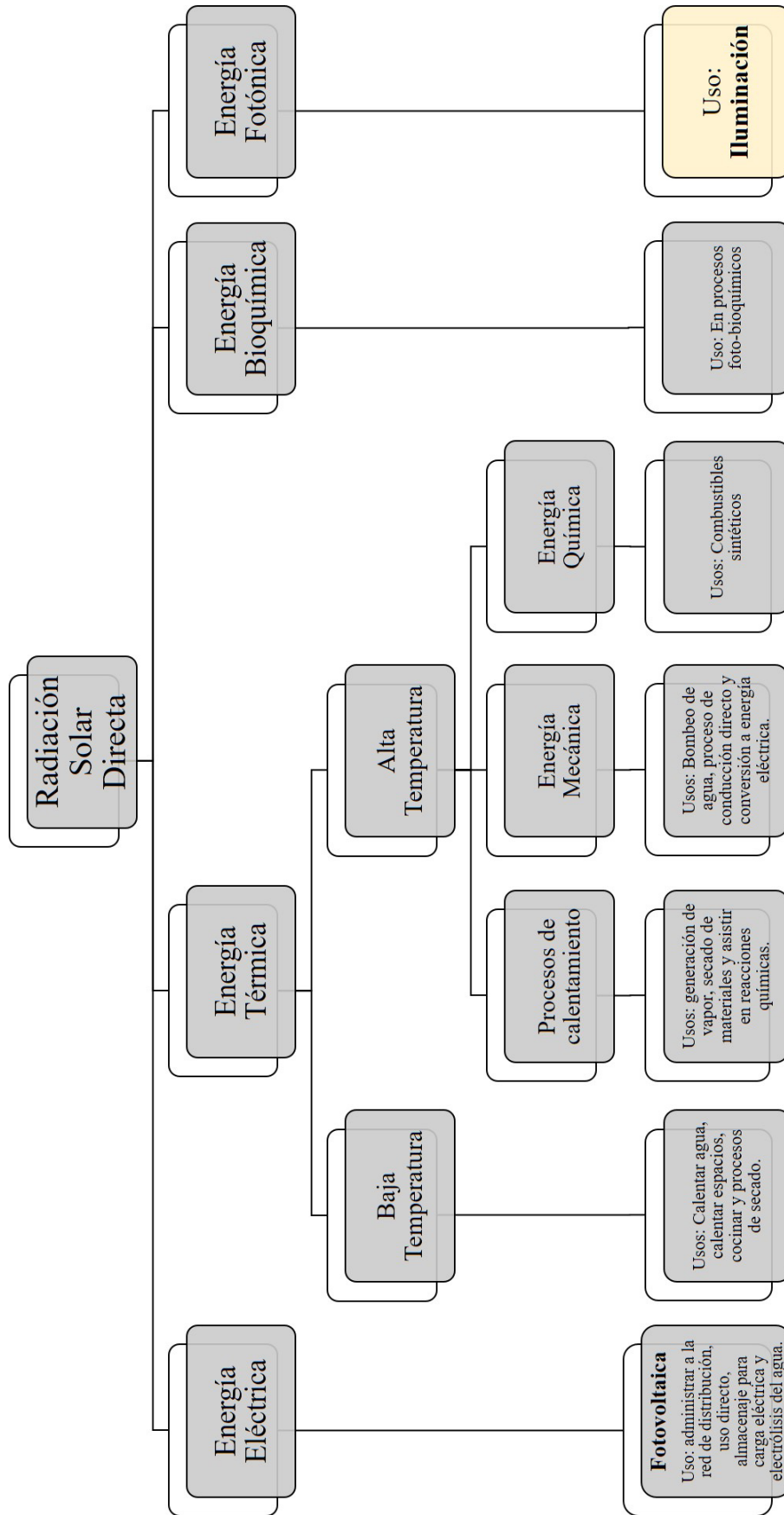


Figura 1.2: Caminos de conversión de la radiación solar directa y sus distintos usos. Mapa mental extraído y traducido de “Sustainable Energy Systems and Applications”[1].

Independientemente del uso que vaya a tener la radiación solar, el primer paso para su aprovechamiento es captarla o colectarla, lo cual requiere de elementos o sistemas ópticos, los cuales pueden clasificarse según el principio óptico que utilicen para dirigir la luz[8, 9]:

- **Refractivos o Dióptricos.** Usan la refracción de la luz. Son lentes que, según su geometría, permiten obtener diversas distribuciones de flujo luminoso.
- **Reflectivos o Catóptricos.** Son elementos ópticos constituidos de superficies reflectantes.
- **Dispersivos.** Emplean prismas u hologramas para la dispersión de la luz.
- **Luminiscentes.** Concentradores de radiación global, los cuales poseen tintas fluorescentes embebidas en su superficie.

Además, los colectores solares pueden clasificarse de acuerdo a la geometría de su superficie en[8, 10]:

- **Bidimensionales.** Son elementos extruidos donde la superficie posee curvatura con respecto a un solo eje. Su mancha focal es lineal.
- **Tridimensionales.** La curvatura de la superficie se presenta con respecto a dos ejes ortogonales. Son generalmente superficies de revolución y poseen manchas focales puntuales.
- **De forma libre.** Son aquellos elementos ópticos que no tienen simetría. Su diseño es comunmente logrado a través del método de Superficies Múltiples Simultáneas (SMS).

Además, los elementos ópticos pueden ser o no formadores de imagen. La Tabla 1.2 ofrece un listado de colectores solares con su correspondiente clasificación acorde al fenómeno óptico que gobierna su funcionamiento y si son o no formadores de imagen.

De entre los distintos colectores solares mencionados en la Tabla 1.2, destacan los lentes de Fresnel gracias a su flexibilidad en el diseño, capacidad de autocorrección de aberraciones esféricas, su menor coste y por ser menos propensos a errores de manufactura.

1.2.4. Colectores basados en lentes de Fresnel

El éxito de un sistema de colección de radiación solar utilizado para alimentar celdas fotovoltaicas, calentadores solares y sistemas de iluminación natural, depende en gran medida del elemento óptico primario utilizado como colector. En este ámbito, Xie et al. mencionan que *“la tecnología de colección de luz solar utilizando lentes de Fresnel es una forma efectiva de hacer uso óptimo de la radiación del Sol”*[9, 11].

Principio	Formadores de imagen	Anidólicos
Reflexión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disco parabólico ▪ Reflector de Fresnel ▪ Reflector Esférico ▪ Helióstato 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentrador Parabólico Compuesto ▪ Hiperboloide
Refracción	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lente de Fresnel de imagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lente de Fresnel Anidólico ▪ Lente compuesto de elipses cilíndricas ▪ Lentes de forma libre
Dispersión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prisma ▪ Holograma ▪ Rejilla de difracción 	-
Fluorescencia	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentradores planos fluorescentes

Tabla 1.2: Clasificación de colectores solares[9].

De acuerdo con Ralf Leutz, la definición más general de los lentes de Fresnel indica que: *“Los lentes de Fresnel son esencialmente cadenas de prismas que, en conjunto, concentran la luz en un determinado punto o área”*[9].

Cada uno de los prismas sigue la ley de Snell para refractar la luz incidente a un punto determinado, teniendo en conjunto el efecto de focalizar la luz en un punto, tal como un lente convencional. Por ende, es posible diseñar lentes de Fresnel a partir del diseño de prismas individuales.

Los lentes de Fresnel se clasifican en formadores de imagen y anidólicos. Los primeros siguen los principios de Óptica Geométrica que se usan para el diseño de lentes convencionales, incluyendo los conceptos de distancia focal y apertura numérica. Por otro lado, los lentes de Fresnel anidólicos introducen el parámetro de semi-ángulo de aceptación (θ_{in}), el cual permite coleccionar radiación que no llega paralela al eje óptico de la lente[9].

1.2.4.1. Antecedentes

Se cree que desde hace varios siglos atrás se descubrió que una lente sólo requería una superficie curva para tener la habilidad de enfocar luz en un punto, por lo que se extendió el diseño y uso de los lentes plano-convexos. En 1748, George de Buffon propuso teóricamente que, de hecho, se podría prescindir del exceso de material, teniendo solamente anillos escalonados que seguían la curvatura original de la lente, proponiendo así las bases teóricas de lo que hoy conocemos como lentes de Fresnel[9].

A partir de los trabajos de Buffon, el Marqués de Condorcet y Sir David Brewster trabajaron en la construcción de lentes a partir de anillos escalonados. Pero no fue hasta 1822 que Agustín Fresnel perfeccionó la idea e inventó oficialmente lo que hoy conocemos como lentes de Fresnel para ser usados en los faros, buscando sustituir a los espejos parabólicos metálicos que se acostumbraba utilizar[12, 9].

La diferencia principal entre la idea propuesta por Buffon y el lente diseñado por Fresnel se observa en la Figura 1.3. Buffon retiró el material sobrante partiendo del lado plano y manteniendo la superficie esférica original, mientras que Fresnel partió de mantener la superficie plana, creando así los primeros lentes asféricos conocidos[9].

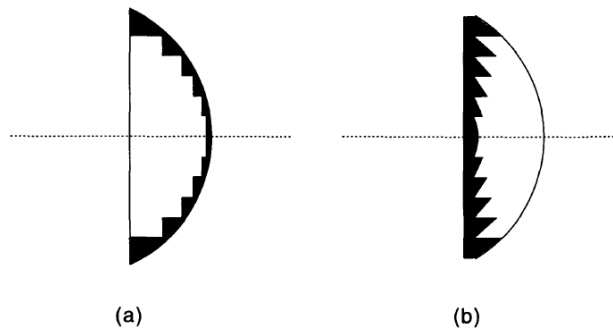


Figura 1.3: (a) Propuesta teórica de Buffon con anillos escalonados que mantienen la curvatura esférica. (b) Anillos concéntricos que forman la lente propuesta por Fresnel en 1822. Imagen tomada del libro “Nonimaging Fresnel lenses”[9].

La definición más acertada de los lentes de Fresnel sigue siendo la presentada en la memoria que Agustín Fresnel leyó ante los miembros de la Academia Francesa de Ciencias el 29 de julio de 1822 en París:

Si se divide el lente en anillos concéntricos y se remueve de la lente pequeña en el centro y de los anillos que la rodean toda la parte innecesaria de su espesor, dejando apenas lo necesario para permitir uniones fuertes a lo largo de sus bordes más delgados, uno concibe que la paralelidad de los rayos que emergen del foco puede ser igualmente obtenida dando a la superficie de cada anillo la curvatura e inclinación conveniente[12, 9].

Debido a que el vidrio era el material predilecto para la fabricación de los lentes de Fresnel hasta la década de los 50s, el uso de los mismos se vio limitado a los faros. Afortunadamente, los plásticos modernos, las nuevas técnicas de modelado y las tecnologías basadas en control por computadora para pulido y cortado de materiales permitieron mejorar la calidad de los lentes de Fresnel, pero teniendo a la vez un bajo costo de producción para fabricación en masa. Los primeros intentos de usar los lentes de Fresnel como colectores solares se dieron a partir de introducción de plásticos como el PMMA (polimetilmetacrilato) alrededor de 1950. Lo anterior permitió que, para la década de los 60s, la investigación en lentes de Fresnel creciera y diera lugar a una división de diseño entre lentes de Fresnel formadores de imagen y anidólicos, los cuales han tenido diversas aplicaciones a lo largo de la historia[9].

1.2.4.2. Aplicaciones de lentes de Fresnel

En contraste con otros colectores solares, los lentes de Fresnel ofrecen una flexibilidad en el diseño óptico gracias a su gran tolerancia a errores de manufactura, son ligeros, ocupan un menor volumen y bajo costo. Las ventajas mencionadas y su flexibilidad en el diseño han dado lugar a diversas aplicaciones, entre las que destacan[9, 13, 11]:

- Lentes tridimensionales para retroproyectores
- Lentes de imagen bidimensionales para fotocopiadoras
- Pantallas para enfoque de cámara
- Lupas o lentes de lectura que crean imágenes virtuales
- Aplicaciones en infrarrojo como holografía, comunicaciones y monitoreo de procesos
- Faros
- Aplicaciones relacionadas con colección de energía solar

Como ya se mencionó, se considera que la colección de energía solar usando lentes de Fresnel es una de las maneras más efectivas de hacer un uso completo de la luz del Sol, entre las principales aplicaciones de los lentes de Fresnel para captación de radiación solar se tiene[9, 11]:

- Alimentación de celdas fotovoltaicas
- Iluminación natural de interiores
- Calefacción de espacios
- Refrigeradores de energía solar
- Calentamiento de agua

- Aplicaciones termoeléctricas
- Generación de hidrógeno
- Láseres de bombeo solar (solar pumped lasers)
- Cocinas solares

La Figura 1.4 muestra 3 diferentes usos y diseños de lentes de Fresnel como faro, cocina solar y concentración solar para alimentación de celdas fotovoltaicas[14, 15, 16].

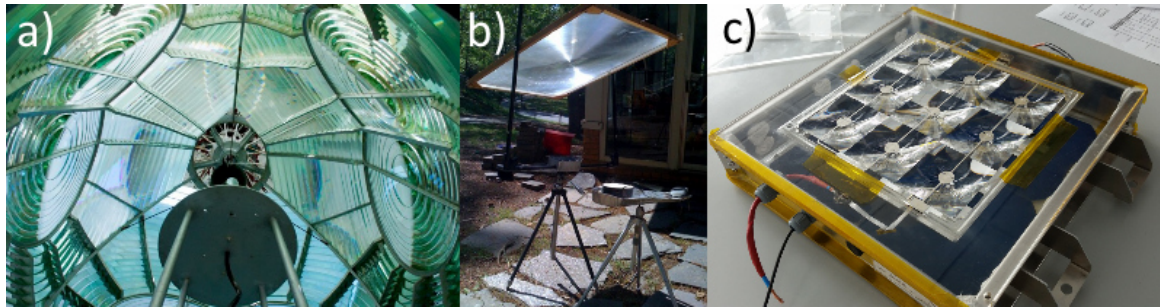


Figura 1.4: Aplicaciones de los lentes de Fresnel. (a) Arreglo de lentes de Fresnel de imagen para su uso en faros. (b) Lente de Fresnel de imagen usado como concentrador de radiación solar para cocinar alimentos. (c) Arreglo de lentes de Fresnel que integran un sistema para alimentar celdas fotovoltaicas diseñado y patentado por la empresa LPI.¹

En general, las principales aplicaciones de los lentes de Fresnel, tanto anidólicos como de imagen, han estado relacionados con la concentración solar para celdas fotovoltaicas, pero su integración en sistemas de iluminación de interiores sigue siendo un nicho con importantes áreas de oportunidad.

1.3. Sistemas de colección de energía solar

El diagrama de la Figura 1.2 nos muestra las diversas aplicaciones que se tienen de la colección de energía solar y en todos los casos es necesario contar con un sistema que permita la colección, distribución y entrega de la radiación colectada. Para los fines del presente proyecto, dichos sistemas se denominarán **sistemas de colección solar**.

¹Imágenes tomadas de: (a) La página web de la "Donald Bren School of Information and Computer Sciences"[14]. (b) La página web "Green Cooking Wiki"[15]. (c) Página web de Light Prescriptions Innovators (LPI - <http://www.lpi-11c.com/>)[16].

1.3.1. Componentes de los sistemas de colección de energía solar

Los sistemas de colección solar varían en complejidad y cantidad de elementos acorde a su aplicación final y a las características requeridas en la radiación colectada (forma de la distribución, uniformidad, índice de concentración, rango de longitudes de onda aceptadas, etc.), pero en general se pueden identificar los siguientes componentes[9, 10, 17, 18, 19]:

- **Elemento óptico primario (POE, por sus siglas en inglés)** que es usualmente un lente de Fresnel, un espejo parabólico o un concentrador parabólico compuesto (CPC).
- **Elemento óptico secundario (SOE, por sus siglas en inglés)** que puede o no integrarse al sistema de colección solar, se usa para refractar y/o reflejar total o parcialmente la radiación colectada de alguna manera específica. Los SOE pueden ser usados para incrementar el índice de concentración, aumentar el ángulo de aceptación de los sistemas anidóticos, contar con una mayor tolerancia de alineación y/o de precisión del sistema de seguimiento solar o modificar las características de la distribución espectral tales como uniformidad o forma.
- **Guía de luz.** Algunos sistemas requieren que la radiación colectada sea transportada a otras ubicaciones para su posterior aprovechamiento. Las guías de onda más comunes son las fibras ópticas y los ductos reflectantes, las cuales usan, por lo general, el fenómeno de reflexión total interna (RTI) para garantizar el viaje de la luz de un punto a otro.

La Figura 1.5 muestra un ejemplo simple de un sistema de colección de luz solar para iluminación de interiores basado en lentes de Fresnel de imagen y fibras ópticas plásticas. El sistema está compuesto por un POE, un SOE que se usa para disipar calor y fibra óptica plástica de núcleo grueso para su distribución final[20].

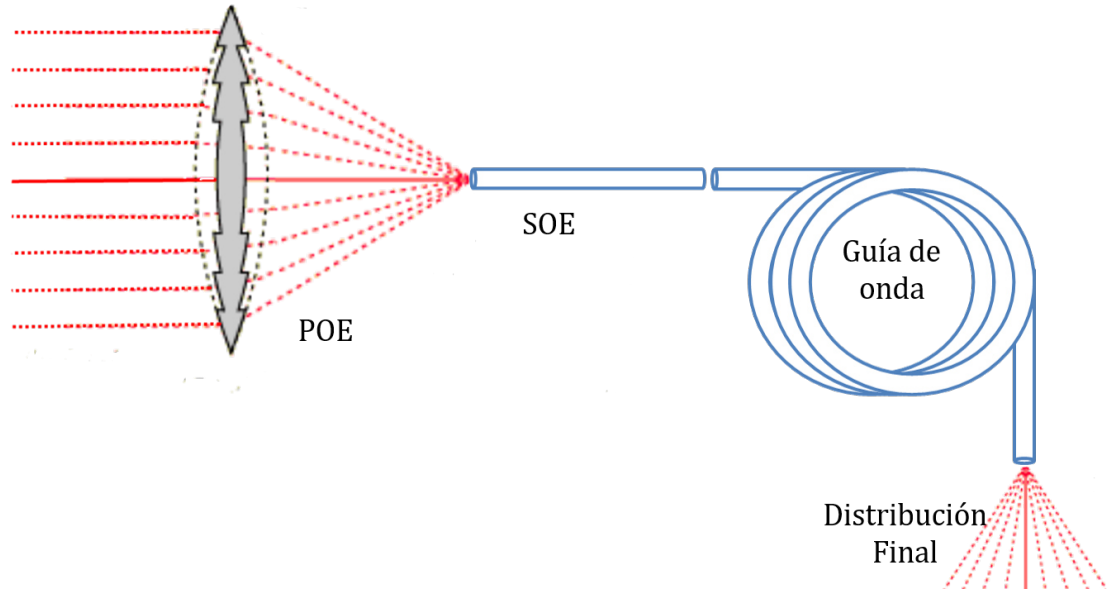


Figura 1.5: Ejemplo de un sistema de colección de energía solar compuesto de un lente de Fresnel de imagen, un elemento secundario que sirve para disipar calor y homogeneizar la radiación colectada y fibra óptica que distribuye la luz colectada[20].

1.3.2. Desplazamiento del disco solar

En general, para colectores de energía solar basados en lentes de Fresnel de imagen y anidólicos, su eficiencia se ve incrementada cuando el eje óptico del lente se mantiene paralelo a los rayos solares. Por ende, una parte fundamental y previa al diseño del sistema, es la consideración del desplazamiento aparente del disco solar (Figura 1.6), el cual, desde el punto de vista del espectador (en este caso el colector solar) puede ser descrito en términos de[21, 9]:

- α_s - **Ángulo de altitud**. Es el formado entre el horizonte y la línea hacia el Sol.
- γ_s - **Ángulo azimutal**. Es la desviación de la proyección en el plano horizontal normal a la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el sur.

Ambos ángulos varían desde el amanecer hasta el atardecer, cada día a lo largo del año.

En el Apéndice A se puede encontrar una tabla con los valores de los ángulos de posicionamiento del disco solar en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

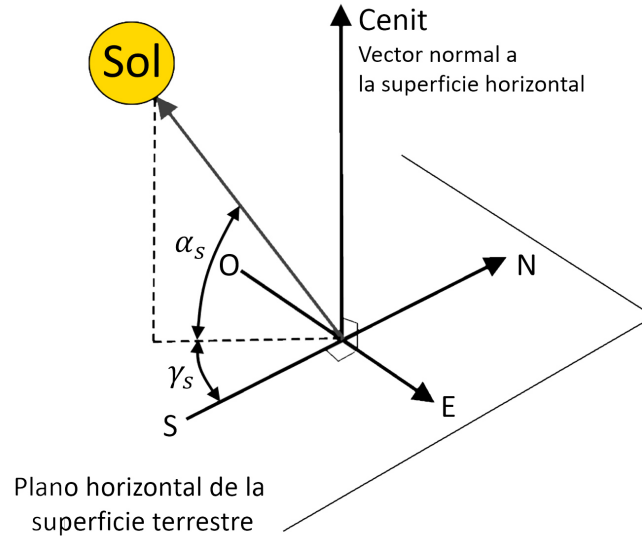


Figura 1.6: Esquema del desplazamiento solar aparente indicando los ángulos α_s y γ_s , acorde al plano terrestre y los puntos cardinales.[21].

1.3.2.1. Sistemas de seguimiento solar

Cuando se trabaja con lentes de Fresnel de imagen, el sistema de seguimiento solar juega un papel fundamental. Los puntos focales de los lentes de Fresnel de imagen son propensos a desplazarse con facilidad debido a cambios en el ángulo de incidencia de los rayos de la fuente, los cuales también producen aberraciones en su punto focal. Acorde a la literatura, los lentes de Fresnel de imagen tienen, en general, una tolerancia menor a $\pm 1^\circ$ con respecto al eje óptico del lente tal como se muestra en la Figura 1.7, lo cual impacta en la posición de la mancha focal, así como en su distribución espacial y angular. En la Figura 1.7 se tiene una variación de $\pm 5^\circ$ en los rayos incidentes a la lente, lo que genera que las manchas focales correspondientes a los rayos rojos y azules, queden fuera del punto focal deseado. La imagen muestra aberración focal para los casos en que la desviación angular se da sobre un mismo eje, por lo que para desalineamientos en 2 ejes se esperan mayores aberraciones. Por otro lado, los lentes de Fresnel anidólicos tienen un semi-ángulo de aceptación, el cual permite realizar colección solar dentro de un rango de ángulos[9, 22].

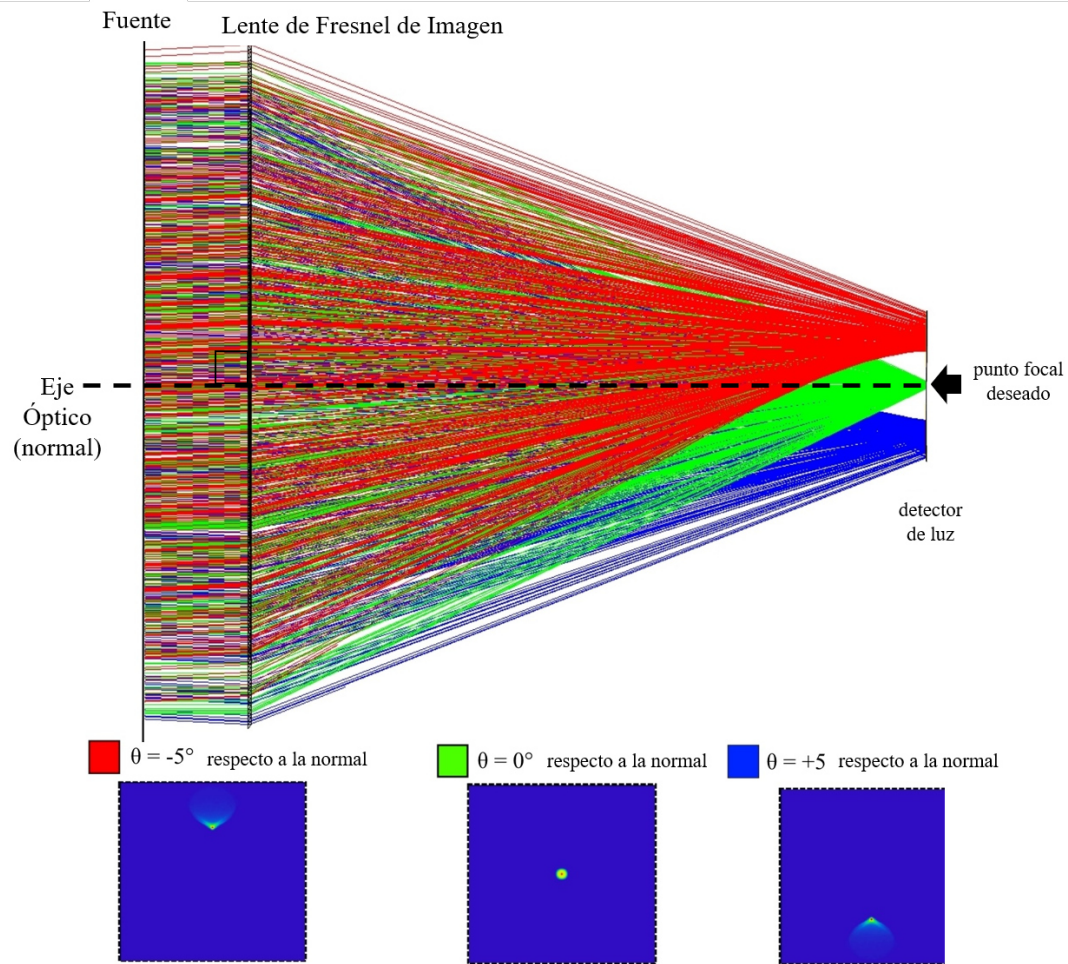


Figura 1.7: Aberración focal en lente de Fresnel de Imagen. Para los casos en que la radiación llega a la lente de imagen con $\theta = \pm 5^\circ$ respecto a la normal del lente (eje óptico), se observan las aberraciones en la mancha focal, tanto en posición como en distribución espacial.

Los sistemas de seguimiento solar son aquellos que se mueven de formas prescritas para minimizar el ángulo de incidencia de la radiación con respecto a la normal de la superficie de colección. Estos sistemas se clasifican acorde a su movimiento en sistemas de rotación sobre un eje o sobre dos. Los primeros pueden orientarse de manera horizontales con respecto al Este-Oeste, horizontales con respecto al Norte-Sur, verticales o paralelos al eje de la Tierra; como su nombre lo indica, tienen un solo eje de movimiento. Los sistemas con 2 ejes se alinean acorde a los ángulos α_s y γ_s [9, 21, 22].

En la literatura se encuentran diversos trabajos referentes a sistemas de seguimiento solar donde, dependiendo de la tecnología empleada, se pueden obtener mejoras en las eficiencias desde 40 % hasta 75 % por encima del mismo colector sin seguidor solar. Aunque muchos de los trabajos propuestos se distinguen por su bajo costo y sus mínimas necesidades de mantenimiento, no dejan de ser características

subjetivas ya que, dichos conceptos varían acorde a la región por cuestiones económicas y de acceso a tecnologías, entre otras. Además, las características y resultados descritos generalmente se basan en los componentes electrónicos y de cómputo empleados para hacer el seguimiento solar, pero no siempre consideran los elementos electromecánicos que permitirán el movimiento del colector solar, siendo dichos componentes los que agregan complejidad y altos costos a las tecnologías de concentración solar en países como México. En la figura 1.8 se observa un ejemplo de seguimiento solar de 2 ejes que, para colectores de radiación solar muy grandes o para arreglos de múltiples colectores, mostraría un incremento en su complejidad y coste de instalación y mantenimiento, en especial, por la montura electromecánica. Por lo anterior, es importante considerar que, *el uso de sistemas de seguimiento solar solo puede ser recomendado cuando el costo extra no supere los beneficios de la mejora del sistema*[23, 24, 25].

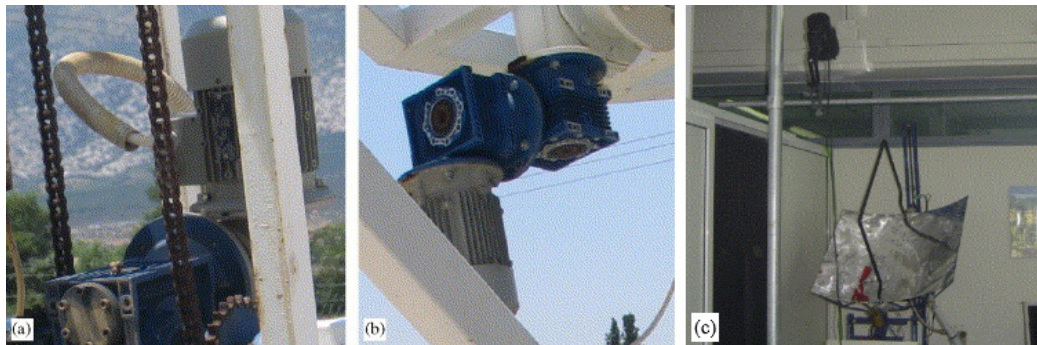


Figura 1.8: Sistema de seguimiento solar de 2 ejes propuesto por Bakos[24]. (a) Vista del motor para el movimiento vertical. (b) Vista del motor para el movimiento horizontal. (c) Vista del sistema completo que incluye el seguidor y el colector de radiación solar.

Debido al desplazamiento aparente del disco solar y a las implicaciones que conlleva la integración de sistemas de seguimiento solar al sistema de colección, se propone el diseño de un lente de Fresnel optimizado para coleccionar la radiación solar con gran aceptación angular.

1.4. Planteamiento del problema

Tan solo en México en el sector residencial, el consumo de energía eléctrica por iluminación es alrededor del 20 %, lo que la convierte en un área de oportunidad para el ahorro energético[26]. Actualmente se tiene la problemática de obtener un sistema de iluminación solar fácil de integrar en edificaciones. Con tales sistemas se podrá ofrecer una solución para disminuir el consumo de energía eléctrica en cuestión de iluminación durante el transcurso del día.

Hasta ahora se cuenta con desarrollos científicos para el diseño de colectores solares basados en lentes de Fresnel que utilizan colectores solares, los cuales tienen aplicaciones en el área de dispositivos fotovoltaicos, donde se ha logrado concentrar

la luz solar en regiones focales con alta uniformidad para que pueda ser aprovechada al máximo por las celdas fotovoltaicas y generar en forma eficiente electricidad. Sin embargo, las aplicaciones en iluminación no requieren alta uniformidad, solo que la luz sea colectada y posteriormente, con elementos ópticos secundarios, redirigida al interior de las edificaciones. Sin embargo, estos colectores solares no se encuentran diseñados para su aplicación en el área de iluminación solar en interiores.

Además, en términos generales de colección solar, es común encontrar sistemas activos que son ampliamente usados en países alejados de la línea del ecuador, donde el sol no se mantiene tanto tiempo en el Zenit y tiene mayor movimiento durante el día. Esos sistemas son más costosos pero no representan una opción ideal para nuestro país, ya que en contraste, México tiene zonas de alta irradiación solar, y como se encuentra más cerca del ecuador, el Sol permanece más tiempo en el zenit. Esa ventaja no se ha aprovechado al 100 % para diseñar colectores pasivos para iluminación.

1.4.1. Hipótesis

El uso de la teoría de la óptica anidólica permitirá diseñar novedosos colectores solares basados en lentes de Fresnel compuestos, con mayor tolerancia a movimientos del Sol, y menor dependencia a mecanismos de seguimiento solar. Lo anterior permitirá el desarrollo de nuevas fuentes de iluminación solar para el interior de edificaciones basadas en colectores solares, más fáciles de instalar e integrar en dichas edificaciones.

1.4.2. Objetivos

Diseñar y modelar un colector de radiación solar para aplicaciones de iluminación solar de interiores basado en el acoplamiento de múltiples lentes de Fresnel que permitan prescindir del uso de seguidores solares, el cual sea fácil de integrar y permita un ahorro energético para las edificaciones. Para esto se consideran los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar una metodología iterativa para el diseño de lentes de Fresnel anidólicos y formadores de imagen.
- Realizar un análisis matemático y numérico de lentes de Fresnel con diversos parámetros de diseño para identificar los rangos óptimos de operación de dichas lentes en cuanto a captación de luz solar.
- Diseñar una nueva forma de lente de Fresnel anidólico compuesto que enfoque los rayos del sol en una misma área durante gran parte del día usando la teoría de Óptica Anidólica.
- Modelar y analizar el nuevo diseño de lente de Fresnel anidólico compuesto, y con ello estudiar su funcionamiento para enfocar la luz solar en una misma área para diferentes ángulos de incidencia.

- Desarrollar una metodología para la optimización del colector propuesto a través de modificaciones en el diseño de los prismas que integran el lente de Fresnel.

La presente investigación plantea el diseño de un colector solar tipo lente de Fresnel anidólico con el objetivo de que se pueda coleccionar luz del Sol que llegue a diversos ángulos y no solo perpendicular al lente de Fresnel, para que posteriormente pueda ser adaptado a elementos secundarios para su distribución, tales como los tubos de luz reflectivos. La novedad del diseño radica en que el colector solar de Fresnel no requerirá de un seguidor solar. Con esta nueva propuesta se espera obtener un sistema de colección solar fácil de integrar que representará una alternativa complementaria para disminuir el consumo de energía eléctrica en grandes edificaciones por cuestiones de iluminación.

CAPÍTULO 2

LENTES DE FRESNEL

El presente capítulo aborda el marco teórico y los conceptos físicos fundamentales detrás del diseño de los lentes de Fresnel y el funcionamiento de las fuentes emisoras de radiación óptica y los detectores, por ende se abordarán términos y leyes que rigen la óptica geométrica y anidólica y la radiometría.

2.1. Fundamentos teóricos

Para el diseño, modelado e implementación de colectores solares es necesario conocer las leyes que rigen el comportamiento de la luz y la radiación electromagnética desde su emisión en una fuente, su paso por un sistema óptico y hasta llegar a su destino y ser medida en un detector. Lo anterior incluye los procesos de generación, transmisión y detección de la radiación óptica; para esto, la primera sección de este capítulo aborda los conceptos fundamentales de la Radiometría y la Óptica Geométrica.

2.1.1. Radiometría

La **Radiación** se define como la propagación de energía a través del espacio y la radiación solar es aquella que es irradiada por el Sol[27].

La **Radiometría** se define como un sistema de conceptos, terminología, relaciones matemáticas, y unidades de medida utilizadas para describir y medir la energía óptica radiante y su interacción con la materia. Su campo de estudio incluye los principios y leyes detrás de la generación, propagación y detección de la radiación óptica[27, 28].

La fundamentación de la Radiometría se basa en la definición de cuatro conceptos geométricos que permiten medir, cuantificar y caracterizar la radiación óptica: el *ángulo*, el *ángulo sólido*, el *área proyectada* y el *ángulo sólido proyectado*; además, se considera la manera en que la radiación óptica se distribuye sobre el espectro electromagnético[27, 28].

Un **ángulo plano** θ es el formado por dos radios de un círculo. Es definido como la proporción de la longitud del arco y el radio del círculo (Fig. 2.1):

$$\theta = \frac{l}{r} \tag{2.1}$$

donde l es la longitud del arco y r el radio del círculo. Su unidad de medida es el radián y 2π radianes equivalen a 360° , es decir, a una circunferencia completa.

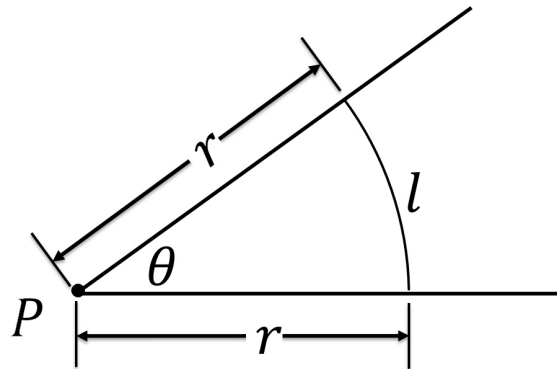


Figura 2.1: Ángulo plano delimitado por 2 radios r de la circunferencia con centro en P y arco l .

El **ángulo sólido** Ω es la porción de región, A , subtendida de una superficie esférica entre el cuadrado del radio de la esfera, tal como se observa en la figura 2.2[27, 28]:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.2)$$

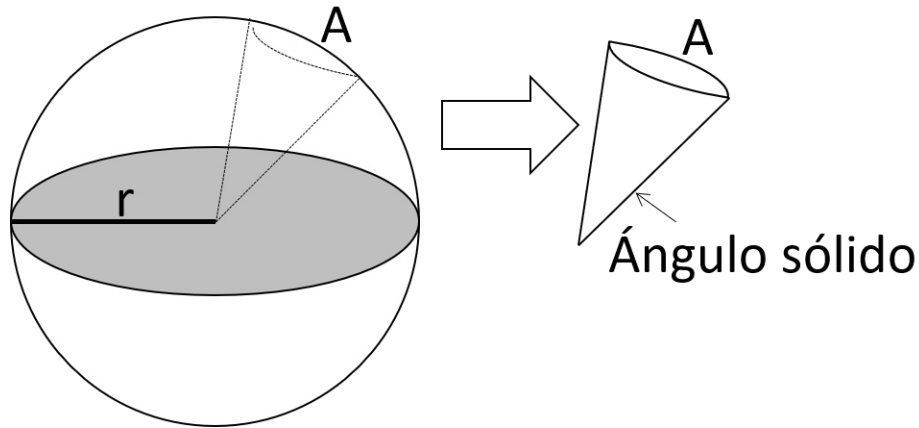


Figura 2.2: Ángulo sólido delimitado por el área ' A ' y el radio ' r ' de la esfera.

El **área proyectada** A_p es la proyección rectilínea de una superficie de cualquier forma sobre un plano. En su forma diferencial, se expresa como[27, 28]:

$$dA_p = \cos \theta dA \quad (2.3)$$

donde θ es el ángulo entre el área y su proyección, lo cual se muestra en la figura 2.3.

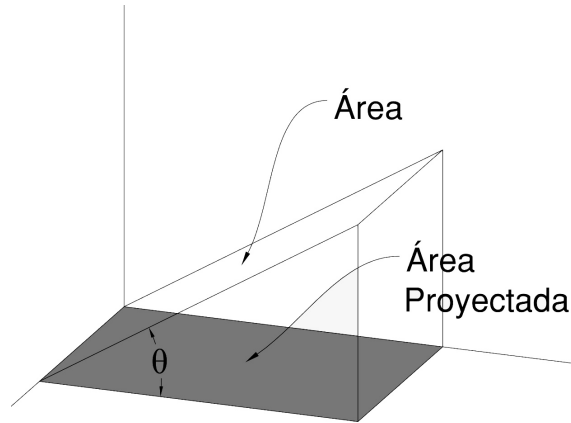


Figura 2.3: Área proyectada de un rectángulo sobre un plano.

El **ángulo sólido proyectado** Θ es el ángulo sólido que se proyecta sobre el plano del observador. Puede ser visualizado como la proyección $d\Omega$ sobre la base del hemisferio, como se observa en la figura 2.4, el cual se puede definir matemáticamente como [27, 28]:

$$d\Theta = d\Omega \cos \theta \quad (2.4)$$

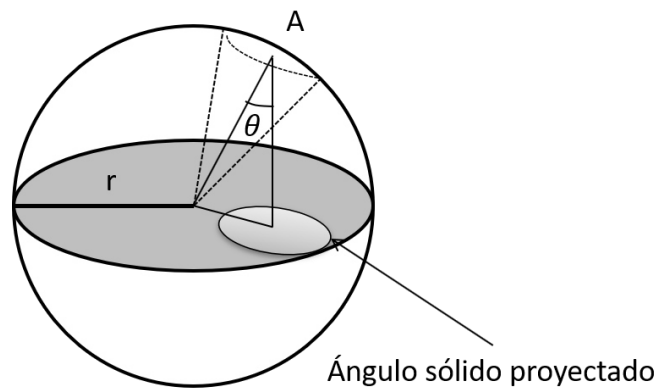


Figura 2.4: Ángulo sólido proyectado sobre el plano horizontal de una esfera.

2.1.1.1. Radiación Óptica

Entender el espectro electromagnético es crucial para la comprensión de la radiometría, ya que las propiedades de los materiales como la transmitancia, reflectancia y absorción están relacionados con la longitud de onda que posee la radiación que incide en ellos.

A pesar de lo amplio del espectro electromagnético, para cuestiones de radiación solar, generalmente se considera la porción del espectro que va de 3×10^{11} - 3×10^{16}

Hz o, visto desde el punto de vista de la longitud de onda, de 10 nm a 1000 μm , la cual incluye las radiaciones[27, 28, 29]¹:

- Ultravioleta \rightarrow 200 nm - 360 nm
- Visible \rightarrow 360 nm - 780 nm
- Infrarroja
 - Infrarrojo cercano \rightarrow 780 nm - 1100 nm
 - IR de onda corta \rightarrow 1.1 μm - 2.5 μm
 - IR de onda media \rightarrow 2.5 μm - 7.0 μm
 - IR de onda larga \rightarrow 7.0 μm - 15 μm

De acuerdo a algunos autores[27, 29], si la radiación se encuentra fuera del espectro visible, es decir fuera del rango entre 380 nm a 760 nm, no se le puede llamar "luz", por lo que, científicamente hablando, no existen los conceptos de "luz infrarroja" ni "luz ultravioleta", ya que luz es aquello que percibe el ojo humano.

Además de la clasificación de la radiación óptica acorde al espectro electromagnético, también es posible clasificarla como:

- Radiación coherente
- Radiación incoherente

Las fuentes de radiación incoherente son definidas como aquellas que no poseen coherencia. Existen dos tipos de coherencia[30, 31]:

- **Coherencia espacial.** Se da cuando, en un emisor, el desfase que hay entre dos puntos situados sobre un mismo frente de onda y que se encuentran separados especialmente entre sí, se mantiene constante con el tiempo.
- **Coherencia temporal.** Existe en ondas monocromáticas, ya que el desfase existente en un punto para dos instantes de tiempo diferentes se mantiene constante.

La propagación de la radiación óptica se estudia a partir de las leyes de óptica geométrica. La radiometría estudia la radiación óptica incoherente, mientras que la coherente se estudia con las Ecuaciones de Maxwell. Por lo que, para los casos donde los efectos de interferencia o difracción son predominantes o si se tiene coherencia de la fuente, no es posible aplicar las leyes de la Radiometría[30].

¹Las regiones y subdivisiones del espectro electromagnético por lo general se superponen entre sí y no siempre se encontrarán las mismas clasificaciones en distintas fuentes de literatura; además, los límites de la radiación visible pueden variar de persona a persona.

2.1.1.2. Cantidades radiométricas fundamentales

El presente apartado aborda las definiciones y fórmulas relacionadas con las principales cantidades radiométricas.

Energía radiante (Q). Es la energía total contenida en un campo de radiación o la energía total entregada a un receptor por un campo de radiación. Su unidad de medida es el Joule (J)[27, 29, 30, 32].

Flujo radiante (Φ). Es la cantidad radiométrica equivalente a la potencia P , por lo que también es conocido como *potencia radiante*. Se mide en Watts y se define como[27, 29, 30, 32]:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} [Watts] \quad (2.5)$$

De este concepto se deriva el **flujo radiante espectral** Φ_λ , que se define como el flujo radiante de una longitud de onda *específica*:

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda} \left[\frac{W}{nm} \right] \quad (2.6)$$

Radiancia (L). Se define como la *cantidad fundamental de la radiometría*, expresa el flujo por unidad de área y por unidad de ángulo sólido proyectado de una fuente o, de manera alternativa, la potencia por unidad de área proyectada y unidad de ángulo sólido[27, 29, 30, 32].

$$L = \frac{d^2\Phi}{dAd\Omega \cos \theta} = \frac{dE}{d\Omega} \left[\frac{W}{m^2 Sr} \right] \quad (2.7)$$

También es conocida como brillantez o intensidad específica. La radiancia tiene una naturaleza direccional, por lo que las fuentes de las que emana son activas, es decir, *térmicas o emisores luminiscentes*.

Intensidad Radiante (I). Es el flujo por unidad de ángulo sólido emitida por una fuente. Se puede calcular a través de la integración de la radiancia sobre el área de la fuente[27, 29, 30, 32]:

$$I = \int_A L dA = \frac{d\Phi}{d\Omega} \left[\frac{W}{Sr} \right] \quad (2.8)$$

Este término generalmente es asociado con las llamadas **fuentes puntuales**.

Exitancia radiante (M). Es el flujo por unidad de área radiada hacia un hemisferio. Es considerada una medida de la densidad de flujo, es decir, la cantidad de flujo de energía por unidad de área saliendo de la fuente[27, 29, 30, 32].

$$M = \int_\pi L d\Theta = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.9)$$

Irradiancia o Incidancia Radiante (E). Es el flujo irradiado desde un hemisferio sobre una superficie por unidad de área. Se considera lo opuesto a la exitancia, es decir, la potencia que entra a un detector por unidad de área[27, 29, 30, 32].

$$E = \int_\pi L d\Theta = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.10)$$

2.1.1.3. Fotometría

Las cantidades radiométricas pueden abarcar la totalidad del espectro, pero si queremos considerar específicamente la porción visible del espectro es necesario conocer las cantidades fotométricas, las cuales se abordarán a continuación.

Fotometría. Se define como el estudio de la radiación óptica en la porción del espectro que es perceptible al ojo humano[30].

La respuesta espectral del ojo humano está delimitada a la porción visible del espectro electromagnético. Nuestra respuesta espectral tiene adaptaciones a 2 niveles de luminancia[27, 29, 33]:

- **Visión fotópica** → adaptación a la luz de día.
- **Visión escotópica** → adaptación a la oscuridad

Entre ambos rangos se encuentra un nivel dinámico intermedio de adaptación a una luminancia entre la visión fotópica y la escotópica, la cual es llamada **visión mesoscópica**.

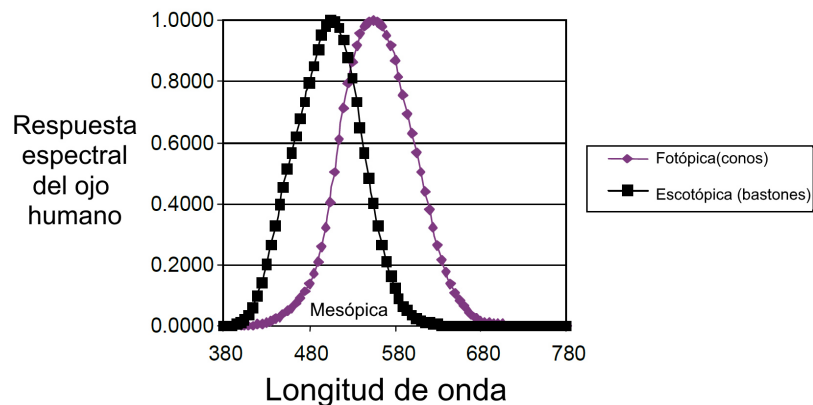


Figura 2.5: Respuesta espectral del ojo humano. Se distingue la visión fotópica, que se debe a los conos, y la visión escotópica que se debe a los bastones. El transfondo entre ambas curvas se conoce como la visión mesoscópica. Imagen tomada del *“Field Guide to visual and Ophthalmic Optics”*[33].

Las distintas respuestas de visión se deben en específico a los 2 fotorreceptores del ojo humano, los conos, que responden a las condiciones fotópicas y permiten que distingamos colores, y los bastones, los cuales permiten que nuestra visión se adapte a la oscuridad y son los que responden a las condiciones escotópicas. En el caso de la visión mesoscópica, los conos y los bastones responden de manera proporcional[27, 29, 33].

Las cantidades radiométricas son medidas en Watts y en unidades derivadas de éste, pero para la Fotometría se cuenta con el **lumen (lm)** como la unidad de medida del flujo luminoso, el cual es definido como el flujo luminoso proveniente de una radiación monocromática a $\lambda = 555nm$ y cuyo flujo radiante es igual a $\frac{1}{683}$ W, lo cual corresponde con el valor de la constante de eficacia luminosa[7, 27, 29, 30, 32].

El **flujo luminoso** (Φ_ν), es la cantidad más fundamental de la fotometría y se define como [7, 27, 29, 30, 32]:

$$\Phi_\nu = K_m \int_{380}^{760} V(\lambda) \Phi_{in} \lambda d\lambda [lm] \quad (2.11)$$

donde $V(\lambda)$ es la función de respuesta visual fotópica, la cual puede ser sustituida por la función de respuesta escotópica (Fig. 2.5). La constante K_m es conocida como **eficacia luminosa** y se define como la medida de la capacidad de una fuente de luz de producir una respuesta visual debido a su potencia radiante; para una longitud de 555 nm tiene un valor de $683 \text{ lm}/W$.

Las propiedades y fundamentos de la Radiometría también pueden ser aplicados en la Fotometría, incluso las cantidades fundamentales de la Radiometría tienen sus equivalentes fotométricos, los cuales son representados por las mismas letras que sus pares radiométricos, pero con el subíndice ν . Las cantidades fotométricas fundamentales se encuentra definidas en la Tabla 2.1 [27, 29].

Tabla 2.1: Cantidades Fotométricas fundamentales [7, 27, 29, 30, 32]

Cantidad	Símbolo	Definición	Unidades
Energía Luminosa	Q_ν	$\int \Phi_\nu dt \quad (2.12)$	$lm \cdot s = \text{talbot}$
Densidad de Energía Luminosa	U_ν	$\frac{dQ_\nu}{dV} \quad (2.13)$	$\frac{lm \cdot s}{m^3} = \frac{\text{talbot}}{m^3}$
Flujo luminoso o Potencia Luminosa	Φ_ν	$\frac{dQ_\nu}{dt} \quad (2.14)$	lm
Iluminancia o Incidencia Luminosa	Q_ν	$\frac{d\Phi_\nu}{dA} \quad (2.15)$	$\frac{lm}{m^2} = lx$
Excitancia Luminosa	M_ν	$\frac{d\Phi_\nu}{dA} \quad (2.16)$	$\frac{lm}{m^2} = lx$

Tabla 2.1: Cantidades fotométricas fundamentales

Cantidad	Símbolo	Definición	Unidades
Luminancia	L_ν	$\frac{d^2\Phi_\nu}{dA_{proj}d\Omega}$ (2.17)	$\frac{lm}{m^2 \cdot Sr} = \frac{lx}{Sr}$
Intensidad Luminosa	I_ν	$\frac{d\Phi_\nu}{d\Omega}$ (2.18)	$\frac{lm}{Sr} = cd$

La diferencia principal entre la Radiometría y la Fotometría, radica en que la primera considera la energía del campo de radiación, mientras que la Fotometría considera sólo la respuesta visual que produce el campo. Para realizar la conversión entre cantidades radiométricas y fotométricas existen ecuaciones que relacionan cantidades radiométricas espectrales con sus equivalentes en fotometría[29].

2.1.1.4. Fuentes de luz

La luz emitida por una fuente de luz generalmente se medirá en relación con el área, con lo que se establece que el **lux** es la unidad de medida del flujo de luz por unidad de superficie, que es denominado **nivel de iluminación**. Este concepto no sólo depende de la fuente, sino además de los elementos que componen el sistema óptico, que concentra y dirige la luz, el entorno y la densidad del medio con que esta compuesto el entorno[29, 27].

Las fuentes pueden clasificarse de diversas maneras, por ejemplo, pueden ser **fuentes activas**, si emiten su propia radiación óptica, o **fuentes pasivas**, si reflejan la radiación óptica proveniente de otras fuentes[29]. Debido a que la presente investigación aborda la problemática de la colección de energía solar, consideraremos principalmente las fuentes activas de radiación óptica.

Además de la clasificación anterior, las fuentes de radiación óptica se pueden clasificar acorde a diversas características[29, 27]:

- Debido al proceso por el cual emiten radiación:
 - **Fuentes térmicas.** Emiten la radiación debido a su temperatura, como en el caso del Sol, los simuladores de radiación del cuerpo negro, lámparas de filamento e, incluso, el ser humano.
 - **Fuentes luminiscentes.** La emisión de radiación óptica es el resultado de transiciones atómicas, como ocurre con los láseres, lámparas fluorescentes, lámparas de sodio, LEDs, entre otros.
- Acorde a sus características espectrales:
 - **Fuentes de amplio espectro.** Son aquellas cuya radiancia varía ligeramente con la longitud de onda, las cuales son generalmente radiación térmica, tal como la radiación térmica del Sol.
 - **Fuentes de espectro reducido.** Emiten en una porción bien definida y restringida del espectro electromagnético. Ejemplos de este tipo de fuentes son las lámparas de colores que, a pesar de ser a simple vista de un sólo color, si emiten porciones extra del espectro electromagnético.
 - **Fuentes de espectro puntual.** Son aquellas que emiten una longitud específica del espectro electromagnético, como los láseres.
- Dependiendo de su geometría y de la forma en que irradian:
 - **Fuentes puntuales.** Se definen como una fuente con área de emisión muy pequeña con respecto a la distancia entre ella y un objetivo (distancia de medición). Se utilizan para la realización de aproximaciones pero, este tipo de fuentes no existe en la realidad, ya que tendrían densidad infinita de energía.
 - **Fuentes puntuales isotrópicas.** Se consideran fuentes esféricas que poseen la misma intensidad en todas direcciones. Un ejemplo de dichas fuentes se podría considerar una estrella lejana, como el Sol.
 - **Fuente lambertiana.** Es aquella en la cual la radiancia es independiente de la dirección del área, es decir, $L(\theta, \Phi) = Constante$. El término hace alusión a superficies planas o elementos planos de una superficie no plana como la luz que es reflejada y dispersada por una hoja en blanco.

Analizando las fuentes de luz desde el punto de vista de la Radiometría y la Fotometría, se define a la **luz emitida** o **flujo luminoso** como la luz que emiten dichas fuentes y que debe ser medida en lúmenes[27, 29].

Partiendo de los conceptos presentados en esta sección se procederá a describir al Sol como fuente de iluminación por ser el punto de partida necesario para el diseño del colector propuesto.

2.1.1.5. El Sol

Como se expuso en el primer capítulo, el Sol es considerado la fuente principal de energía de nuestro planeta, la Tierra, ya que gracias a la energía que emite se mantiene la vida en la biósfera y es el causante de los fenómenos meteorológicos que ayudan a la continuidad del ciclo del agua y a la formación de nuevas corrientes y almacenes del vital líquido. Además, como es objeto de la presente investigación, es posible aprovechar su radiación en distintos campos, como se muestra en la Figura 1.2[1, 34].

El Sol puede describirse como una esfera en estado gaseoso que posee una temperatura alrededor de 5800 K, con un diámetro de 1.39×10^9 m, y la Tierra orbita a su alrededor sobre una trayectoria elíptica, por lo que la distancia entre ellos cambia a lo largo del año, por lo que la distancia media entre ellos se considera como 1.495×10^{11} m $\pm 1.7\%$.

La **Constante Solar** (G_{SC}) se define como la energía proveniente del Sol por unidad de tiempo, recibida en un área de $1m^2$ de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación.

El valor de la constante solar se establece entre los $1353 W/m^2$ y los $1367 W/m^2$. Se logro la estandarización del valor de esta constante gracias a que la intensidad de radiación emitida por el Sol y recibida por el Tierra se considera constante fuera de la atmósfera terrestre[35, 36, 37, 38].

La constante solar hace referencia a la radiación solar extraterrestre, pero solo un porcentaje de esta incide en la superficie de la Tierra debido a los fenómenos de absorción y reflexión de la luz a lo largo de su trayectoria[35].

No solo la potencia de la radiación solar varía fuera y dentro de la atmósfera, además se presenta un cambio en el rango del espectro electromagnético que la conforma, ya que, por ejemplo, fuera de la atmósfera la mayor parte de la energía solar se concentra en el rango de $0.25 \mu m - 3 \mu m$; mientras que al llegar a la superficie terrestre, el rango de radiación se encuentra entre $0.29 \mu m$ y $2.5 \mu m$. Además del rango del espectro, otra característica importante es la distribución espectral, la cual varía acorde a la ubicación donde se hace la medición, la época del año, las condiciones atmosféricas e incluso los niveles de contaminación. La Figura 2.6 nos muestra una aproximación realizada por el Laboratorio Atmosférico para Aplicaciones y Ciencia (ATLAS)[39, 37, 38, 40].

La radiación solar recibida se clasifica en[36, 38]:

- **Directa.** Es la que no ha sido dispersada por la atmósfera
- **Difusa.** Es aquella cuya dirección ha cambiado después de ser dispersada por la atmósfera.
- **Total o global.** Es la suma de la radiación directa y la difusa.

El 85 % de la luz solar que llega a la superficie terrestre en un día soleado es radiación directa[36].

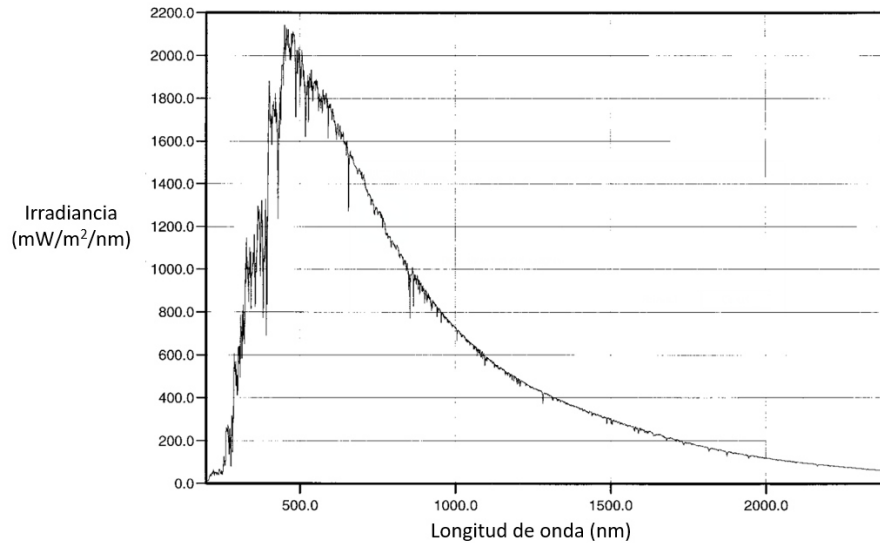


Figura 2.6: Distribución espectral del Sol acorde al ATLAS. Eje-y: Irradiancia en $\frac{mW}{m^2}$ por nm . Eje-x: longitud de onda en nm . Imagen tomada del artículo “*The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the Solspec Spectrometer from the ATLAS and EURECA missions* [40]”

Para fines de modelados matemáticos y numéricos, se hacen por lo general las siguientes consideraciones respecto al Sol: [41, 36, 38, 42].

- Es una aproximación de una fuente lambertiana.
- Su brillo o radiancia no es uniforme, depende de la longitud de onda y cambia desde el centro hacia las áreas externas.
- Su eficacia luminosa radiante presenta valores entre los 100 y los 200 $\frac{lm}{W}$.
- Se considera que tiene una extensión angular de $\theta_s = \pm 0.275^\circ$, debido a su distancia con la Tierra. Esa apertura angular representa la razón a la que se va incrementando su área de radiación conforme se incrementa la distancia entre el Sol y el área de incidencia.
- Su distribución espectral se representa con la fuente D65, propuesta por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), la cual se muestra en la figura 2.7 [43, 44].

2.1.1.6. Detectores

Cada medición radiométrica o fotométrica requiere del uso de un detector, por ello es importante comprender su función y los diferentes tipos de información que podemos obtener de ellos.

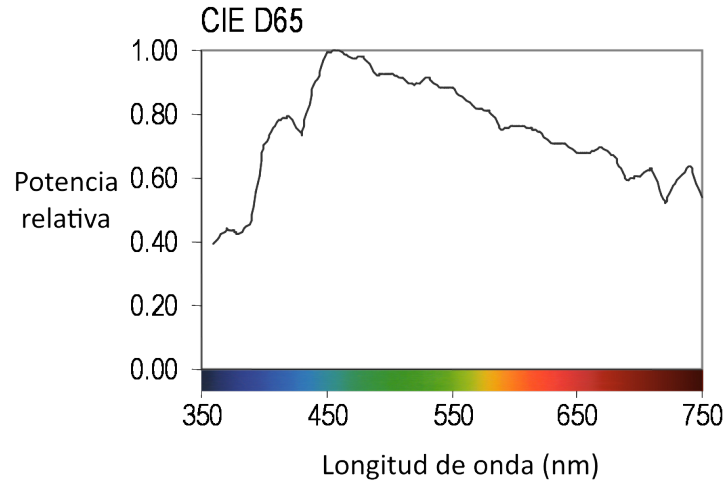


Figura 2.7: Distribución espectral del Sol acorde al estándar D65. Eje-y: Potencia relativa. Eje-x: longitud de onda en nm . Imagen de Kevin Houser [44].

El **detector (o sensor)** de un sistema se encarga de medir la radiación óptica que incide sobre una determinada área, por lo que se considera el responsable de convertir la radiación óptica incidente en una forma más manejable de energía, eléctrica, lo cual nos permite medir sus características radiométricas[29].

La respuesta de un detector de radiación incidente se llama **responsividad** o **sensibilidad** (*responsivity* o *sensitivity* en inglés) y se define como la relación entre la salida de la señal y la entrada de flujo[28]:

$$S = R \times \Phi_{inD} \quad (2.19)$$

donde S es la señal que resulta de la medición (señal de salida), R es la responsividad y Φ_{inD} representa el flujo incidente en el detector.

Si bien existen diversos tipos de detectores, tales como los detectores fotónicos, los térmicos, los fotoemisivos, los de semiconductores, entre otros; este trabajo se centra en los detectores de radiación, los cuales se dividen entre aquellos que detectan fotones y los que detectan potencia[28, 32].

Para los análisis numéricos de este proyecto se utilizaron detectores rectangulares y radiales de Zemax[®]. Dependiendo del tipo de análisis, los datos que se pueden medir con los detectores de Zemax[®] son[45]:

- **Irradiancia incoherente** - Es la potencia incoherente por área como una función espacial de la posición sobre el detector. El detector indica:
 - El total de potencia medida en *Watts*
 - La potencia por área detectada en cada pixel del detector en $\frac{W}{m^2}$
 - La irradiancia máxima detectada.
 - Esta medición se convierte en iluminancia incoherente si se utilizan unidades fotométricas, por lo que devuelve resultados en *lúmenes* y $\frac{lm}{m^2}$.

- **Irradiancia coherente** - Corresponde a la potencia coherente por área como una función espacial de la posición sobre el detector. El detector indica:
 - El total de potencia medida en *Watts*
 - La potencia por área detectada en cada pixel del detector en $\frac{W}{m^2}$
 - El pico de irradiancia medido
 - Esta medición se convierte en iluminancia coherente si se utilizan unidades fotométricas, por lo que devuelve resultados en *lúmenes* y $\frac{lm}{m^2}$.
- **Intensidad Radiante** - Potencia por unidad de ángulo sólido como una función del ángulo incidente sobre el detector. El detector indica:
 - El total de potencia medida en *Watts*
 - La potencia por ángulo sólido detectada en cada pixel del detector en $\frac{W}{Sr}$
 - El pico de intensidad medida
 - En unidades fotométricas su equivalente es la intensidad luminosa, por lo que devuelve resultados en *lúmenes* y $\frac{lm}{Sr}$.
- **Radiancia en espacio de posición** - Es la potencia por área por ángulo sólido como función de la posición espacial del detector. El detector indica:
 - El total de potencia medida en *Watts*
 - La radiancia pico medida
 - La radiancia detectada en cada pixel en $\frac{W}{m^2Sr}$, donde cada pixel representa una posición a la que esta llegando dicha radiancia
 - Su equivalente en fotometría es la luminancia, por lo que devuelve resultados en *lúmenes* y $\frac{lm}{m^2Sr}$.
- **Radiancia en espacio angular** - Es la potencia por área por ángulo sólido como una función del ángulo incidente sobre el detector. El detector indica:
 - El total de potencia medida en *Watts*
 - La radiancia pico medida
 - La radiancia detectada en cada pixel en $\frac{W}{m^2Sr}$, donde cada pixel representa el ángulo al que esta llegando dicha radiancia
 - En términos de fotometría su equivalente es la luminancia, por lo que devuelve resultados en *lúmenes* y $\frac{lm}{m^2Sr}$.

Cabe mencionar que existen otros tipos de detectores en Zemax[®] y además se pueden medir otras características de la salida del sistema como el color, pero dichas mediciones y tipos de detectores no fueron necesarias para la realización del presente proyecto de investigación.

2.1.2. Óptica Geométrica

La Óptica Geométrica es la herramienta básica para el diseño de cualquier sistema óptico, sea o no formador de imágenes[46], por lo que es importante abordar sus conceptos básicos dentro de la fundamentación del presente proyecto de investigación.

Óptica Geométrica. Rama de la Óptica que estudia los fenómenos básicos de la reflexión y refracción de la luz, así como la forma en que funcionan los elementos ópticos simples como espejos, lentes y fibras.

La trayectoria que sigue la luz puede ser representada por un **rayo**, el cual a su vez es representado por un **vector**, es decir, una línea recta que nos indica la magnitud y dirección de la propagación, por lo que un **rayo de luz** es definido como una línea imaginaria dirigida hacia el camino que sigue la luz (Fig. 2.8a).

Del concepto de rayo de luz se puede partir para integrar el concepto de **frente de onda**, el cual se define como un plano, para el caso de que todos los rayos sean paralelos (Fig. 2.8b), o una superficie curva, cuando los rayos divergen (emanan de un punto), como lo muestra la figura 2.8c.

Un **haz de luz** se define por dos elementos de área separados, es decir, como el lugar geométrico por donde pasan los posibles rayos de luz que atraviesan dos áreas separadas por una distancia d . Cuando cada una de las áreas son tan pequeñas que aproximan a cero, el haz de luz entre ellas se aproxima a un rayo individual[29, 47, 48].

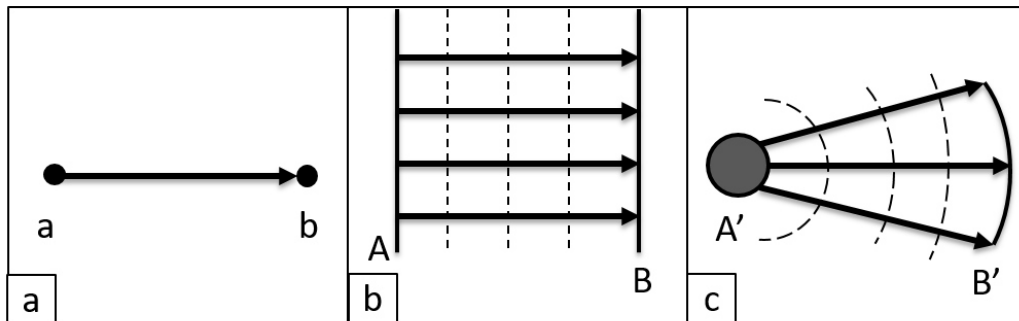


Figura 2.8: a) Rayo de luz que parte del punto a y llega al punto b . b) Frente de onda plano B compuesto de rayos paralelos que salen de la fuente A . c) Frente de onda divergente B' , el cual está compuesto de rayos que se emiten por la fuente puntual A' . En las imágenes b y c las líneas punteadas representan posiciones previas del frente de onda propagándose en dirección de los rayos de luz.

La **velocidad de la luz** c en el vacío es una constante cuyo valor es[27]:

$$c \approx 299792458 \text{ m/s} \quad (2.20)$$

siendo esta la mayor velocidad que puede alcanzar en comparación con su velocidad en otros medios.

A partir de la relación existente entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad de propagación en otro medio, se define el **índice de refracción** como [27, 31]:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.21)$$

donde v es la velocidad de propagación de la luz en ese medio y c , la velocidad de la luz en el vacío, cuyo valor se muestra en la ecuación 2.20, por lo que se obtiene que el índice de refracción es una magnitud adimensional.

Para el caso del aire y la mayoría de los gases, el índice de refracción está muy cercano a 1, por lo que se define su valor estándar como $n = 1.0$. En el caso de otros materiales se considera la definición mostrada en la ecuación 2.21. Cabe mencionar que el índice de refracción es una función de la longitud de onda (o color) de la luz [9, 47]:

$$n = n(\lambda) \quad (2.22)$$

Existen diversas fórmulas empíricas o con bases físicas que nos permiten predecir el valor que tendrá el índice de refracción acorde a su longitud de onda, algunas de las cuales pueden ser consultadas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Aproximaciones del índice de refracción en función de la longitud de onda [9, 47]

Nombre	Fórmula	Descripción
Sellmeier	$n = \sqrt{1 + \sum_{j=1}^3 \frac{a_j \lambda^2}{\lambda^2 - b_j}}$	Fórmula con base física que describe la dispersión de las moléculas desacopladas. λ es la longitud de onda en μm . Es necesario conocer 6 constantes relacionadas al material para las 3 combinaciones de índices de refracción y longitudes de onda.
Cauchy	$n = 1.4779 + \frac{5.0496 \times 10^5}{\lambda^2} - \frac{6.9486 \times 10^{11}}{\lambda^4} \quad (2.23)$	La fórmula mostrada corresponde a la del PMMA basada en los trabajos de Cauchy, donde λ es la longitud de onda en

Tabla 2.2: Aproximaciones del índice de refracción en función de la longitud de onda

Nombre	Fórmula	Descripción
Hartmann	$n = n_0 + \frac{C}{\lambda - \lambda_0} = 1.4681 + \frac{93.42}{\lambda - 1235}$	Esta fórmula requiere una constante particular de cada material y λ es la longitud de onda en μm . Se muestra la fórmula para el caso del acrílico.

Existen algunas otras aproximaciones pero las ya mencionadas son las más comunes para los estándares industriales. En caso de que se use solamente un valor para describir la dispersión cromática de un material, este se define por el número de Abbe[9, 49]:

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.24)$$

donde n_F corresponde al índice de refracción para el color azul ($\lambda = 450\text{nm}$), n_d al color amarillo ($\lambda = 580\text{nm}$), y n_C al color rojo ($\lambda = 635\text{nm}$).

El índice de refracción es también dependiente de otros factores, como la temperatura y la presión atmosférica, pero ese aspecto excede los alcances del presente trabajo de investigación.

Para finalizar este apartado, se debe definir al plano geométrico que se forma en la frontera entre dos medios ópticos distintos como **interfaz óptica**, donde la diferencia de índices de refracción de los medios hace que la luz pueda experimentar los fenómenos de refracción y/o reflexión, tal como se verá más adelante[47, 29, 48].

2.1.2.1. Transmisión, reflexión, absorción y emisión

La radiación óptica incidente (Φ_i) en un medio puede experimentar una combinación de cualquiera de los siguientes fenómenos (Figura 2.9)[30, 27, 29]:

Reflexión. Es el fenómeno que se presenta cuando la luz incide en la interfaz óptica y es reflejada al medio original. En todos los casos se tiene siempre una porción de luz que se refleja al medio inicial.

Transmisión. Se le conoce como el proceso por medio del cual, el flujo lumínico incidente deja un medio y pasa hacia otro diferente. Al ser transmitida, siempre existirá una porción de luz reflejada de vuelta al medio inicial.

Absorción. Se produce cuando una fracción de la luz incidente en la frontera se transforma en otra forma de energía, usualmente calor.

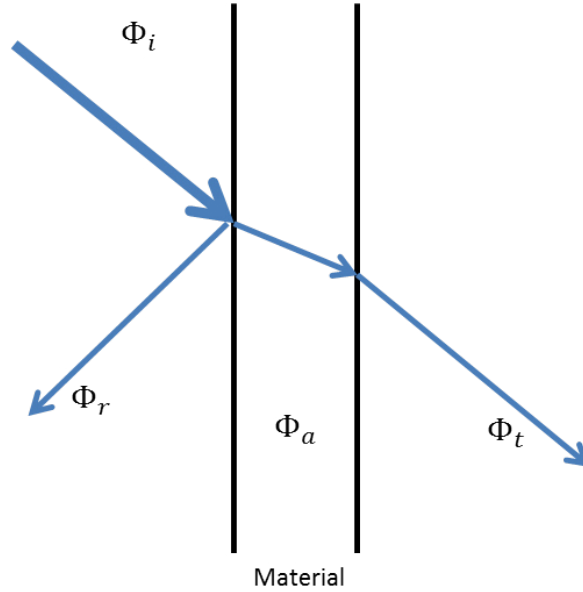


Figura 2.9: Flujo radiante incidente (Φ_i) en el material puede experimentar los fenómenos de transmisión (flujo transmitido - Φ_t), reflexión (flujo reflejado - Φ_r) y/o absorción (flujo absorbido - Φ_a).

Los 3 fenómenos ópticos mencionados están directamente relacionados con 3 procesos de la energía radiante: la transmitancia, la reflectancia y la absorbancia; los cuales son definidos en la Tabla 2.3. Considerando la ley de conservación de la energía, se debe cumplir que[30, 35, 27, 38, 29]:

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (2.25)$$

donde τ se refiere a transmitancia, ρ es la reflectancia y α al absorbido. El porcentaje de cada uno de estos flujos dependerá de la naturaleza de la fuente de radiación, es decir su longitud de onda y sus propiedades direccionales; así como de las propiedades del material de la superficie del cuerpo en el que inciden.

Emisión. Se define como el fenómeno de generación de radiación óptica y está relacionado con la radiación del cuerpo negro[27, 30, 29]. Es el único de los 4 fenómenos de la luz que no es efecto de su camino, ya que en sí es el origen o inicio del camino óptico.

Tabla 2.3: Procesos de la Energía Radiante Incidente [27, 30, 29]

Nombre	Definición	Símbolo	Fórmula
Transmitancia	Fracción correspondiente al flujo transmitido Φ_t	τ	$\frac{\Phi_t}{\Phi_i}$ (2.26)
Reflectancia	Fracción de flujo reflejado Φ_r	ρ	$\frac{\Phi_r}{\Phi_i}$ (2.27)
Absorbancia	Corresponde a la porción de flujo absorbido por el material Φ_a	α	$\frac{\Phi_a}{\Phi_i}$ (2.28)

2.1.2.2. Fundamentos de Óptica Geométrica

El diseño de elementos ópticos y el estudio de las variaciones de los caminos ópticos de la luz a través de ellos se sustentan principalmente en dos fenómenos de la luz: la refracción y la reflexión de la luz; por lo que a continuación se revisarán las leyes que rigen dichos fenómenos[9, 47, 50].

La **refracción de luz** en interfaces ópticas ocurre cuando la luz incide en una interfaz óptica y una porción de esta radiación es transmitida al segundo medio, generando una variación en su dirección[9, 47, 50].

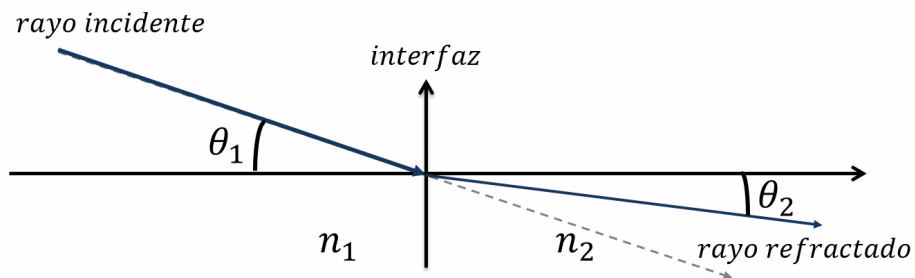


Figura 2.10: Refracción de un rayo de luz en la frontera entre 2 medios con diferente índice de refracción.

La **ley de Snell** permite relacionar el cambio en el ángulo de propagación incidente $\theta_1 \rightarrow \theta_2$, cuando un rayo de luz cruza la interfaz entre 2 medios de diferente índice de refracción (Fig. 2.10), es decir, nos permite conocer la variación del ángulo del ca-

mino óptico de la luz debido al fenómenos de refracción de la misma[9, 47, 50, 27, 29]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.29)$$

De la ecuación 2.29 y la figura 2.10 podemos deducir que, cuando $n_2 > n_1$, el rayo refractado viaja más cerca de la normal que el rayo incidente[27, 29, 31, 48].

La reflexión de la luz, como su nombre lo indica, ocurre cuando la luz es total o parcialmente reflejada en la interfaz óptica entre dos medios[47, 48, 50].

La **ley de Reflexión** describe que 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 (Fig. 2.11). Para los casos en que la superficie es curva, se deduce el mismo fenómeno, pero se debe delimitar una superficie tangente en el punto de reflexión de la luz, teniendo el mismo resultado[47, 29, 48].

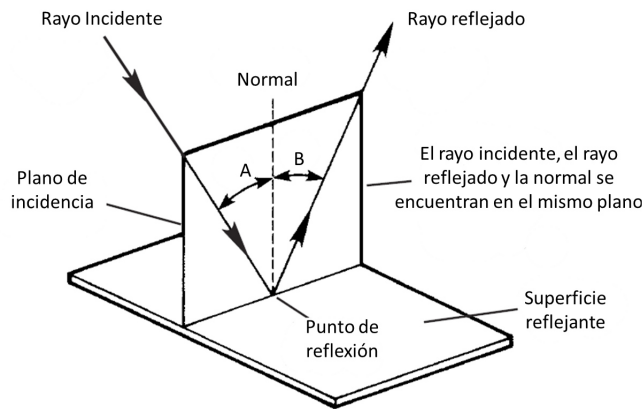


Figura 2.11: Reflexión de un rayo de luz en la frontera entre 2 medios, se observa como el rayo incidente y el rayo reflejado tienen el mismo ángulo con respecto a la normal.

Cuando la luz viaja de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor, pueden ocurrir 4 posibles resultados:

- Si el ángulo tiene una incidencia normal, es decir $\theta_1 = 0^\circ$, no se desviará y se transmitirá al siguiente medio.
- Si el ángulo no incide perpendicular al medio, es decir, $\theta_1 \neq 0^\circ$, el rayo puede modificar su trayectoria de 3 maneras distintas:
 - Se refractará al entrar al segundo medio y tendrá un ángulo θ_2 , el cual corresponderá con la Ley de Snell (Ec. 2.29).
 - Se refractará con un ángulo de 90° , es decir, viajará a lo largo de la interfaz.
 - Se reflejará totalmente, sufriendo un fenómeno llamado **Reflexión Total Interna (RTI)**.

Acorde a los posibles resultados en el viaje de la luz, el ángulo para el cual se de una refracción a lo largo de la interfaz, debe tener un valor conocido como **ángulo crítico** (θ_c), el cual se deriva de la ley de Snell[47, 48]:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.30)$$

lo anterior solo es válido si $n_2 < n_1$. La reflexión total interna se dará siempre que el ángulo de incidencia sea mayor al ángulo crítico:

$$\theta_1 > \theta_c \quad (2.31)$$

A continuación se explicarán algunos conceptos relacionados con los sistemas ópticos, los cuales se derivan a partir de las definiciones vistas anteriormente.

2.1.2.3. Elementos ópticos

Para poder diseñar con éxito un colector de energía solar, es importante conocer el papel que desempeñará dentro de un sistema óptico, así como los elementos que integran el mismo.

Un **sistema óptico** tiene como función el recolectar y remodelar una parte del frente de onda incidente, generalmente con el objetivo de formar la imagen de un objeto[47]. Sin embargo, gracias a los trabajos desarrollados en los últimos 50 años, hoy se puede indicar que un sistema óptico puede o no ser formador de imagen, siendo los primeros el tema de estudio de la **Óptica Geométrica Clásica** y, los no formadores de imagen, el eje central de la **Óptica Anidólica** o no formadora de imagen (*Nonimaging Optics*)[10, 46].

Los sistemas formadores de imagen están integrados por un objeto, la óptica o conjunto de componentes ópticos que dictan el camino de la luz dentro del sistema y la imagen que corresponde punto a punto con el objeto. Por otro lado, los sistemas no formadores de imagen están compuestos por una fuente de luz en lugar de un objeto y un receptor en lugar de la imagen, por lo que la correspondencia uno a uno de la fuente en el receptor no es necesaria en estos sistemas, así que la óptica del sistema produce un patrón de iluminación prescrito en el receptor[47, 10].

Dentro de la óptica de los sistemas podemos encontrar diferentes elementos, a continuación se definirán los más utilizados.

Superficies reflejantes. Son llamadas comunmente espejos o reflectores, usan la reflexión de la luz para construir imágenes bidimensionales de objetos también tridimensionales[47].

Lentes. Son elementos ópticos refractores de la luz, los cuales siguen la ley de Snell para describir el camino óptico de la luz que incide en ellos.

De manera general, las lentes pueden clasificarse en[47]:

- **Lentes convergentes.** Llamadas también lentes positivas, son las que, al recibir una onda plana, la concentran en un punto localizado en su distancia focal.

- **Lentes divergentes.** Llamadas también lentes negativas, su función es la opuesta a la de las lentes convergentes, es decir, al recibir un frente de onda divergente, lo coliman para formar un frente de onda plano.

Al ser los lentes de Fresnel el tema central del presente trabajo de investigación, se proseguirá a definir términos importantes relacionados con los lentes.

El tamaño de una lente limita su captación de luz y la irradiancia de la imagen que forma, por lo que se usan las siguientes características para describir cuantitativamente la capacidad de captación de los lentes:

- La **apertura numérica (NA)** es el seno del semi-ángulo del cono de rayos axiales mayor que puede entrar o dejar un sistema, multiplicado por el índice de refracción del medio en el cual el vértice del cono es colocado[27, 7, 29]:

$$NA = n \sin \theta_{1/2} \quad (2.32)$$

- El **número $f/\#$** es la razón entre su distancia focal efectiva f y el diámetro de la entrada de su pupila D [27, 7, 29]:

$$f/\# = \frac{f}{D} \quad (2.33)$$

El flujo incidente de la imagen esta relacionada con el número $f/\#$ y la NA de la siguiente forma[48]:

$$\text{Flujo incidente} \propto \frac{1}{(f/\#)^2} \quad (2.34)$$

$$\text{Flujo incidente} \propto (NA)^2 \quad (2.35)$$

Las lentes también pueden clasificarse como[48, 32]:

- **Lentes delgadas.** Son aquellas cuyo grosor axial es pequeño comparado con el radio de curvatura de su superficie. Este tipo de lentes sigue relacionada la distancia focal con las distancias entre el objeto y la imagen como:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (2.36)$$

donde o es la distancia al objeto, i es la distancia a la imagen y f es la distancia focal.

- **Lentes gruesas.** Su grosor axial no es pequeño comparado con el radio de curvatura.
- **Lentes de Fresnel.** Se caracterizan por ser delgadas y ligeras, su grosor paraxial es aún menor que en el caso de las lentes delgadas. Para fines de simulaciones, las lentes de Fresnel se manejan como lentes convencionales.

Finalmente, el ángulo sólido del sistema óptico o elemento se relaciona matemáticamente con el $f/\#$ y la NA como[29]:

$$\Omega = \frac{\pi}{4(f/\#)^2} = \frac{\pi(NA)^2}{n^2} \quad (2.37)$$

Una de las técnicas utilizadas para el análisis numérico de los sistemas ópticos es el **trazado de rayos**, la cual está basada en la Óptica Geométrica y utiliza la Ley de Snell y la Ley de Reflexión para determinar la trayectoria de los sistemas ópticos. Para la realización de este método se debe considerar que[48, 46, 32]:

- 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 *eje óptico*.
- Se debe conocer la longitud focal de todos los elementos ópticos involucrados.
- Es conveniente el uso de las Leyes de Reflexión y Refracción en su forma de vector.

Esta técnica es generalmente empleada por software especializado de simulación óptica como Zemax® u OSLO®.

2.1.3. Óptica Anidólica

La colección de radiación solar y la óptica anidólica van de la mano debido a que la colección y concentración de energía solar no demanda calidad de imagen, pero requiere flexibilidad en sus diseños según el uso que tendrá dicha radiación[9, 51].

Óptica Anidólica u Óptica No Formadora de Imágenes. Estudia la transferencia de energía radiante entre la fuente y el receptor. Es mejor conocida por su nombre en inglés *Nonimaging Optics*[51].

El término anidólico se acuñó a partir del hecho de que la alta eficacia no exige la condición de formación de imágenes. La óptica anidólica comenzó con los trabajos de Roland Winston en 1965, cuando diseñó el Colector Parabólico Compuesto (CPC), que es considerado el primer colector anidólico, el cual se utilizó para coleccionar luz en el detector Cherenkov [9, 51, 52].

Como resultado, la Óptica Anidólica ha dado lugar al diseño y creación de sistemas ópticos con un menor número de superficies, con eficiencias mayores e inclusive con una mayor tolerancia a errores de fabricación, por lo que se ha vuelto una herramienta clave en el diseño óptico orientado a la iluminación[51].

La Óptica Anidólica tiene como objetivo la solución de dos problemas específicos de diseño[53]:

- **Óptimo acoplamiento.** Busca maximizar la transferencia de potencia de luz desde la fuente hasta el receptor.
- **Irradiancia prescrita.** Tiene como objetivo obtener un patrón de irradiancia deseado en la superficie receptora.

Este proyecto de investigación y el colector diseñado como resultado del mismo, se plantearon bajo la premisa de cumplir con el problema de diseño del óptimo acoplamiento, para lograr concentrar la mayor cantidad de radiación solar que pueda ser usada para iluminación sin el uso de sistemas de seguimiento solar.

Para resolver los problemas de la Óptica Anidólica se usan diversas técnicas o métodos de diseño, entre los cuales se encuentra el método de diseño del rayo marginal, que se considera la base de los demás métodos empleados[54].

2.1.3.1. Método de diseño del rayo marginal

Este método de diseño es aplicado para el diseño de lentes de Fresnel anidólicos[9], para comprenderlo mejor es importante definir el concepto de rayo marginal.

Se define como **rayo marginal de una superficie** como aquel rayo que pasa por el borde de la superficie o que es tangencial a esta[54].

El método del rayo marginal (Fig. 2.12) toma los rayos marginales extremos que entran a la superficie óptica y traza su camino óptico hacia los extremos del área de recepción, ya que se fundamenta en que los rayos marginales (extremos) de la fuente deben llegar a los extremos del objetivo o receptor final, por ende, todo rayo que salga de entre los rayos marginales deberá llegar a algún punto entre los extremos del objetivo o detector final[10, 54, 2].

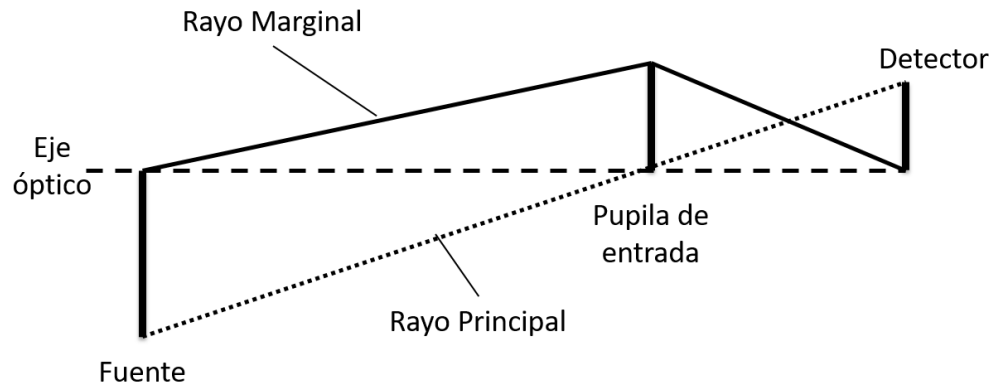


Figura 2.12: Método de diseño del rayo marginal.

Es importante mencionar que la existosa aplicación del método del rayo marginal para el diseño de un elemento óptico no asegura que el sistema sea ideal[9].

2.2. Prismas

Podemos definir al **prisma** como un elemento óptico de vidrio, cristal o algún otro material transparente que tiene dos o más caras planas pulidas y generalmente no paralelas entre sí, siendo su versión más simple un triángulo[9, 50].

Los prismas pueden tener diversas funciones como la dispersión de la luz, que generalmente emplea prismas como el prisma equilátero o el prisma de Abbe; así como colimar, invertir, revertir, reflejar, refractar y rotar imágenes o flujo lumínicos[49, 50].

Si bien un lente de Fresnel, como ya se mencionó antes, es formado a partir de la simetría de revolución de una cadena de prismas, es importante destacar que dichos prismas deben ser aquellos capaces de refractar la luz hacia un punto determinado, por lo que a continuación se estudiarán los prismas refractivos.

2.2.1. Prisma de refracción

Llamaremos **prisma de refracción** a aquel prisma que recibe un rayo de luz, lo refracta cuando entra a su interior y lo refracta al momento de salir. Un ejemplo de este tipo de prismas lo observamos en la Figura 2.13, el cual, considerando la ley de Snell, cumple las siguientes ecuaciones[9]:

$$n' \sin \phi_0 = n \sin \phi_1 \quad (2.38)$$

$$n \sin \phi_2 = n' \sin \phi_3 \quad (2.39)$$

donde ϕ_i es el ángulo que tiene el rayo de luz con respecto a la normal en cada una de las superficies durante su trayectoria, n' y n representan el índice de refracción fuera y dentro del prisma respectivamente, y los ángulos β y α definen la apertura e inclinación del prisma. Lo anterior se observa en la figura 2.13, lo cual además nos permite establecer la siguiente relación geométrica entre la refracción en la primera y la segunda superficie del interior del prisma[9]:

$$\beta = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.40)$$

Para el diseño de lentes de Fresnel de imagen y anidólicas ya existe una metodología del proceso de diseño compilada y mostrada en los trabajos de Leutz et al. [13, 9]. En la siguiente sección se explicarán dichos métodos, incluyendo las ecuaciones que se derivan y los algoritmos de la integración de los prismas en lentes.

2.3. Lentes de Fresnel de imagen

Para integrar un lente de Fresnel es necesario diseñar de manera iterativa cada uno de los prismas que integrarán nuestro elemento óptico. Los parámetros de entrada y salida del diseño de prismas dependerán de la fuente que vayamos a considerar, así como de las características de nuestro receptor, por lo que se considera como base el prisma de Fig. 2.13 y se adaptará su geometría a cada tipo de lente.

Los lentes de Fresnel de imagen ofrecen flexibilidad en el diseño óptico, tolerancia a errores de manufactura, además de ser ligeros, tener un menor volumen y costar menos que los lentes convencionales. En contraste, estos lentes son muy susceptibles a aberraciones en el punto focal debido a cambios en el ángulo de incidencia de los rayos de la fuente, cuya tolerancia límite se reporta alrededor de 1° [9, 55].

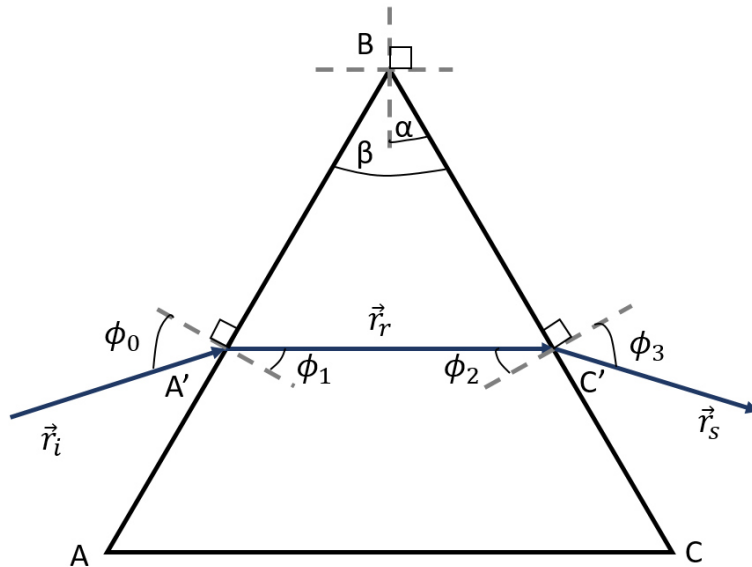


Figura 2.13: Trazado de rayos en un prisma de refracción, donde el rayo incidente \vec{r}_i que viaja en un medio con índice de refracción n' , llega a la superficie de un prisma con índice de refracción n , donde sufre una refracción cuya dirección se representa por el rayo \vec{r}_r , el cual se refracta nuevamente al llegar a la segunda superficie del prisma, regresando al medio con índice de refracción n , con lo que se desvía acorde a lo mostrado por el rayo \vec{r}_s .

2.3.1. Método de diseño

Los lentes de Fresnel de imagen se diseñan a partir de la solución de la ley de Snell aplicada a triángulos rectángulos. Las ranuras o “dientes” del lente de Fresnel pueden colocarse viendo hacia la fuente (hacia adentro), o hacia el receptor (hacia afuera), siendo los lentes con ranuras orientadas hacia el receptor los más comunes, ya que los que tienen las ranuras orientadas a la fuente son difíciles de limpiar y son propensos a pérdidas por la sombra que generan los prismas del lente unos a otros. Por lo anterior, la descripción del método de diseño de los lentes de Fresnel de imagen se limitará a aquellos lentes cuyas ranuras están orientadas hacia adentro[9].

Considerando el lente mostrado en la Fig. 2.14 y el prisma de la Fig.2.13, las ecuaciones 2.38 y 2.39 siguen siendo válidas, pero considerando las siguientes particularidades para estos prismas: [9, 49]:

$$\theta_0 = \phi_0 = 0^\circ \quad (2.41)$$

$$\beta = \phi_1 + \phi_2 = \phi_2 \quad (2.42)$$

$$\theta_{out} = \phi_3 - \beta \quad (2.43)$$

Los ángulos ϕ_i corresponden a los mostrados en la Fig. 2.13, considerando que, para el caso de los lentes de imagen, $\alpha = \phi_0 = 0^\circ$. El ángulo θ_{out} corresponde al ángulo de

salida del rayo refractado dentro del prisma pero, a diferencia de ϕ_3 , este es medido desde el eje óptico del sistema, en lugar de ser medido desde la normal a la superficie de la ranura del prisma, tal como se observa en la Fig. 2.14.

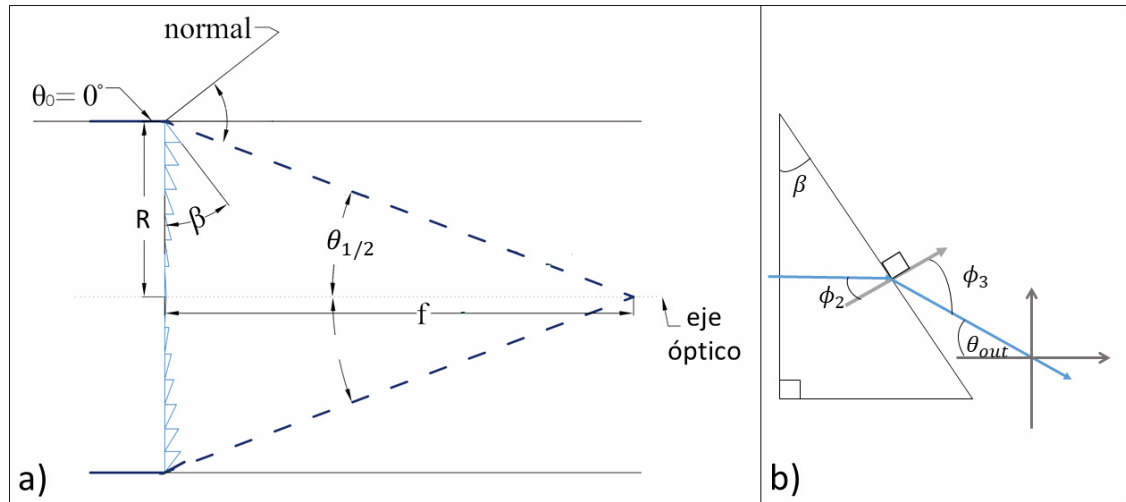


Figura 2.14: a) Perfil de lente de Fresnel de imagen conformado por triángulos rectángulos cuyas ranuras se orientan hacia adentro, por lo que su superficie exterior es plana. b) Prisma de lente de Fresnel de imagen.

Considerando las ecuaciones anteriores y la ley de Snell, la solución del ángulo β para un prisma que integra un lente de Fresnel de imagen es[9]:

$$\beta = \arctan \left(\frac{R_i}{n\sqrt{(R_i)^2 + f^2} - f} \right) \quad (2.44)$$

donde n es el índice de refracción del lente y se excluye n' por considerarse que el lente esta rodeado de aire; R_i es el radio relativo al i -ésimo prisma, es decir la distancia que existe entre el centro del lente y el borde exterior del prisma y f representa la distancia focal.

Un lente de Fresnel de imagen es considerado una lente delgada, por lo que se define su apertura numérica como[9, 49]:

$$\theta_{1/2} = \arctan \left(\frac{R}{f} \right) \quad (2.45)$$

El ángulo θ_{out} del prisma exterior debe coincidir con su apertura numérica, es decir $\theta_{out} = \theta_{1/2}$

El método de diseño de lentes de Fresnel de imagen se puede resumir como:

- Seleccionar los parámetros iniciales de diseño: f , R y material de construcción (n).
- Para el diseño iterativo de los prismas se pueden elegir 2 opciones diferentes:

- Prismas con ancho fijo (Δx).
 - Prismas con alto fijo (Δy).
- A partir de la Ec. 2.45 y dependiendo cual de las opciones anteriores se eligió, se deberá diseñar cada prisma del lente, considerando que todos los lentes deberán concentrar la luz en el mismo punto focal.
 - Teniendo todos los prismas diseñados se procede a generar un sólido extruido a partir del perfil, para obtener un lente de Fresnel lineal, o se genera un sólido de revolución, para tener un lente puntual circular.

Un ejemplo del resultado de aplicar este método de diseño se observa en la Fig. 2.15, el cual representa un perfil con prismas que tienen ancho constante que fue posteriormente rotado para generar un sólido de revolución.

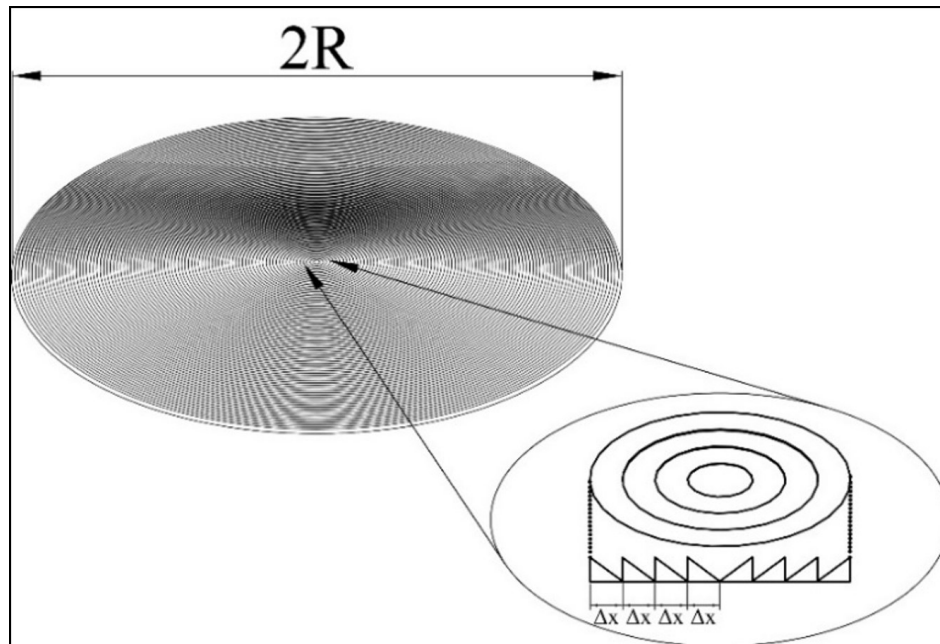


Figura 2.15: Lente de Fresnel de imagen cuyos prismas fueron diseñados de manera iterativa bajo el método de diseño presentado y considerando que Δx es constante y que fue generado como un sólido de revolución.

Como se pudo observar, los lentes de Fresnel de imagen están compuestos por un tipo específico de prisma donde el prisma no tiene inclinación con respecto al eje ($\alpha = 0$) y el prisma tiene un ángulo recto, por lo que las ecuaciones que se verán para solucionar prismas de lentes de Fresnel anidólicos pueden ser utilizadas para el diseño de lentes de Fresnel de imagen.

2.4. Lentes de Fresnel anidólicos

Los lentes de Fresnel anidólicos se basan en el método del rayo marginal y ofrecen un semi-ángulo de aceptación, por lo que requieren de sistemas de seguimiento solar menos precisos, con un sólo eje o, dependiendo de las necesidades del diseño, pueden prescindir de él. Este tipo de lente está generalmente compuesto de prismas orientados hacia adentro, lo cual genera una superficie externa lisa y, además, contribuye a disminuir las aberraciones focales.

Los lentes de Fresnel anidólicos presentan una longitud focal menor y un menor volumen que los lentes de imagen y pueden ser usados como concentradores solares, colimadores, luminarias, entre otros, ya que pueden alcanzar factores de concentración entre 10X y 550X[9, 56, 57, 58].

A continuación se muestra el método de diseño de lentes de Fresnel anidólicos presetando por Leutz y Akizawa a finales de los 90s, el cual se considera el método más comúnmente usado y representa además la base para el resto de los métodos[9, 11].

2.4.1. Método de diseño

Al igual que en un lente de Fresnel de imagen, es necesario diseñar de manera iterativa cada uno de los prismas que integrarán el lente de Fresnel anidólico, pero ahora se parte del hecho de que la luz que se captará tendrá un semi-ángulo de aceptación θ_{in} , lo cual se observa en la Fig. 2.16 al realizar el análisis de los rayos marginales.

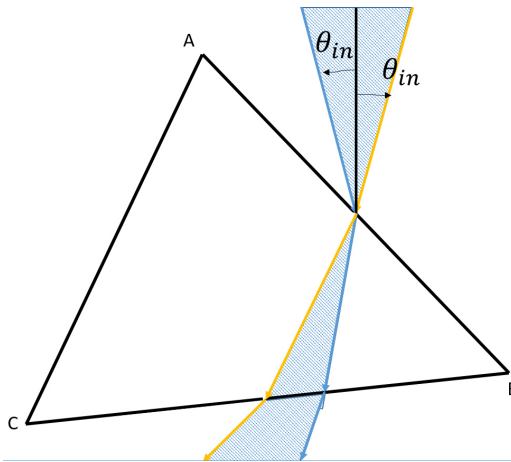


Figura 2.16: Aceptancia angular de un prisma anidólico refractivo, con su posterior refracción dentro del prisma y sus rayos marginales, con lo que se observa que, en lugar de un punto focal, se obtiene un área de colección.

2.4.1.1. Parámetros en el diseño de lentes de Fresnel anidólicas

Además del semi-ángulo θ_{in} es necesario establecer ciertos parámetros iniciales para el diseño y calcular, a través de la aplicación de la ley de Snell, otros parámetros de los prismas, los cuales son:

- Ángulo ω . Divide la apertura del lente en segmentos iguales y, subsecuentemente, define el ancho del prisma Δx . Este parámetro también delimita el número de prismas que integran el lente (Fig. 2.17).
- El ángulo de apertura de cada prisma β .
- El ángulo de inclinación horizontal de cada prisma α con respecto al plano xy (Fig. 2.13).
- El índice de refracción n del material del lente.
- El margen de error ΔE , el cual es el valor máximo permisible de diferencia para la solución numérica de β al usar algún método iterativo por aproximaciones para su solución.

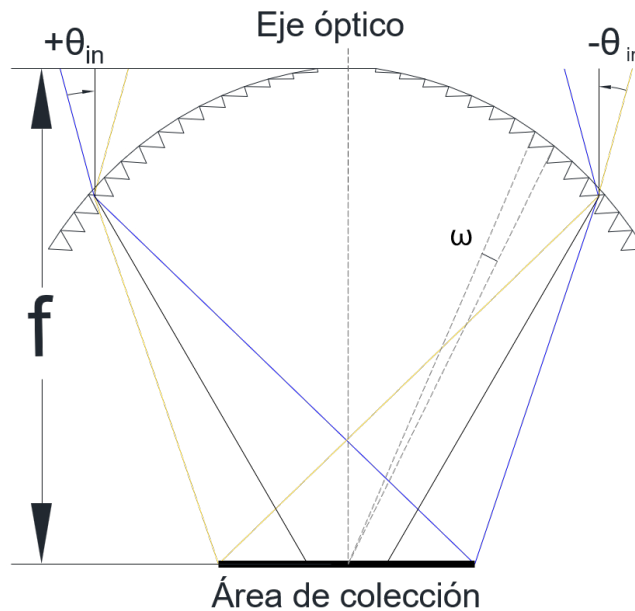


Figura 2.17: Perfil de lente de Fresnel anidólica que nos muestra la apertura angular de uno de los prismas que integran el lente, así como los rayos marginales que se toman para el diseño del mismo.

Los típicos valores de estos parámetros de diseño se encuentran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Valores típicos para los parámetros de diseño de lentes de Fresnel anidólicas[9]

Parámetro	Variable	Valores típicos
Semi-ángulo de aceptación	θ_{in}	$\pm (0.5 \leq \theta_{in} \leq 30^\circ)$
Apertura del segmento o prisma	ω	$0.2 \leq \omega \leq 5.0^\circ$
Inclinación del prisma	α	$0.0 \geq \alpha \geq -20.0^\circ$
Apertura del prisma	β	$0.0 \leq \beta \leq 80.0^\circ$
Índice de refracción	n	1.49
Margen de error	ΔE	1×10^{-6}

2.4.1.2. Ecuaciones matemáticas para el diseño

Siguiendo el método de diseño propuesto por Leutz, se sabe que dicho semi-ángulo θ_{in} estará relacionado con el área de colección y la distancia focal por[9]:

$$f = \frac{d}{\tan \theta_{in}} \quad (2.46)$$

donde d es la mitad de la longitud del área de colección.

Antes de explicar a detalle el proceso de diseño de un lente de Fresnel anidólico, revisaremos como se realizará el diseño de cada uno de sus prismas considerando la ley de Snell, la ecuación 2.40 y buscando la convergencia de su solución. Considerando que tenemos un semi-ángulo θ_{in} de entrada, primero estudiaremos el caso del rayo marginal con este ángulo que proviene de la parte izquierda del eje vertical del sistema, lo cual se ilustra en la figura 2.18, de donde obtenemos las siguientes relaciones:

$$\phi_0 = \beta - \alpha + \theta_{in} \quad (2.47)$$

$$\theta_{out} = \phi_3 + \alpha \quad (2.48)$$

donde además las ecuaciones 2.38 - 2.40 se respetan, tal como en cualquier prisma refractivo. El ángulo θ_{out} , al igual que en el lente de Fresnel de imagen, es el ángulo de salida de la luz de cada prisma en particular, pero medido desde el eje óptico del sistema óptico, representado en la Fig. 2.18 por el plano cartesiano donde incide \vec{r}_s .

Por otra parte, para el caso en que el ángulo θ_{in} proviene del lado derecho del eje vertical del sistema tenemos dos opciones: que el ángulo ϕ_0 se forme de lado izquierdo de la normal de la superficie del prisma o, en su defecto, que se forme de lado derecho, tal como se observa en la Figura 2.19.

Con respecto a los ángulos de refracción dentro del prisma y su relación con el mismo se obtiene que:

$$\phi_0 = \beta - \alpha - \theta_{in} \quad (2.49)$$

mientras que las relaciones para ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 y θ_{out} se obtienen a partir de las ecuaciones 2.38, 2.39, 2.40 y 2.48, respectivamente.

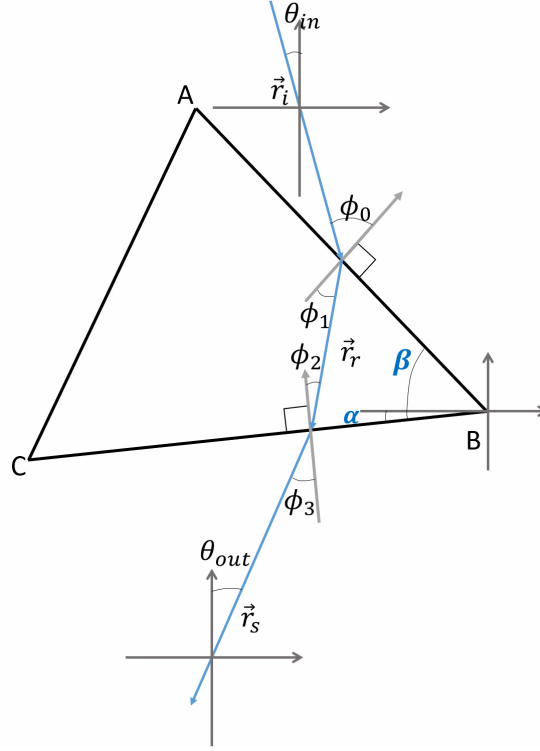


Figura 2.18: Trazado de rayos para un prisma ABC de un lente de Fresnel anidólico usando el rayo marginal izquierdo, y considerando que el índice de refracción dentro del prisma es n' y el del medio es n .

Si se analiza la figura 2.19b se puede observar que la nueva relación para ϕ_0 es:

$$\phi_0 = -\beta + \alpha + \theta_{in} \quad (2.50)$$

Además, la relación para el ángulo β también se ve modificada como:

$$\beta = \phi_2 - \phi_1 \quad (2.51)$$

Para lograr converger a una solución más simple en el método que se describirá a continuación, se realizó la consideración de que todos los ángulos que lleguen de lado izquierdo de la normal correspondiente tendrán signo positivo, mientras que aquellos ángulos situados al lado izquierdo, serán siempre negativos. Bajo esta consideración y tomando en cuenta que el medio externo al prisma tiene un índice de refracción aproximadamente igual a 1 (se considera que es aire), las ecuaciones finales que describen el trazado de rayos dentro del prisma son[9]:

$$\phi_0 = \beta - \alpha + \theta_{in} \quad (2.52)$$

$$\phi_1 = \arcsin\left(\frac{\sin \phi_0}{n'}\right) \quad (2.53)$$

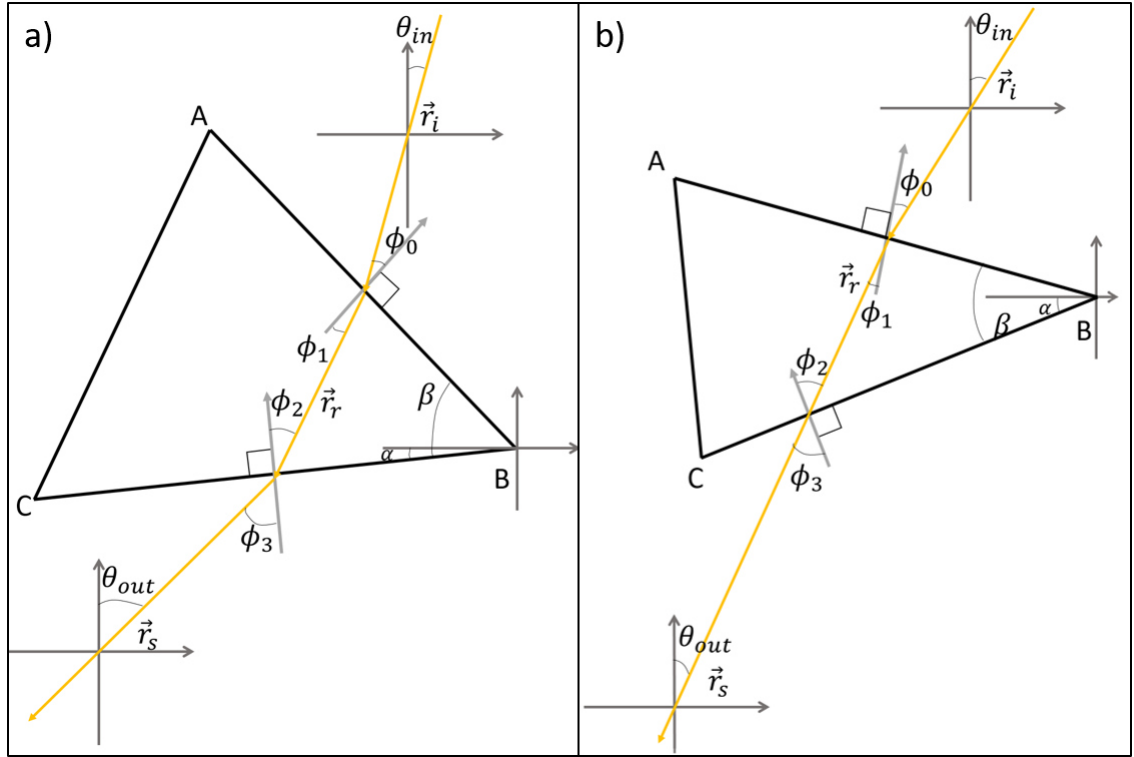


Figura 2.19: Trazado de rayos para un prisma de un lente de Fresnel anidólico usando el rayo marginal derecho, considerando los dos casos posibles. a) ϕ_0 incide de lado izquierdo de la normal de la superficie del prisma. b) ϕ_0 incide de lado derecho de la normal de la superficie del prisma.

$$\beta = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.54)$$

$$\phi_3 = \arcsin(n \sin \phi_2) \quad (2.55)$$

$$\theta_{out} = \phi_3 + \alpha \quad (2.56)$$

De las ecuaciones anteriores se puede establecer una relación para encontrar β en términos de α , θ_{in} y θ_{out} :

$$\beta = \arctan \left[\frac{n+1}{n-1} \tan \left(\frac{\theta_{in} - \alpha + \phi_2}{2} \right) \right] - \frac{\theta_{in} - \alpha - \phi_2}{2} \quad (2.57)$$

donde

$$\phi_2 = \arcsin \frac{\sin(\theta_{out} - \alpha)}{n} \quad (2.58)$$

2.4.1.3. Algoritmo de diseño

A diferencia de la solución de β en la ecuación 2.44, para los lentes de Fresnel anidólicos es necesario usar algún método iterativo para solucionar β utilizando el método de Newton para asignarle valor por aproximaciones a α , por lo que se incluye al parámetro ΔE para especificar el margen de error permisible para el diseño, siendo 1×10^{-6} el valor más comúnmente usado[9].

Las ecuaciones anteriores nos permiten diseñar prismas como objetos aislados al sistema, pero para lograr integrar los prismas para formar un solo lente acorde al método de Leutz, es necesario considerar que cada uno de ellos tiene una apertura angular constante ω , lo que nos permite delimitar el tamaño de las aristas de nuestro prisma. En la Fig. 2.17 se observa el ángulo ω ; además, se visualiza como los rayos con ángulos de entrada *positivos* ($\theta_{in} > 0^\circ$) deben de seguir un camino óptico tal que enfoquen en el extremo derecho del área de colección, mientras que los *negativos* ($\theta_{in} < 0^\circ$), enfocan en el lado izquierdo. Por el método del diseño del rayo marginal, se espera que todo aquel rayo que incida entre los rayos marginales debe ser refractado para llegar a un punto dentro de los límites del área del receptor[9].

A partir del análisis del prisma, se tiene que el diseño sigue el algoritmo presentado en la Fig. 2.20, donde $n_s(\lambda_s)$ representa el índice de refracción del material de construcción para la longitud de onda más corta y, $n_h(\lambda_h)$, el índice de refracción del material de construcción para la longitud de onda más larga; además, los ángulos β_1 y β_2 , representan los ángulos β para θ_{in} y $-\theta_{in}$, respectivamente.

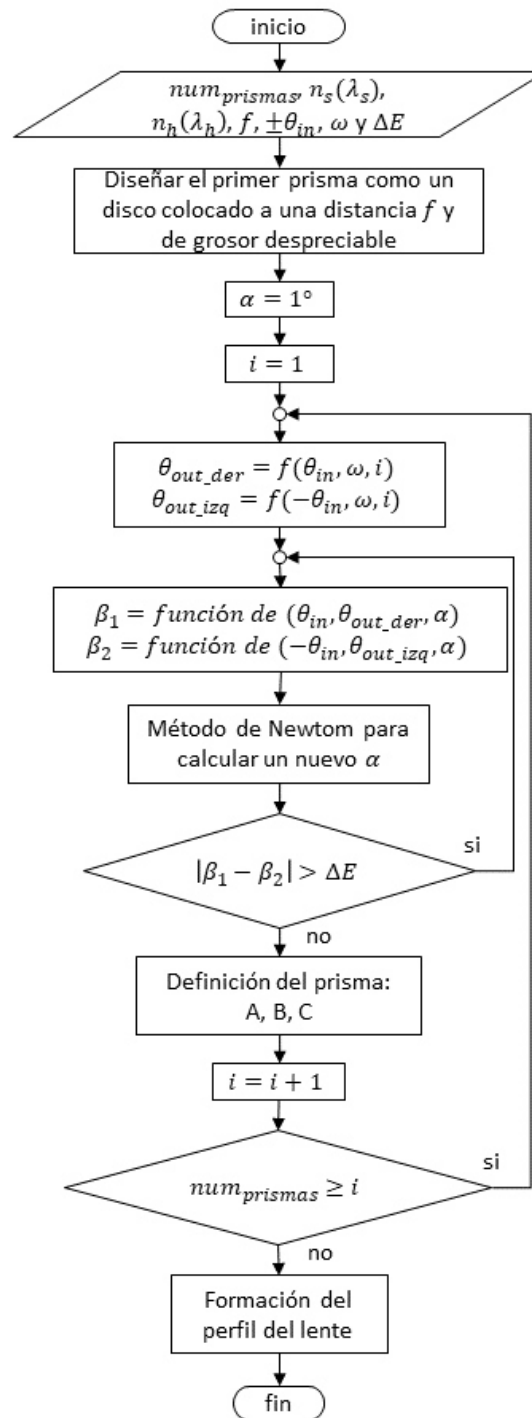


Figura 2.20: Diagrama de flujo del método para el diseño de lentes de Fresnel anidólicas[9, 59].

El resultado final de este método de diseño será un perfil curvo de prismas como el mostrado en la figura 2.17, el cual podrá ser usado para generar un lente de arco, que corresponde a un sólido extruido a partir de este perfil, o para generar un domo, que corresponde a un sólido de revolución a partir del perfil. En ambos casos se tiene la ventaja de los lentes anidólidos, es decir, se tiene un semi-ángulo de aceptación, mientras que dependiendo de si es un arco o un domo, generará como mancha focal una línea o un área circular. La Fig.2.21 nos muestra un lente de Fresnel anidólico tipo domo[9].

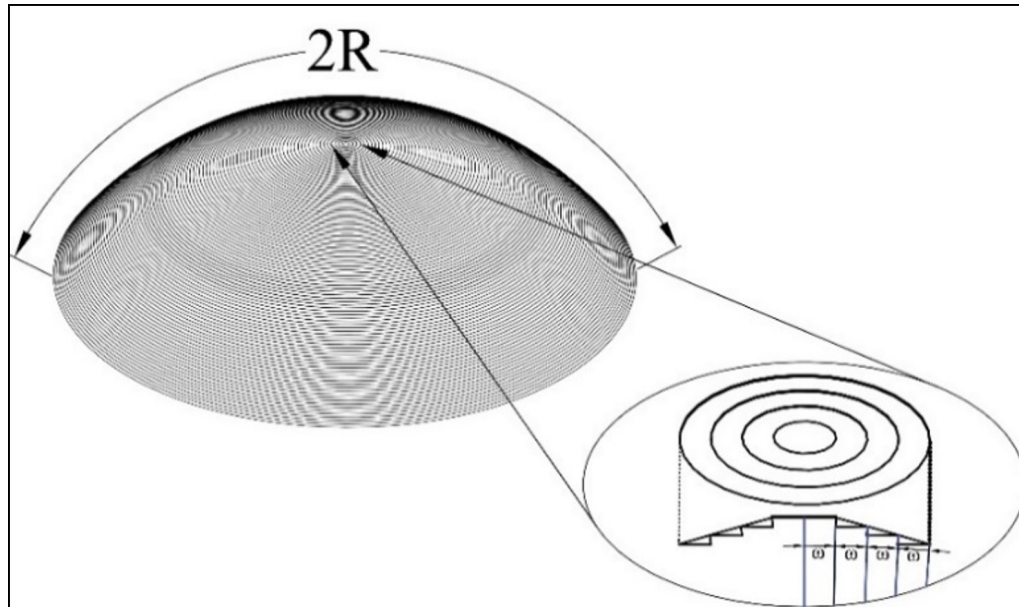


Figura 2.21: Lente de Fresnel anidólico cuyos prismas fueron diseñados de manera iterativa bajo el método de diseño presentado y considerando que ω es constante para cada prisma.

Para contrastar los lentes de Fresnel de imagen y anidólico, se presenta en la Fig. 2.22 un ejemplo de un lente de Fresnel anidólico que contrasta el lente de Fresnel de imagen presentado en la Fig. 1.7 en el Capítulo 1.

2.5. Pérdidas y aberraciones en lentes de Fresnel

Existen muchos tipos de pérdidas y aberraciones en los sistemas ópticos, pero al ser este un trabajo dedicado al estudio de los lentes de Fresnel, enfocaremos el estudio de pérdidas y aberraciones a aquellas que afectan a los lentes de Fresnel.

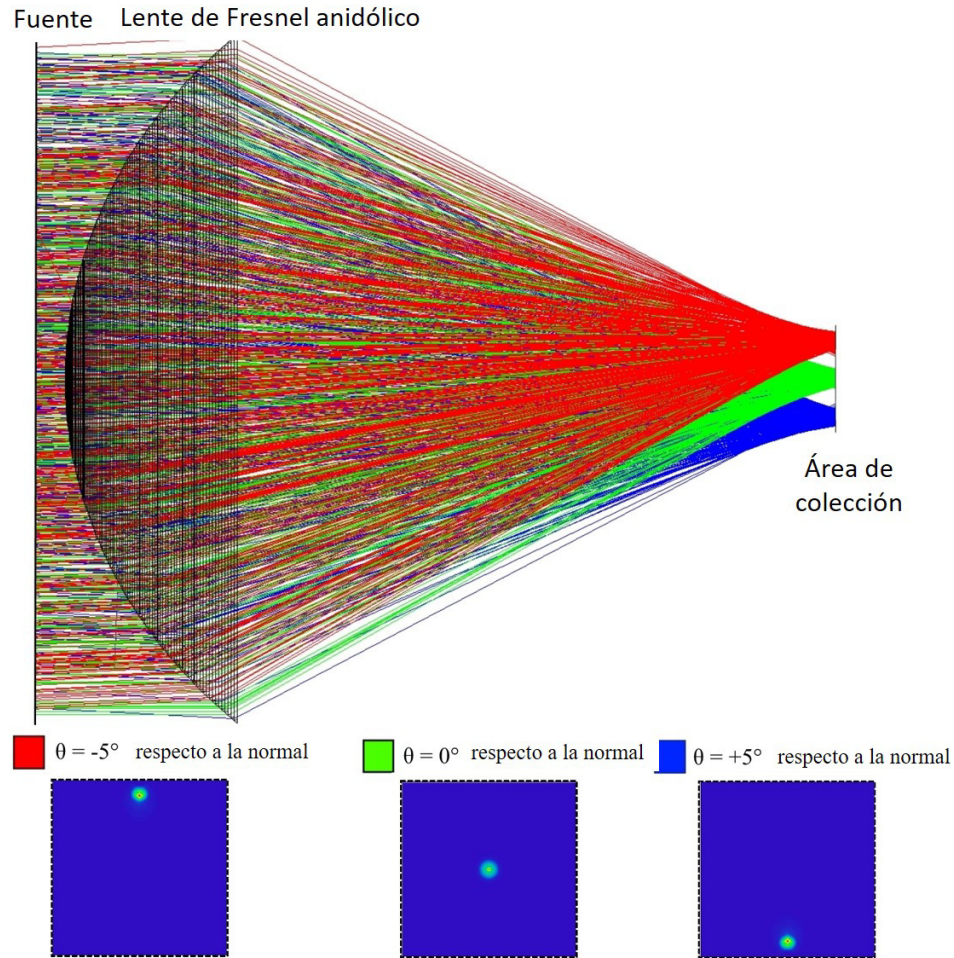


Figura 2.22: Manchas focales colectadas en el receptor de un sistema con un lente de Fresnel anidóico. Para los casos en que la radiación llega a la lente de imagen con $\pm 5^\circ$ respecto a la normal del lente (eje óptico), se observan las manchas focales extremas y, cuando la incidencia de los rayos es paralela al eje óptico, se observa que la mancha focal está en el centro del receptor pero, para todos los casos, la luz incide en el área esperada.

2.5.1. Aberración cromática

Como se mencionó previamente, el índice de refracción es una función de la longitud de onda de la luz, por lo que puede ocurrir el fenómeno de dispersión al trabajar con la parte visible del espectro. Lo anterior nos indica que las longitudes de onda más cortas, como el UV o el color azul, son refractadas mucho más lejos de la normal de la superficie que aquellas longitudes mayores, como el rojo o el IR.

Este efecto nos indica que un lente tiene diferentes distancias focales para distintos colores, lo cual es conocido como **aberración cromática**[50].

Cuando se diseñan elementos ópticos para la colección de radiación solar, se debe considerar que se trabaja con un rango del espectro (Fig. 2.7) y no con una sola longitud de onda. En este sentido, el Círculo de Mínima Confusión (CLC) es un

área delimitada por los rayos marginales refractados acorde a la ley de Snell, pero utilizando un índice de refracción dependiente de la longitud de onda $n(\lambda)$, lo que permite garantizar que, para un rango del espectro electromagnético se tendrá un área definida de colección.

Por ello, en el caso de los lentes de Fresnel, para evitar la aberración cromática, suele emplearse el CLC para colocar el detector de radiación. Siguiendo el esquema de la Fig. 2.17, el CLC está delimitado hacia la derecha por los rayos marginales que llegan con la longitud de onda más larga y, hacia la izquierda, por los rayos marginales de la longitud de onda más corta[9, 50].

Para el caso de los lentes de Fresnel anidóticos se reporta en la bibliografía el uso del método del rayo marginal usando índices de refracción correspondientes a los extremos de las longitudes de onda a coleccionar para garantizar que todo el espectro sea coleccionado dentro del receptor[60].

2.5.2. Reflexión de Fresnel

Es una de las pérdidas más comunes y se genera debido a que la luz que llega a la frontera entre dos materiales no es totalmente transmitida, sino que una porción es reflejada[61, 62].

La cantidad de luz reflejada en las superficies refractivas depende del ángulo de incidencia y de la polarización de la radiación. En el caso de la luz solar, se considera que es luz no polarizada, por lo que las reflexiones paralelas y perpendiculares deben ser calculadas. El cálculo de dichas reflexiones sigue las ecuaciones de Fresnel[9, 61]:

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\phi' - \phi)}{\tan^2(\phi' + \phi)} \quad (2.59)$$

para la parte paralela, y para la parte perpendicular:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\phi' - \phi)}{\sin^2(\phi' + \phi)} \quad (2.60)$$

donde r_{\perp} y r_{\parallel} representan la porción de luz reflejada para la polarización perpendicular y paralela, respectivamente. Los ángulos ϕ y ϕ' corresponden al ángulo de incidencia y al ángulo de refracción, los cuales se relacionan con la Ley de Snell (Ec. 2.29)[9, 49].

Para la luz del Sol, así como para otras fuentes de luz no polarizada, las pérdidas por reflexión se calculan como[9, 49]:

$$\rho = \frac{1}{2}(r_{\parallel} + r_{\perp}) \quad (2.61)$$

De lo anterior se obtiene que la transmitancia en las superficies refractivas es[9, 49]:

$$\tau_i = 1 - \rho_i \quad (2.62)$$

Además, en el caso de que se tengan 2 o más superficies refractivas, como es el caso de un prisma, se deben multiplicar las transmitancias individuales para obtener la transmitancia final[9, 49]:

$$\tau_{total} = \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (2.63)$$

Para el caso de los lentes de Fresnel de imagen se ha reportado el uso de prismas de reflexión total interna y de doble reflexión total interna para reducir las pérdidas por reflexión de Fresnel[61, 62].

Además de las 2 pérdidas ya mencionadas existen otros tipos de pérdidas o aberraciones, tales como las pérdidas por absorción del material, que se definen como las pérdidas relacionadas con el material y la longitud del camino óptico, o las pérdidas relacionadas con defectos de fabricación o problemas en la instalación, pero siempre se producirá algún tipo de pérdida. Más adelante se plantearán propuestas para disminuir las pérdidas relacionadas con la reflexión de Fresnel y la aberración cromática.

El capítulo siguiente abordará la metodología propuesta para diseñar lentes de domos segmentados que permiten captar la radiación solar en un amplio margen de tiempo y de manera continua, sin el uso de seguidores solares.

CAPÍTULO 3

DISEÑO PROPUESTO DE COLECTORES TIPO LENTES DE FRESNEL

Como se revisó anteriormente, la posición del disco solar cambia durante el día y a lo largo del año, lo que lleva a la necesidad de que gran parte de los sistemas de colección de radiación solar utilicen sistemas de seguimiento solar[21]. En particular, para aplicaciones fotovoltaicas, sistemas de seguimiento solar con alta precisión deben ser utilizados para mantener el punto focal del lente de Fresnel en el lugar preciso a la entrada del elemento óptico secundario o la celda fotovoltaica, incrementando así la eficiencia de la celda en sistemas de unión múltiple[9, 63].

En contraste, las aplicaciones de radiación en iluminación solar y procesos térmicos no requieren alta uniformidad o gran calidad espectral y, por ende, no requieren sistemas tan precisos de seguimiento solar. Para aplicaciones de iluminación natural, una de los principales retos es coleccionar la radiación a lo largo del día manteniendo una eficiencia constante y reduciendo, en la medida de lo posible, la dependencia con el sistema de seguimiento solar[9, 64, 65].

Los lentes de Fresnel anidólicos nos permiten coleccionar la luz del Sol durante amplios periodos de tiempo gracias a su tolerancia angular θ_{in} ; sin embargo, este tipo de lentes aún requiere el uso de sistemas de seguimiento solar de 2 ejes para obtener mayores eficiencias durante todo el día[9].

Recientemente, una solución alternativa para coleccionar la luz del Sol sin el uso de seguidores solares fue presentada por Nair et al.[66] En este estudio, se presentaba un colector segmentado integrado por múltiples lentes de Fresnel de imagen, los cuales estaban diseñados para coleccionar radiación solar en un periodo específico de tiempo. En un contexto similar, el uso de un colector solar formado por múltiples lentes de Fresnel de imagen y un sistema de seguimiento solar de un eje fue sugerido por Vu et al.[65] Estos trabajos han presentado eficiencias alrededor del 50 – 60 %, pero se sigue buscando una mejora en la eficiencia.

Este capítulo presenta una metodología de diseño para la creación de domos estacionarios segmentados compuestos de lentes de Fresnel anidólicos que permitirán la captación de la radiación solar sin el uso de seguidores solares para su aplicación en iluminación natural de interiores. Posteriormente, se mostrará la aplicación del método de diseño a través del desarrollo de un modelo de domo segmentado para el área de Ciudad Universitaria en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

3.1. Método de diseño propuesto

Si bien los lentes de Fresnel anidólicos ofrecen una alternativa para la colección de luz que incide con un cierto rango angular a la lente, debemos destacar que dicha aceptación angular esta delimitada. Considerando el método de Leutz, de acuerdo a la ecuación 2.46, para los casos en que el semi-ángulo de aceptación θ_{in} supera los 45° , el semi-ancho del área de colección superará a la distancia focal, lo que volverá impráctico el sistema propuesto.

Buscando incrementar la aceptación angular del colector sin afectar las dimensiones del receptor y sin implementar sistemas de seguimiento solar, se propone el diseño de un colector de Fresnel segmentado, donde cada uno de los segmentos este alineado para colectar radiación solar en un rango de tiempo específico.

Los rangos para los que será diseñado cada segmento del colector dependerán de la ubicación geográfica para la que se vaya a diseñar el domo, por lo que se deberá hacer un diseño particular para cada región.

El método de diseño propuesto se compone medularmente de 3 pasos principales:

1. Análisis y clasificación de la información del movimiento del disco solar de acuerdo a la hora y día del año.
2. Diseño de un lente de Fresnel anidólico base para los segmentos del domo.
3. Ensamble de los diferentes segmentos del colector tomando en cuenta el posicionamiento del Sol obtenido en el paso 1.

3.1.1. Análisis del desplazamiento del disco solar

El proceso de analizar y clasificar el desplazamiento del disco solar se compone de los siguientes pasos:

1. Recopilación de los datos de desplazamiento del disco solar de la zona, buscado que se tengan datos diarios por un año de las variaciones angular α_s y γ_s (Fig. 1.6), al menos, cada 30 minutos.
2. Clasificación de los datos por segmentos del domo considerando que la diferencia entre los valores extremos del segmento sea tal que:

$$\Delta\alpha_s \leq 2|\theta_{in}| \quad (3.1)$$

$$\Delta\gamma_s \leq 2|\theta_{in}| \quad (3.2)$$

donde θ_{in} es el semi-ángulo de aceptación del lente de Fresnel anidólico y:

$$\Delta\alpha_s = \alpha_{s_{max}} - \alpha_{s_{min}} \quad (3.3)$$

$$\Delta\gamma_s = \gamma_{s_{max}} - \gamma_{s_{min}} \quad (3.4)$$

donde $\alpha_{s_{max}}$ y $\gamma_{s_{max}}$, son los valores máximos de los ángulos para un segmento y, $\alpha_{s_{min}}$ y $\gamma_{s_{min}}$, los valores mínimos.

3. Cálculo de los puntos medios de cada sección, para que sean utilizados como coordenadas para la alineación de los segmentos del domo:

$$\bar{\alpha}_s = \frac{\alpha_{smax} + \alpha_{smin}}{2} \quad (3.5)$$

$$\bar{\gamma}_s = \frac{\gamma_{smax} + \gamma_{smin}}{2} \quad (3.6)$$

En regiones donde se tienen grandes variaciones en el desplazamiento del disco solar durante el año, como es el caso de México, se recomienda dividir el domo en 2 secciones, una para primavera-verano y otra para otoño-invierno, de tal forma que durante la mitad del año se utilice la mitad del domo para colección solar y durante los equinoccios se gire el domo 180° para que se utilice la otra mitad.

3.1.2. Diseño del lente de Fresnel anidólico base

El primer paso para el diseño de un lente de Fresnel anidólico es la definición de los parámetros de entrada, tal como es el material, la distancia focal, el área de colección y la cantidad de prismas que integrarán el lente.

El diseño del lente de Fresnel anidólico que será utilizado para los segmentos del domo se debe diseñar con un semi-ángulo de aceptación tal que:

$$\theta_{in} \geq \frac{\Delta\gamma_s}{2} \quad (3.7)$$

$$\theta_{in} \geq \frac{\Delta\alpha_s}{2} \quad (3.8)$$

Se busca que estas condiciones se cumplan para todos los casos, de tal forma que un mismo lente base sea utilizado en todos los segmentos, reduciendo así la complejidad del diseño a la hora de la fabricación. En caso de que existan segmentos que tengan un $\Delta\alpha_s$ o un $\Delta\gamma_s$ muy grande, se debe considerar dividir en más secciones ese segmento o tratar de aproximarse. En caso de alguna de las secciones no cumpla con estas condiciones, se esperaría que los rangos de ángulos de incidencia no cubiertos en una sección puedan ser captados en alguna de las secciones adyacentes.

El resto del proceso de diseño se puede realizar acorde al método visto en el capítulo anterior (Sección 2.4.1) o adaptando algún otro método de diseño.

3.1.3. Ensamble del domo

Al construir el domo se toma como forma base una semi-esfera de radio r cuyo valor sea la distancia focal del lente de Fresnel anidólico que diseñamos. Posterior a esto, se deberán mapear los segmentos para poder cortar los lentes acorde a la geometría final de cada sección.

Para cada segmento del domo se deberán calcular los puntos medios para la alineación angular $\bar{\alpha}_s$ y $\bar{\gamma}_s$, tal como se indicó en las ecuaciones 3.5 y 3.6, las cuales son consideradas como las magnitudes angulares de las coordenadas esféricas: altitud $\theta_{CE} \rightarrow \alpha_s$ y azimuth $\phi_{CE} \rightarrow \gamma_s$. La magnitud del radio r será dada por la distancia focal del lente de Fresnel anidólico.

Con las alineaciones realizadas, se podrán cortar las secciones que se sobrepone de los diferentes lentes y se tendrá un domo con distintos segmentos de lentes de Fresnel.

Si el domo diseñado requiere rotación durante los equinoccios, el ensamblado de los segmentos de una sección se realiza acorde a las coordenadas esféricas indicadas y, para la segunda sección, la magnitud angular de α_s se desfasa 180° , desfase que es corregido al hacer la rotación.

Para una mejor explicación de todo el proceso de diseño, en la siguiente sección se muestra el diseño de un domo segmentado compuesto de lentes de Fresnel anidólicos.

3.2. Diseño de un colector segmentado

Para probar el método de diseño propuesto se implementó la metodología explicada para la captación de radiación solar en Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León en las coordenadas geográficas $5^\circ 43' 31''$ Norte y $100^\circ 18' 56''$ este.

3.2.1. Desplazamiento del disco solar en CU

Para obtener los datos de posicionamiento angular del disco solar en términos de los ángulos α_s y γ_s para Ciudad Universitaria de la UANL, se utilizó una herramienta en línea llamada *Sun Earth Tools*[67], en la cual se puede consultar la posición solar que se tendría durante un año, cada treinta minutos, desde las 9:00 hasta las 18:00 horas (Hora Centro - CST). En el APÉNDICE A se muestra un resumen en tablas de los valores consultados, mostrando sólo lo obtenido cada 7 días para observar las variaciones que se van presentando a lo largo del año.

Con el primer análisis que se realizó sobre los datos se graficó el primer día de cada mes de cada uno de los ángulos (α_s y γ_s) a una hora determinada, dando como resultado los valores mostrados en las figuras 3.1 y 3.2.

3.2.1.1. Clasificación del desplazamiento solar acorde a θ_{in}

Analizando las figuras 3.1 y 3.2, así como los datos mostrados en las tablas del Apéndice A, se encuentra que los ángulos varían de la siguiente manera:

- $\alpha_s : 5.4^\circ \rightarrow 86.4^\circ$
- $\gamma_s : 75.3^\circ \rightarrow 282.6^\circ$

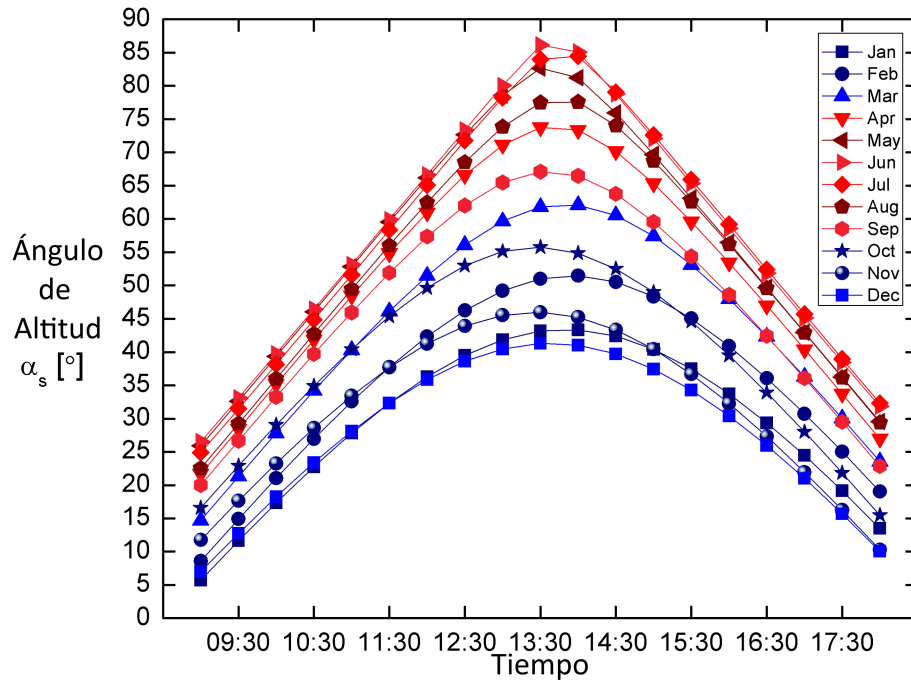


Figura 3.1: Ángulo de altitud solar para los diferentes meses a lo largo del año. Eje-y: α_s en grados, Eje-x: hora del día (HH:MM). El ángulo α_s no excede los 90° . Las líneas rojas representan la temporada primavera-verano y, las azules, otoño-invierno.

Lo anterior nos muestra que la altitud no tiene una variación por encima de los 82° y, además, que no supera al valor de 90° , por lo que una gran parte del domo segmentado no recibirá radiación solar directa. Además, se observa que para el ángulo azimutal, la variación supera los 200° , lo que convierte a esta magnitud en la principal variable a considerar para hacer la clasificación.

Por otra parte, si analizamos las variaciones dividiendo al año en 2 estaciones, observamos lo siguiente:

- Para las estaciones de primavera y verano:

- $\alpha_s : 14.6^\circ \rightarrow 86.4^\circ$
- $\gamma_s : 75.3^\circ \rightarrow 266.7^\circ$

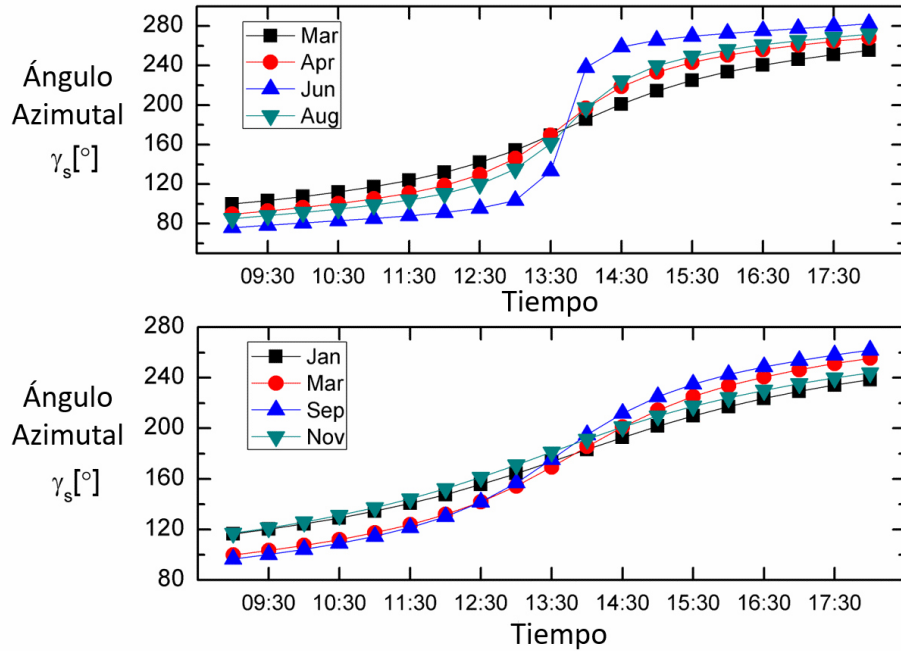


Figura 3.2: Ángulo azimutal solar para los diferentes meses a lo largo del año. Eje-y: γ_s en grados, Eje-x: hora del día (HH:MM). El ángulo γ_s tiene mayores incrementos por hora durante la temporada primavera-verano (gráfica superior), que para otoño-invierno (gráfica inferior).

- Para las estaciones de otoño e invierno:

- $\alpha_s : 5.4^\circ \rightarrow 66.6^\circ$
- $\gamma_s : 96.5^\circ \rightarrow 261.8^\circ$

Considerando los datos anteriores, se concluye que en otoño e invierno el disco solar se desplaza más “rápido” y en verano más “lento”, además de que, por las condiciones climatológicas propias de cada estación, en primavera y verano contaremos con una mayor intensidad solar. Por lo tanto, el domo segmentado estará dividido en 2 secciones, una para primavera-verano y otra para otoño-invierno. Teniendo una sección, la de primavera y verano, con un mayor número de segmentos, y la de otoño e invierno, con menos segmentos, pero de mayor área, para aprovechar al máximo la radiación solar.

Considerando segmentaciones acorde a la hora del día, se realizó la clasificación en periodos de tiempo donde el Sol tenga desplazamientos angulares definidos de alrededor de 60° para el desplazamiento azimutal y 40° para el desplazamiento en altitud, a los cuales identificaremos como $\Delta\alpha_s$ y $\Delta\gamma_s$, como puede ser visto en la Tabla 3.1, así como en la Fig. 3.3 donde podemos ver de nuevo la gráfica de los desplazamientos azimutales de cada mes y, con líneas punteadas, las divisiones de cada segmento.

Tabla 3.1: Clasificación de los desplazamientos de altitud angular y azimutal del disco solar.

Estaciones	Horario	Segmento	$\alpha_{s_{min}}$	$\alpha_{s_{max}}$	$\gamma_{s_{min}}$	$\gamma_{s_{max}}$
Primavera - Verano	09:00 - 11:00	a	14.6°	53.6°	75.3°	117.6°
	11:00 - 12:30	b	40.3°	73.8°	84.6°	142.1°
	12:30 - 13:00	c	56.0°	80.4°	93.9°	157.3°
	13:00 - 13:30	d	59.6°	86.4°	100.8°	179.5°
	13:30 - 14:30	e	60.5°	85.7°	180.2°	260.4°
	14:30 - 15:00	f	57.4°	79.5°	200.5°	266.7°
	15:00 - 18:00	g	23.0°	66.1°	224.6°	282.6°
Otoño - Invierno	09:00 - 12:00	h	5.4°	46.1°	96.5°	139.2°
	12:00 - 14:00	i	27.0°	62.6°	114.5°	161.7°
	14:00 - 16:00	j	33.8°	66.6°	181.7°	234.8°
	16:00 - 18:00	k	9.2°	53.2°	209.5°	261.8°

Con la información mostrada en la Tabla 3.1, se puede observar como las clasificaciones de las altitudes nos permiten contar con segmentos cuyo $\Delta\alpha_s < 45^\circ$ pero, por otro lado, las clasificaciones de los ángulos azimutales tienen variaciones tales que $42^\circ < \Delta\gamma_s < 76^\circ$, pero se espera que en los casos de que el desplazamiento exceda el ángulo de aceptación del segmento, los segmentos adyacentes permitan la captación de radiación solar en esos rangos.

Además, la Fig. 3.3 nos muestra que las variaciones más abruptas del ángulo azimutal se dan en temporada primavera-verano en un horario cercano al mediodía, lo cual corresponde con la creación de más segmentos para estos periodos de tiempo.

Se eligió un Δ angular de 60° pensando en que un lente de Fresnel de $\theta_{in} = \pm 30^\circ$ ofrece una aceptación angular amplia, pero el radio de su área de concentración no supera el 60 % de la distancia focal y se encuentra en el límite superior de los valores típicos empleados para este parámetro acorde a la Tabla 2.4.

A continuación se revisará el diseño del lente de Fresnel anidólico base que se usará para todos los segmentos del domo.

3.2.2. Diseño del lente de Fresnel anidólico para domo de Ciudad Universitaria

Con la información obtenida del desplazamiento del disco solar para Ciudad Universitaria, es posible definir los parámetros de diseño del lente de Fresnel anidólico que servirá de base para el domo segmentado. La Tabla 3.2 muestra los Δ de los desplazamientos, así como el semi-ángulo de aceptación θ_{in} que es similar a sus correspondientes $\Delta\alpha_s/2$ y $\Delta\gamma_s/2$.

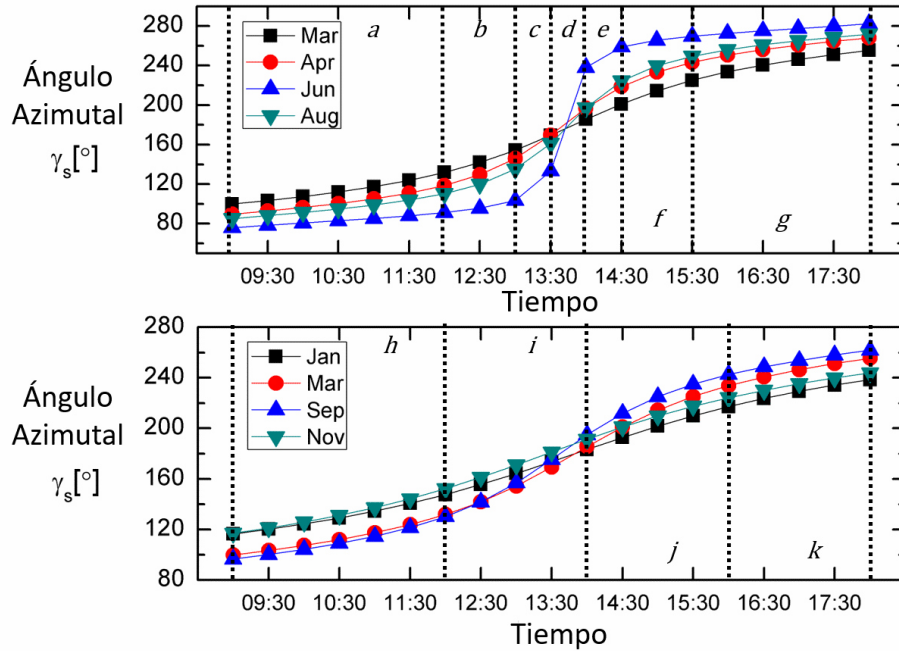


Figura 3.3: Ángulo azimutal solar para los diferentes meses a lo largo del año. Eje-y: γ_s en grados, Eje-x: hora del día (HH:MM). La línea punteada marca la división de cada segmento y se observa que, en cada caso, se buscó aproximar las variaciones alrededor de los 60° .

La Tabla 3.2 nos muestra que los mayores cambios en los desplazamientos angulares se encuentran en el ángulo azimutal (γ_s), por lo que se usan sus $\Delta\gamma_s$ para definir el semi-ángulo de aceptación deseado acorde a la Ec. 3.2. Dicho ángulo se estandariza en $\theta_{in} = 30^\circ$ buscando obtener una simetría en los segmentos del domo y considerando que dicho valor es el máximo recomendado para que se diseñe efectivamente el lente de Fresnel, evitando que se indetermina la solución de los prismas, se cause efecto de sombra o se reduzca de transmitancia del material.

Con la información provista se decidió diseñar un lente de Fresnel anidólico con los siguientes parámetros de entrada:

- Semi-ángulo de aceptación: $\theta_{in} = 30^\circ$
- Material: Polimetilmetacrilato (PMMA)
Índice de refracción: 1.4779
- Número de prismas: 180
- Ángulo de apertura de cada prisma: $\omega = 0.25^\circ$,¹

¹Su valor nos permite escalar el tamaño de los prismas durante el diseño, para evitar prismas muy pequeños que generen aberración cromática.

Tabla 3.2: Clasificación de los desplazamientos azimutales del disco solar.

Estaciones	Horario	Segmento	$\Delta\alpha_s$	$\Delta\gamma_s$	θ_{in}
Primavera - Verano	09:00 - 11:00	a	39.0°	42.3°	21.15°
	11:00 - 12:30	b	33.5°	57.5°	28.75°
	12:30 - 13:00	c	24.4°	63.4°	31.7°
	13:00 - 13:30	d	26.8°	74.9°	37.45°
	13:30 - 14:30	e	25.2°	75.2°	37.6°
	14:30 - 15:00	f	22.1°	66.2°	33.1°
	15:00 - 18:00	g	43.1°	58.0°	29.0°
Otoño - Invierno	09:00 - 12:00	h	40.7°	42.7°	21.35°
	12:00 - 14:00	i	35.6°	47.2°	23.6°
	14:00 - 16:00	j	32.8°	53.1°	26.55°
	16:00 - 18:00	k	44.0°	52.3°	26.15°

- Longitud focal: $f = 50cm$.

Ya con los parámetros de diseño definidos, se procederá a diseñar el perfil del lente de Fresnel anidólico.

Cabe mencionar que la selección del PMMA como material para el lente y el domo se tomo considerando sus características como índice de refracción, transmitividad del material, coeficiente de expansión térmico, potencia de refracción, así como su resistencia, durabilidad, poco peso y bajo coste[?].

3.2.2.1. Proceso de diseño del lente de Fresnel anidólico

Como se mencionó con anterioridad, el método para diseñar lentes de Fresnel se basa en lo reportado por Leutz et al.[9, 13], pero es necesario adaptarlo a las herramientas que se tienen disponibles para su diseño, por ello se explica a continuación el proceso de diseño de los lentes de Fresnel anidólicos, ya que el desarrollo de un programa tipo consola en lenguaje C++ fue una de las aportaciones que se realizaron con el presente trabajo de investigación.

Además de los pasos reportados por Leutz et al., se implementó el procedimiento de utilizar el círculo de mínima confusión como el área de recepción final de nuestro sistema de colección. Por ello, se describe a continuación el algoritmo de diseño de lentes de Fresnel anidólicos que fue implementado en lenguaje C++ bajo el paradigma de la programación orientada a objetos:

1. Se introducen los parámetros de entrada y se asignan a las variables: θ_{in} , f , $num_{prismas}$ (número de prismas), ω .

2. Se calcula el índice de refracción de cada uno de los rayos marginales (n_s y n_h) acorde a la fórmula de Cauchy (Ec. 2.23) y usando los extremos del rango espectral a utilizar (λ_s y λ_h):

$$n_s(\lambda_s = 750) = 1.4866nm \quad (3.9)$$

$$n_h(\lambda_h = 390) = 1.5081nm \quad (3.10)$$

3. Se diseña el primer prisma como un disco plano de grosor despreciable, cuyo ancho (Δx) se calcula como:

$$\Delta x = f \times \tan \omega \quad (3.11)$$

4. Se definen las coordenadas del primer prisma como: $A = (0, f)$, $B = (\Delta x, f)$, $C = A$.
5. Se almacena la información del primer prisma en un arreglo.
6. Para cada prisma, del segundo al ' $num_{prismas}$ ' (Fig. 2.20):

- a) Se asigna el valor de la coordenada B del prisma anterior a la coordenada A del prisma actual.
- b) Si no se tiene valor previo de α , se le asigna el valor de -1° .
- c) Si ya se tiene un valor previo, se mantiene para la presente iteración.
- d) Hacer:

- Se resuelve un ángulo β_+ considerando el valor de α , el valor positivo de θ_{in} y el n_h
- Se resuelve un ángulo β_- considerando el valor de α , el valor negativo de θ_{in} y el n_s
- Se toma el valor de α del prisma anterior y se le denomina α_0 .
- Se toma la diferencia de los ángulos β del prisma anterior, tal que:

$$\Delta\beta_0 = |\beta_{0+} - \beta_{0-}| \quad (3.12)$$

- Se calculan las variables a y b del método de Newton [9] tal que:

$$a = (\Delta\beta_0 - \Delta\beta)/(\alpha_0 - \alpha); \quad (3.13)$$

donde $\Delta\beta = |\beta_+ - \beta_-|$, considerando los valores de β_+ y β_- del prisma actual.

$$b = \Delta\beta - \alpha \cdot a; \quad (3.14)$$

- Con los valores de a y b se calcula el nuevo valor de α :

$$\alpha = \frac{-b}{a} \quad (3.15)$$

e) Mientras:

$$|\beta_+ - \beta_-| \geq \Delta E \quad (3.16)$$

f) Se obtienen, utilizando relaciones geométricas, las coordenadas de los puntos B y C del prisma.

g) Se almacena la información del prisma en el arreglo del paso 5.

7. Finaliza el diseño individual del prisma.

8. Se declara un arreglo unidimensional que almacenará los puntos que conformarán el perfil del lente de Fresnel anidólico.

9. Para cada prisma, del primero al ‘n’:

a) Se asigna al perfil del lente el punto C del prisma.

b) Se asigna al perfil del lente el punto B del prisma.

10. Finaliza la creación de la parte exterior del perfil del lente.

11. Para cada prisma, del ‘n-1’ al 1:

a) Se asigna al perfil del lente al punto A del prisma.

12. Finaliza la creación del perfil del lente.

13. Se imprime en un archivo con extensión *src* la palabra “PLINE”, seguido de los puntos que integran el perfil del lente.

14. Se imprimen en un archivo con extensión *tab* los puntos que integran el perfil del lente.

15. Fin.

Analizando el algoritmo anterior se observa la implementación del CLC para el diseño de lentes de Fresnel anidólicos, tal como lo sugieren Zhuang et al. en su investigación[62]. Además, se debe considerar que el perfil del lente que se genera con el algoritmo mostrado, corresponde únicamente a la mitad del lente de Fresnel, el cual es simétrico en su eje óptico.

Con el algoritmo anterior se obtendrán como resultado 2 archivos:

- **Archivo SRC - Script de AutoCad®.** Es un archivo que contiene las coordenadas de cada punto que integra el perfil del lente, el cual es ejecutado en AutoCad® para permitirnos observar el perfil del lente. En caso de requerirse, se puede guardar el diseño generado en AutoCad® para ser usado en algún otro software de diseño que nos permita generar el sólido de revolución o el extruido. Un ejemplo de un lente anidólico tipo domo se muestra en la Fig. 3.4.
- **Archivo TOB - Objeto tabulado de Zemax®.** Es un archivo que contiene las coordenadas que Zemax® interpretará para generar el lente de Fresnel anidólico como un sólido de revolución para simulaciones.

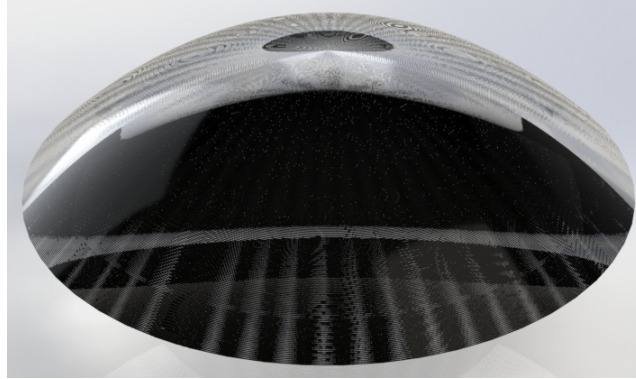


Figura 3.4: Ejemplo de lente de Fresnel anidólico tipo domo cuyo perfil fue diseñado por el software descrito anteriormente (Ver subsección 3.2.2.1) y cuyo perfil se exportó a SolidWorks® para generarlo como sólido de revolución hecho de PMMA y recibiendo iluminación de la parte superior.

3.2.2.2. Lente de Fresnel anidólico usado como base para el domo segmentado

Gracias a la utilización del software mencionado previamente, es posible diseñar las bases que integrarán el lente de Fresnel base. El lente diseñado para la construcción del domo segmentado se observa en la Fig. 3.5.



Figura 3.5: Lente de Fresnel anidólico generado como objeto tabular de Zemax® con los parámetros de diseño mostrados previamente.

3.2.3. Alineación de segmentos e integración del domo

Para la alineación de cada uno de los lentes de Frensel, su eje óptico se alineará al punto medio de los valores extremos de α_s y γ_s de cada periodo de tiempo mostrado en las Tablas 3.1 y 3.2, el cual es definido por las coordenadas angulares:

$$\bar{\alpha}_s = \frac{\alpha_{smax} + \alpha_{smin}}{2} \quad (3.17)$$

$$\bar{\gamma}_s = \frac{\gamma_{smax} + \gamma_{smin}}{2} \quad (3.18)$$

Para integrar el colector segmentado se tomó como base la estructura de una media esfera de radio f y con centro en p , la cual fue dividida en las 2 secciones principales del domo: primavera-verano y otoño-invierno. Esta división tendrá como consecuencia que el domo deba ser girado 2 veces al año, durante los equinoccios de primavera y de otoño, 180° sobre el eje z , que corresponde al eje óptico del domo. Para la alineación de los segmentos se siguieron los siguientes pasos:

1. Para cada uno de los 7 segmentos de primavera-verano y los 4 de otoño-invierno se deberán calcular los ángulos $\bar{\alpha}_s$ y $\bar{\gamma}_s$ acorde a las ecuaciones 3.17 y 3.18.
2. A los ángulos $\bar{\gamma}_s$ de la sección de otoño-invierno se le sumarán 180° .
3. Tomando en cuenta las coordenadas esféricas: $\bar{\alpha}_s$, $\bar{\gamma}_s$ y f , se trazarán los vectores de posición de cada segmento, los cuales representan el eje óptico de cada lente. Estos vectores se pueden observar en la Fig. 3.6.
4. Cada lente es alineado acorde a su correspondiente vector de posición.
5. En cada segmento donde se superpongan lentes se hará un corte recto para delimitar el área de cada uno.

En la Fig. 3.6 se observa un dibujo esquemático, visto desde el eje Z del resultado de la delimitación de cada uno de los segmentos.

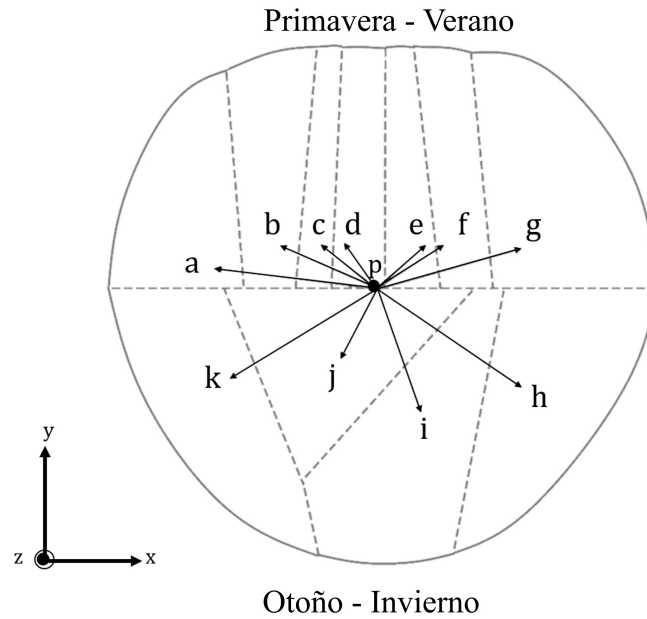


Figura 3.6: Proyección en el plano XY del domo tridimensional para observar la delimitación y alineación de los segmentos. Se observa como todos los vectores de posición tienen un punto de inicio en común p y cada uno de ellos está alineado con respecto a las coordenadas $(f, \bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s)$ para primavera-verano y $(f, \bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s + 180^\circ)$ para otoño invierno.

En la Fig. 3.7 observamos los segmentos resultantes de la alineación y corte de los 11 lentes bases. Los segmentos de primavera-verano responsables de coleccionar la luz del Sol en periodos cercanos al medio día presentan una menor área, resultado de contar con 7 divisiones en verano.

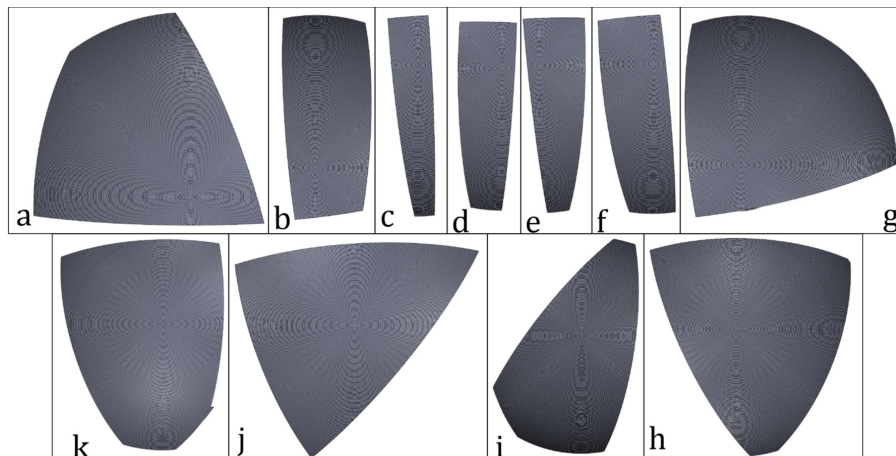


Figura 3.7: Segmentos del colector, donde a, b, c, d, e, f y g corresponden a los 7 lentes segmentados que forman el hemisferio primavera-verano y, h, i, j y k el hemisferio otoño-invierno.

El resultado final de este proceso de diseño es mostrado en la Fig. 3.8, donde observamos una media esfera segmentada con algunos huecos generados por la alineación de los lentes individuales.

El domo resultante es un domo con geometría aproximada a una media esfera y con un radio de 50 *cm*, por lo que, sus prismas varían en tamaños entre 1 y 4 mm dependiendo de su posición en el lente. El tamaño de los prismas permite que se mantenga una transmitancia casi constante para el rango de longitudes de onda del espectro visible, sin generar aberración cromática[9]. La Fig. 3.9 muestra el interior del domo y un acercamiento a los prismas.

El tamaño del domo se consideró de 50 *cm* de radio pensando en su instalación en los techos de las edificaciones y su adaptación con tubos de luz que permitan conducir la luz reflectada a interiores.

Las dimensiones propuestas en esta sección pueden ser escaladas a dimensiones mayores o menores, ya que el método de diseño empleado (y la naturaleza misma de los prismas en forma de triángulo) nos permite trabajar con proporciones y no con medidas absolutas, por lo que no es necesario introducir unidades de longitud hasta que nuestro modelo es llevado a un software de simulación óptica.

Si bien el domo presentado y su método de diseño aún requieren ser perfeccionados, ya muestran resultados satisfactorios que serán presentados en el siguiente capítulo, lo cual servirá como base para la construcción de prototipos a partir del método presentado. Entre las opciones disponibles para construir nuestro domo se encuentra la creación de moldes para inyección de PMMA o acrílico, así como el uso de impresoras 3D de estereolitografía (SLA), la cual utiliza fotopolímeros y resinas fotosensibles para la fabricación de piezas.

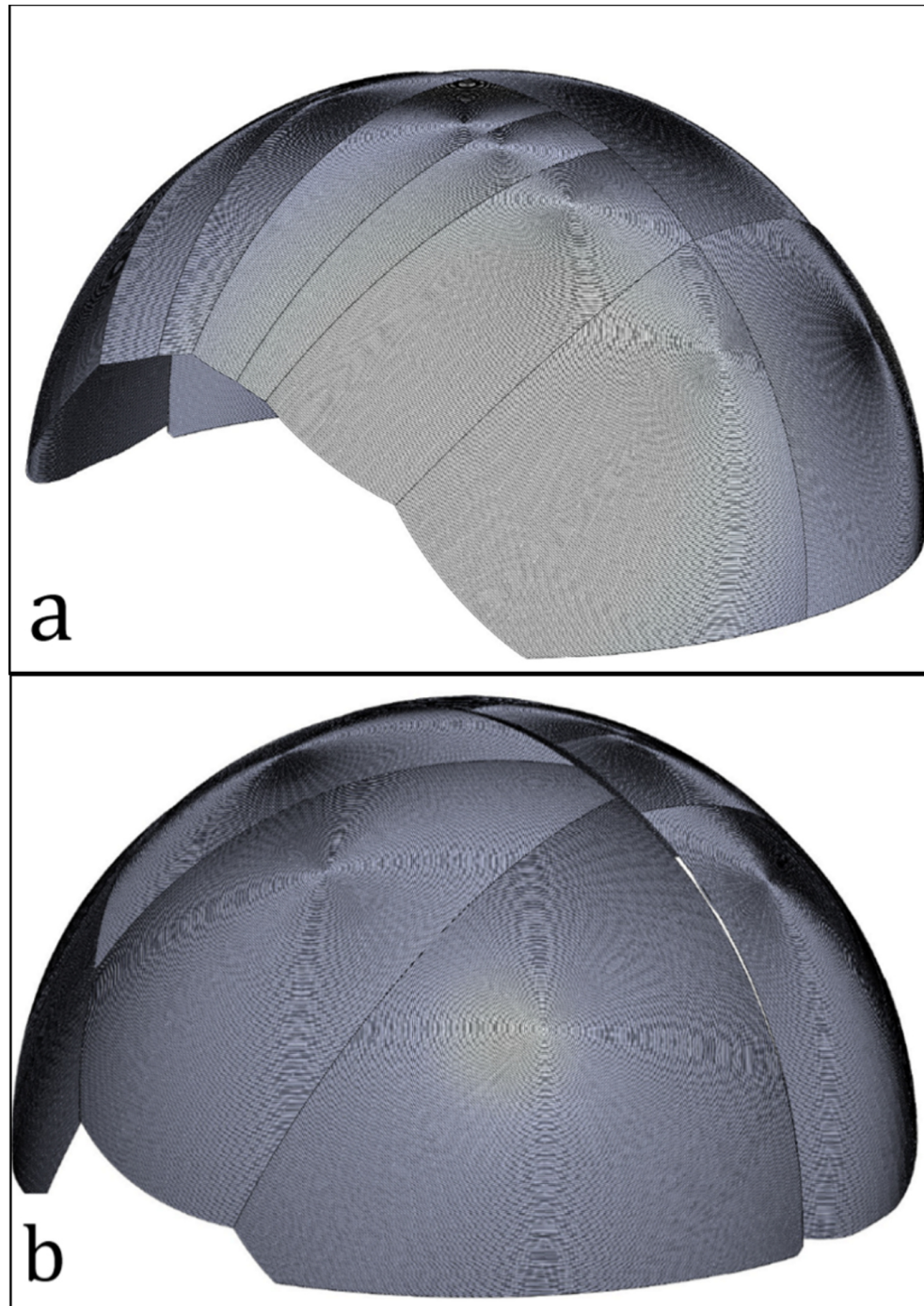


Figura 3.8: Vistas en perspectiva del domo segmentado basado en lentes de Fresnel anidólicas. a) Sección para colección de radiación solar durante el periodo primavera-verano. b) Sección para colección de radiación solar durante el periodo otoño-invierno.

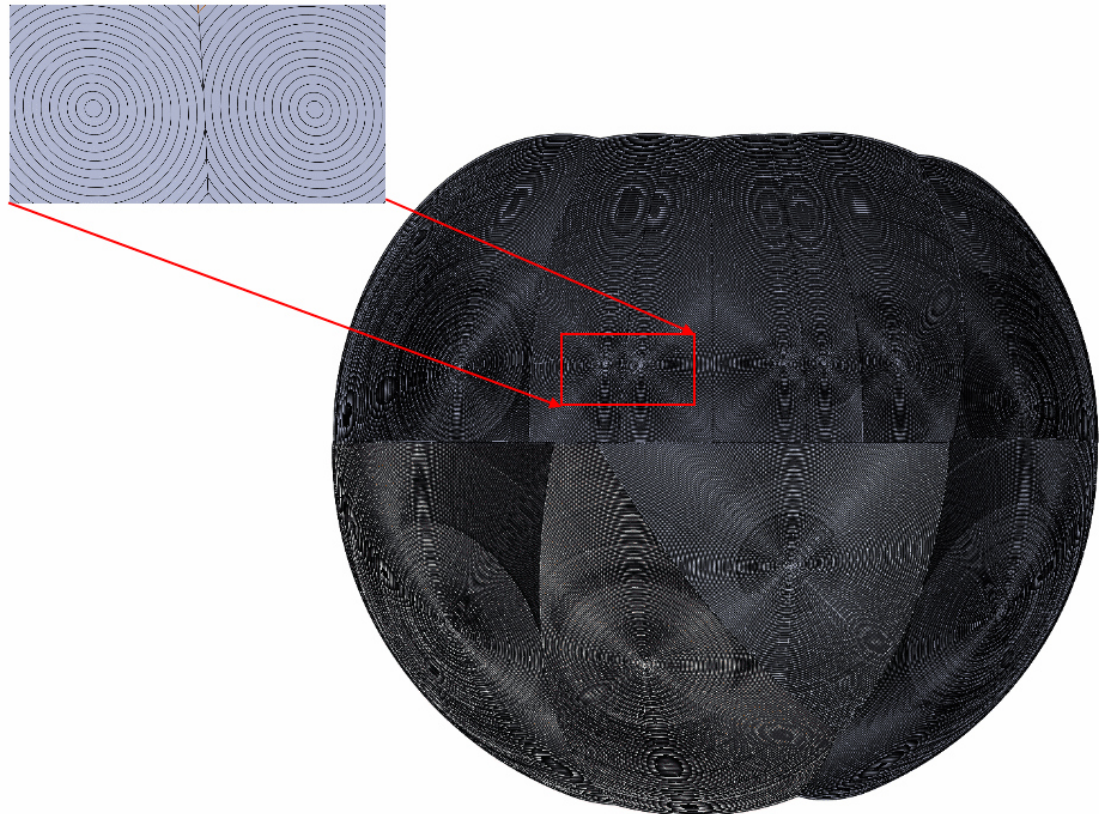


Figura 3.9: Vista del interior del domo desde la parte inferior del mismo. Se incluye un acercamiento al centro de 2 segmentos para observar las líneas que delimitan los prismas de lente.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS

En el capítulo anterior se mostró el diseño de un colector segmentado de luz solar que no requiere de un sistema de seguimiento solar. Acorde a la metodología de diseño usada, este domo semi-estacionario capta la luz los 365 días del año en un horario de 9:00 a 18:00 horas. Este capítulo describe el análisis matemático y las simulaciones ópticas realizadas sobre el colector segmentado. Para ello se utilizaron las relaciones matemáticas vistas en el Capítulo 2 y el software de modelado óptico Zemax®.

Antes de presentar los experimentos numéricos y sus resultados, se explicará brevemente el arreglo experimental que se utilizó para las simulaciones ópticas.

4.1. Simulaciones ópticas

Para analizar la eficiencia de nuestro lente de Fresnel y nuestro domo segmentado se necesitan 3 componentes básicos en el arreglo experimental de la simulación:

- La fuente, la cual debe diseñarse con una geometría y distribución espectral similar al Sol.
- El elemento óptico a evaluar.
- Un detector o conjunto de detectores.

Estos elementos se muestran en la Fig. 4.1 y serán, con excepción de si se requiere integrar algún elemento auxiliar adicional, en la Fig. 4.1 solo variarán las características físicas de la fuente, del detector y el elemento óptico a evaluar. En particular, la fuente que se observa en la Fig. 4.1, presenta un tamaño reducido el cual puede desplazarse para iluminar específicamente cada segmento de la lente ensamblada y caracterizarlos individualmente, con el objetivo de probar que el domo haya sido integrado y ensamblado correctamente. A su vez, la fuente puede ser rotada alrededor del colector para simular el movimiento del sol durante el día. El tamaño de la fuente también puede ser aumentada para cubrir todo el colector solar.

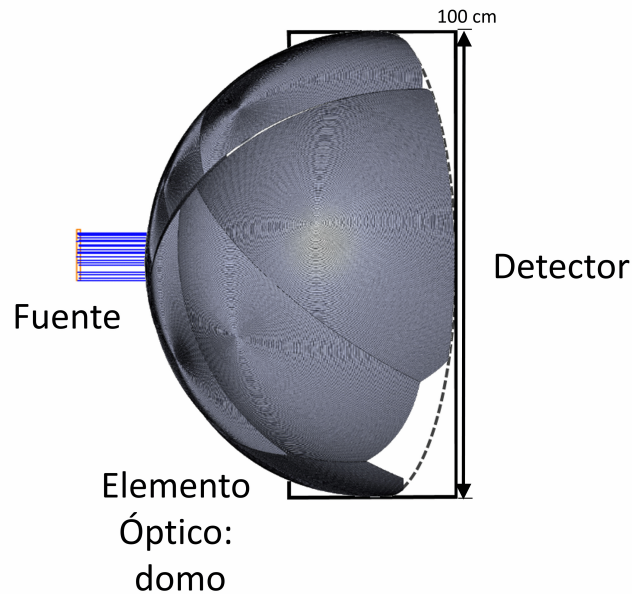


Figura 4.1: Arreglo óptico para simulación en Zemax®. Las líneas azules representan los rayos de luz provenientes de la fuente.

El detector mostrado en la Fig. 4.1¹ es un cuadrado con una apertura circular sobrepuesta que le permite delimitar su área de medición a un círculo de 50 cm de radio (línea punteada). La distancia entre el domo y la fuente se mantuvo constante para todas las simulaciones.

4.1.1. Fuente de radiación óptica

Para probar la eficiencia de nuestro domo se realizaron 2 simulaciones, una que revisara que el diseño y alineación de nuestros segmentos fuera el correcto y otra que evaluaría el funcionamiento del domo completo y su porcentaje de eficiencia respecto a la luz que es colectada. Para la primera clase de simulaciones utilizamos fuentes pequeñas rectangulares y para la segunda utilizamos una fuente radial que cubría en su totalidad el domo.

Dependiendo de la simulación, usamos fuentes de geometría rectangular o radial y, en el caso de las fuentes rectangulares, su semi-ancho en Y y semi-ancho en X, fueron ajustadas para que se convirtieran en un cuadrado.

Una aproximación aceptada para la simulación del Sol es considerarla una fuente en el infinito de rayos con una divergencia de 0.25° , por ende, para nuestras fuentes dejamos la mayoría de los parámetros con los valores por defecto, con excepción de los siguientes:

- Posición en X, Y y Z. Nos permití indicar donde queremos colocar nuestra

¹Se usa una fuente pequeña en la imagen con el objetivo de no saturarla con los rayos provenientes de la misma, pero la fuente real cubre en su totalidad al domo.

fuente.

- Inclinaciones en X, Y y Z. Ayudan a alinear la fuente para simular, con las inclinaciones en X y Y, los ángulos azimutal (γ_s) y de altitud (α_s) del disco solar. La inclinación en Z no se usa, debido a que solo implica el rotar nuestra fuente con respecto al eje óptico, lo cual, por tratarse de fuentes con simetría alrededor del eje Z, no tienen afectación para estas simulaciones.
- Distribución Espectral. Dentro del catálogo de Zemax® se encuentra la distribución espectral de la fuente D65 (Fig. 2.7), la cual se utiliza como estándar para la simulación de la radiación solar.
- Rayos del diseño. Indica nuestros rayos serán dibujados en la ventana que muestra el arreglo óptico. Generalmente se maneja de 100 para observar hacia donde se dirigen los rayos de luz, pero además alcanzar a observar si existen algunos rayos que, por problemas de diseño en los prismas, son reflejados o desviados fuera del área de concentración.
- Rayos de análisis. Es la cantidad de rayos que, para la simulación, saldrán de la fuente desde posiciones aleatorias dentro del área de la fuente y con algunos aleatorios, acorde a las características angulares de la fuente. En nuestro caso se utilizaron 1,000,000 de rayos para las simulaciones.
- Potencia o flujo luminoso. Se decidió estandarizar a 100 Watts o 100 lúmenes para que los resultados de la potencia o flujo luminoso total estén siempre en la misma proporción.
- Mínimo ángulo. Indica que es lo mínimo que deben diverger los rayos de la fuente. Para cuestiones de simular el Sol, se ajusta a 0° .
- Máximo ángulo. Indica que es lo máximo que deben diverger los rayos de la fuente. Para cuestiones de simular el Sol, se ajusta a 0.25° .
- Distancia (fuentes rectangulares). Es la distancia a la que se encuentra la fuente, con lo que se da la divergencia de los rayos. Para este caso utilizaremos el valor de 0, el cual es el equivalente a decir que la fuente está en el infinito.

Cuando se desplaza y alinea la fuente a una nueva posición se coloca de tal forma que la distancia entre la fuente y el detector se mantiene siempre constante.

4.1.2. Elemento óptico

Para insertar nuestros elementos ópticos a la simulación se pueden utilizar dos tipos de objetos:

- Objeto Importado. Son objetos creados en otro software que son agregados a la simulación. En nuestro caso se emplearon archivos tipo IGES (Initial Graphics Exchange Specification), los cuales fueron creados en SolidWorks®.

- Objeto Fresnel radial tabulado. Utilizan archivos tipo TOB para tomar un perfil y generar un lente de Fresnel tipo sólido de revolución.

Para la simulación concerniente al domo segmentado se tuvieron que usar objetos importados ya que Zemax® tiene un número máximo de puntos que pueden tener sus objetos tabulados, lo cual era excedido por el domo.

4.1.3. Detectores

Como se mencionó en el capítulo 2, para el presente trabajo se utilizaron detectores rectangulares los cuales, en su mayoría, fueron utilizados para medir la luminancia en espacio posición, ya que nos permite conocer la cantidad total de flujo luminoso incidente, así como la distribución espacial y la cantidad de $\frac{lm}{Sr}$ que se midió en cada pixel del detector, considerando que cada pixel es una posición específica del detector. En la Fig. 4.2 podemos observar el resultado de medir con un detector rectangular, las diferentes cantidades fotométricas de una fuente que simula ser el Sol, acorde a lo especificado en las secciones anteriores.

4.1.4. Elementos auxiliares

En ocasiones el tamaño de la fuente excede el colector y parte de la luz logra filtrarse directamente al detector sin pasar por el elemento óptico o, también es probable, que nuestra área de colección no corresponda en geometría con el cuadrado o rectángulo que usamos como detector. Para estos casos, implementamos el uso de objetos llamados *Annulus*, los cuales son unos anillos que, configurados con material *ABSORB*, nos permiten bloquear esos rayos para que así no afecten nuestras mediciones.

Además, en los casos donde la luz de la fuente no pasa por el colector, no basta sólo con bloquear el flujo de esos rayos hacia el detector, también es necesario medir cual es nuestro flujo luminoso que está llegando al colector solar, para así establecer un valor correcto del flujo luminoso de entrada Φ_{in} . Una posible solución a este punto, consiste en agregar un detector de superficie que se adapta a la geometría esférica, esférica y plana.

4.1.5. Cálculo de la eficiencia

En general, para todas las simulaciones presentadas, definimos la eficiencia óptica del elemento óptico como:

$$\eta = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} \quad (4.1)$$

donde η_0 representa la eficiencia óptica que es medida en %, Φ_{in} es flujo luminoso que incide sobre el domo y Φ_{out} es el flujo luminoso que llega al detector; los dos últimos medidos en lúmenes.

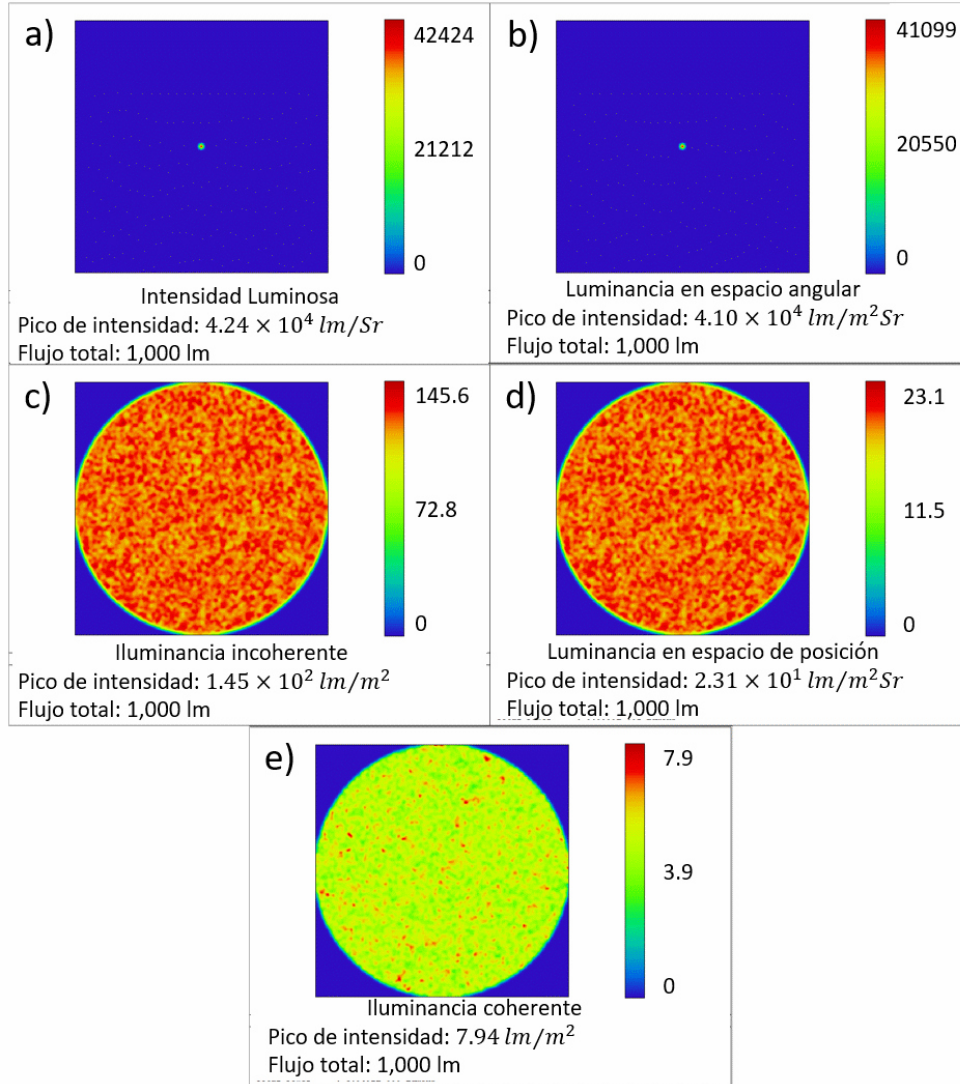


Figura 4.2: Resultados de detectar la radiación proveniente de una fuente que simula ser el Sol. a) Intensidad luminosa. b) Luminancia en espacio angular. c) Iluminancia incoherente. d) Luminancia en espacio de posición. e) Iluminancia coherente.

En el caso de que el resultado de una simulación represente solo una parte de la eficiencia total, la eficiencia óptica se calcula como:

$$\eta_T = \sum_{i=1}^m \frac{\Phi_{i_{out}}}{\Phi_{i_{in}}} \quad (4.2)$$

donde m es la cantidad total de eficiencias medidas para un momento específico y $\Phi_{i_{out}}$ y $\Phi_{i_{in}}$, los flujos luminosos de cada simulación. Por lo que, la eficiencia promedio de un sistema, se calcula como:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_T}{m} \quad (4.3)$$

4.2. Análisis de la eficiencia del domo segmentado

Para analizar la eficiencia del colector segmentado y definir su área de colección, fue necesario realizar 2 tipos de simulaciones ópticas usando el software Zemax®:

- *Simulaciones individuales.* Se realizaron mediciones para días y horas específicas para analizar eficiencias y manchas focales de cada segmento del colector.
- *Simulación anual.* La cual consiste en simulaciones sumativas sobre el domo, que nos permite estimar la eficiencia promedio del domo durante el año.
- *Comparativa.* Se realizaron simulaciones, utilizando el arreglo experimental de la simulación anual, colocando un lente de Fresnel anidólico con $\theta_{in} = \pm 30^\circ$ y un lente de Fresnel de imagen, los cuales poseen las mismas áreas y distancias focales que el domo segmentado.

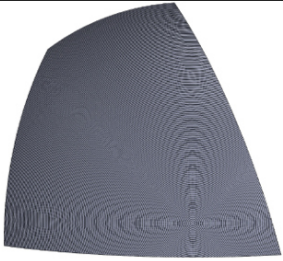

4.2.1. Análisis de segmentos





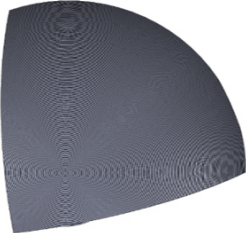
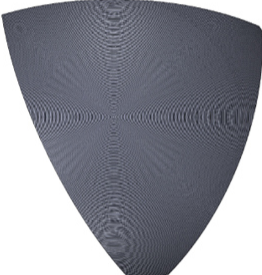
El primer paso para saber si nuestro domo segmentado semi-estacionario funcionará o no es revisar que los segmentos estén colectando correctamente y estén correctamente alineados, así que realizaremos un análisis del funcionamiento de los segmentos.


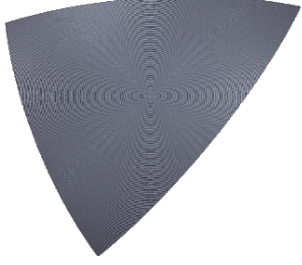
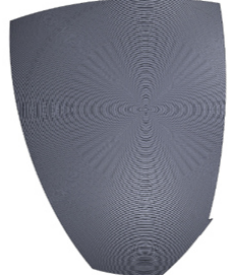
4.2.1.1. Mapeo de rangos angulares de los segmentos del domo

En la Tabla 4.1 podemos observar cada uno de los segmentos del domo semi-estacionario con su correspondiente posicionamiento angular $(\bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s)$ y con los valores máximos y mínimos de ángulos de altitud y azimuth que podrán ser captados en dicho segmento.

Tabla 4.1: Segmentos del domo semi-estacionario. [27, 30, 29]

Seg.	Imagen	$(\bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s)$	α_{smin}	α_{smax}	γ_{smin}	α_{smax}
a		$(34.1^\circ, 96.45^\circ)$	4.1°	64.1°	66.45°	126.45°
b		$(57.05^\circ, 113.35^\circ)$	27.05°	87.05°	83.35°	143.35°

Seg.	Imagen	$(\bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s)$	α_{smin}	α_{smax}	γ_{smin}	α_{smax}
c		$(68.2^\circ, 125.6^\circ)$	38.2°	98.2°	95.6°	155.6°
d		$(73.0^\circ, 138.25^\circ)$	43.0°	103.0°	108.25°	168.25°
e		$(73.1^\circ, 222.8^\circ)$	43.1°	103.7°	192.8°	252.8°
f		$(68.45^\circ, 233.6^\circ)$	38.45°	98.45°	203.6°	263.6°
g		$(44.55^\circ, 253.6^\circ)$	14.55°	74.55°	223.6°	283.6°
h		$(25.75^\circ, 117.85^\circ)$	0°	55.75°	87.85°	147.85°

Seg.	Imagen	$(\bar{\alpha}_s, \bar{\gamma}_s)$	α_{smin}	α_{smax}	γ_{smin}	α_{smax}
i		$(44.8^\circ, 138.1^\circ)$	14.8°	74.8°	108.1°	168.1°
j		$(50.2^\circ, 208.25^\circ)$	20.2°	80.2°	178.25°	238.25°
k		$(31.2^\circ, 235.65^\circ)$	1.2°	61.2°	205.65°	265.65°

Analizando los datos de la Tabla 4.1, podemos observar que existen algunos rangos de γ_s que no se contemplan dentro de los aceptados, pero se espera que los segmentos contiguos permitan que la radiación con estos desplazamientos sea aceptada.

4.2.1.2. Simulaciones individuales

Para estas simulaciones se parte de la premisa de que si logramos incidir radiación óptica dentro del área de colección para los valores extremos de alineación de la fuente (solsticios), el resto de las alineaciones de la fuente caerán dentro del área esperada. Por ello, se planteo realizar las simulaciones acorde a las posiciones del disco solar de los solsticios de verano e invierno, por ser el día más largo y el día más corto del año, respectivamente. Además, para corroborar nuestro supuesto, se simularon los desplazamientos solares de los equinoccios, que son los dos días del año donde el día y la noche tienen la misma duración, por lo que el desplazamiento aparente del disco solar es similar.

Este tipo de simulaciones utilizaron una fuente de 10 cm de radio de rayos paralelos colocada a una distancia constante $2f$. Para medir el flujo incidente utilizamos un detector de 100 cm de longitud, considerando que la colección de luz solar debe darse dentro del círculo de 50 cm de radio circunscrito al detector (Fig. 4.1). Para

cada una de las simulaciones colocamos nuestro arreglo como se muestra en la Fig. 4.1 y transformamos las coordenadas esféricas de la alineación del disco solar a coordenadas cartesianas para colocar la fuente en el lugar correcto y, a la vez, la rotamos para que tenga la dirección correspondiente. El tamaño de la fuente fue seleccionado para evitar que la luz alcance otros segmentos del colector diferentes a los designados para la posición del Sol de la simulación correspondiente.

Los resultados de dichas simulaciones se observan en las Fig. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 donde observamos la luminancia en espacio de posiciones a las 09:00, 12:00, 13:00, 15:00 y 18:00 horas durante los equinoccios de primavera y otoño y los solsticios de verano e invierno. La eficiencia en cada caso es medida acorde a la Ec. 4.1.

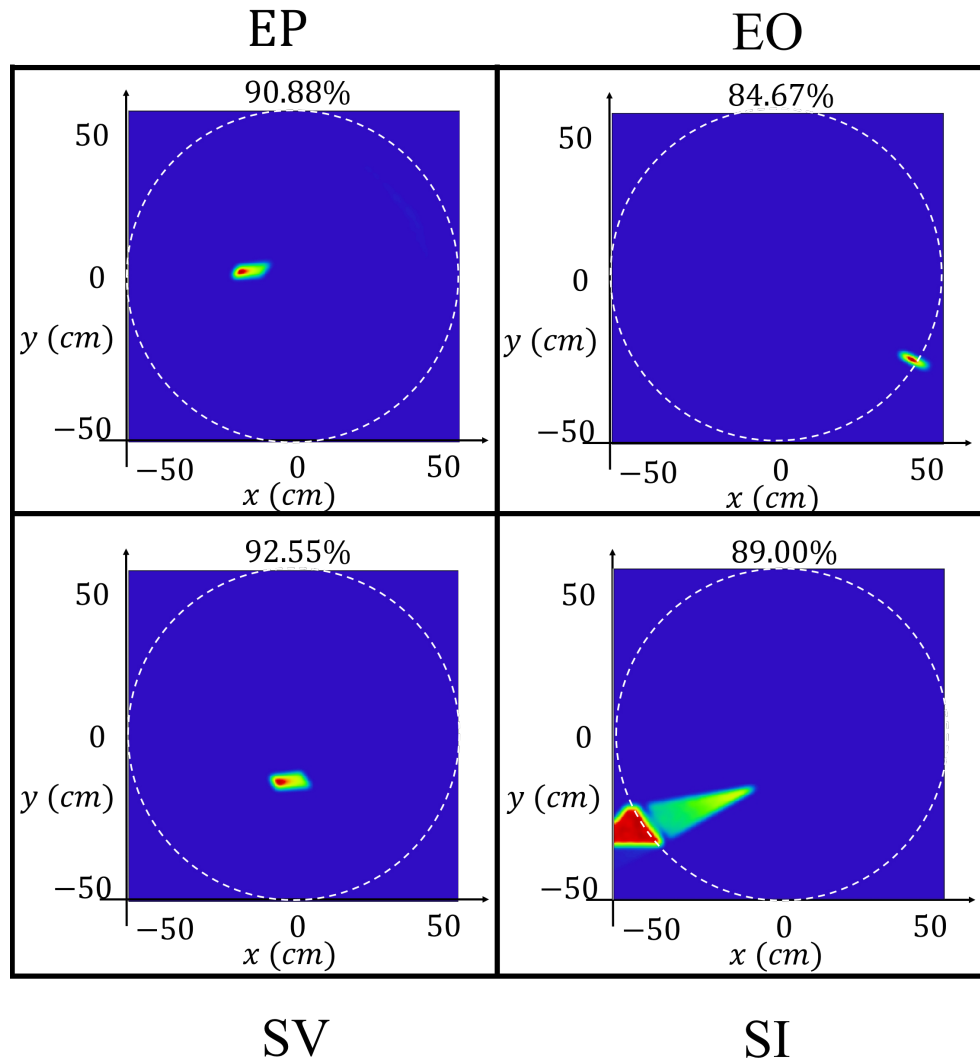


Figura 4.3: Simulaciones diarias - 9:00 horas. La eficiencia es indicada para cada caso, siendo EP el equinoccio de primavera, EO el de otoño, SV el solsticio de verano y SI, el de invierno. El color rojo, indica mayor concentración de luz en esa área y el azul, corresponde a 0 lúmenes. La línea blanca punteada representa el área de colección final esperada.

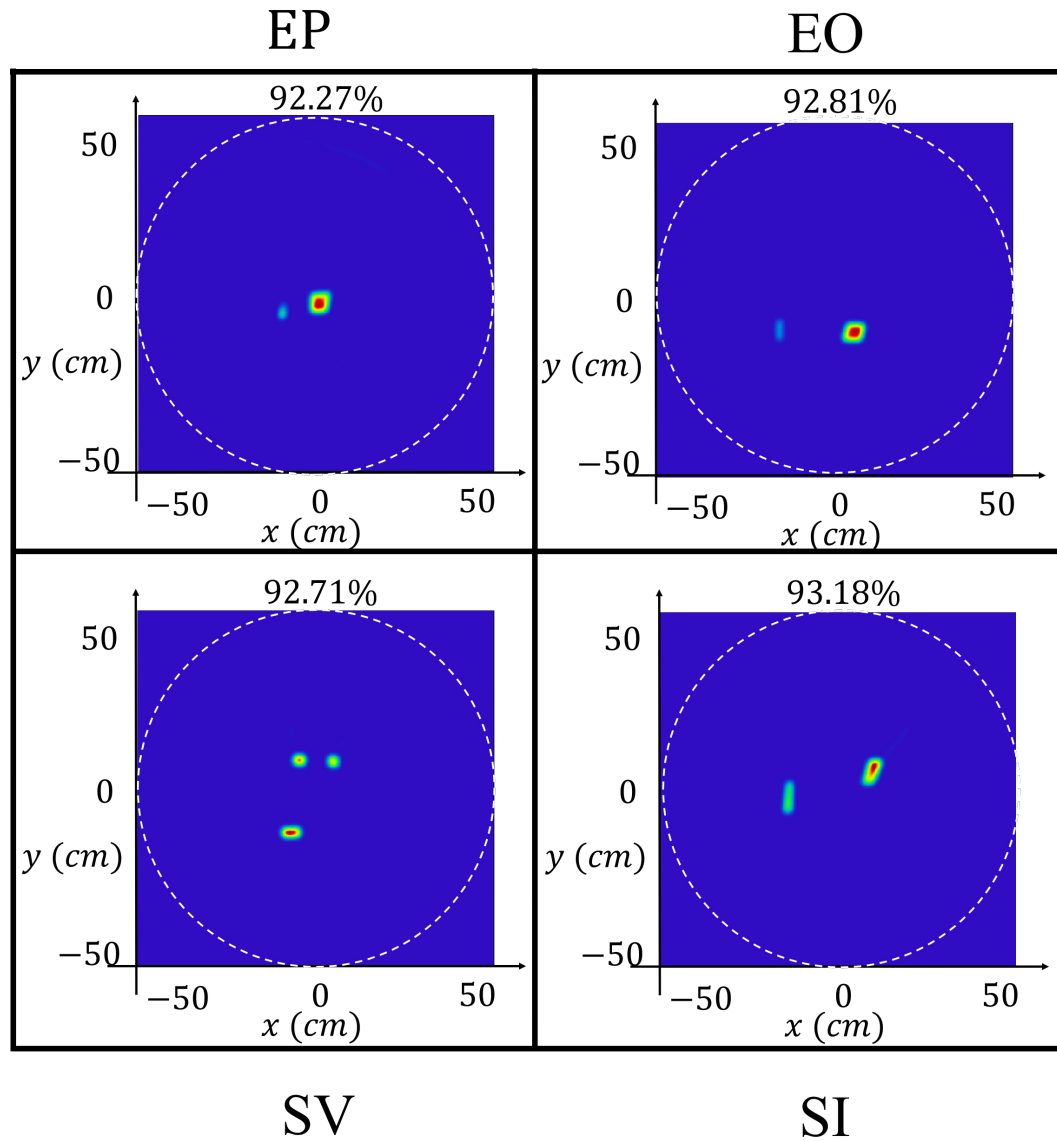


Figura 4.4: Simulaciones diarias - 12:00 horas. La eficiencia es indicada para cada caso, siendo EP el equinoccio de primavera, EO el de otoño, SV el solsticio de verano y SI, el de invierno. El color rojo, indica mayor concentración de luz en esa área y el azul, corresponde a 0 lúmenes. La línea blanca punteada representa el área de colección final esperada.

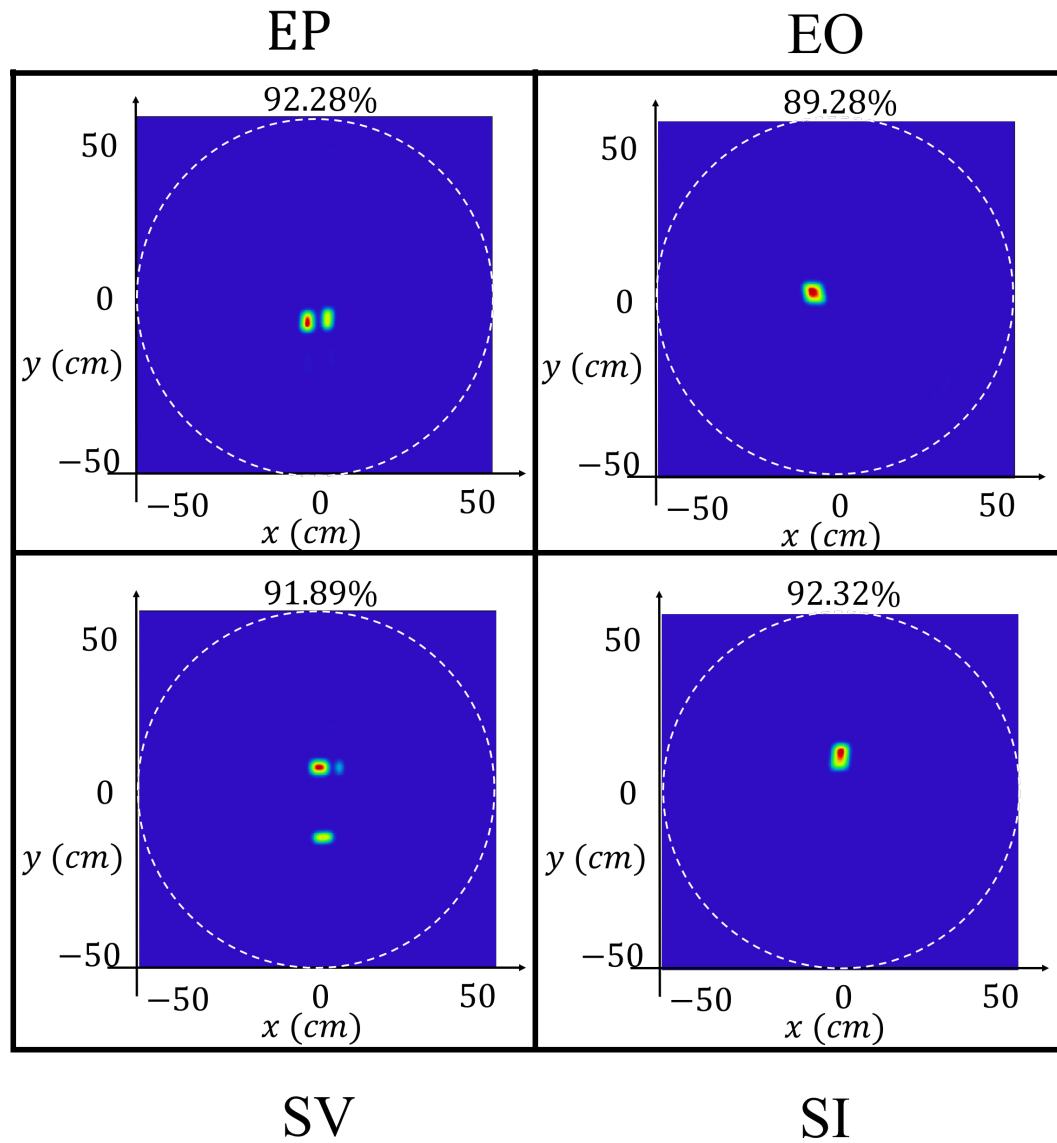


Figura 4.5: Simulaciones diarias - 13:00 horas. La eficiencia es indicada para cada caso, siendo EP el equinoccio de primavera, EO el de otoño, SV el solsticio de verano y SI, el de invierno. El color rojo, indica mayor concentración de luz en esa área y el azul, corresponde a 0 lúmenes. La línea blanca punteada representa el área de colección final esperada.

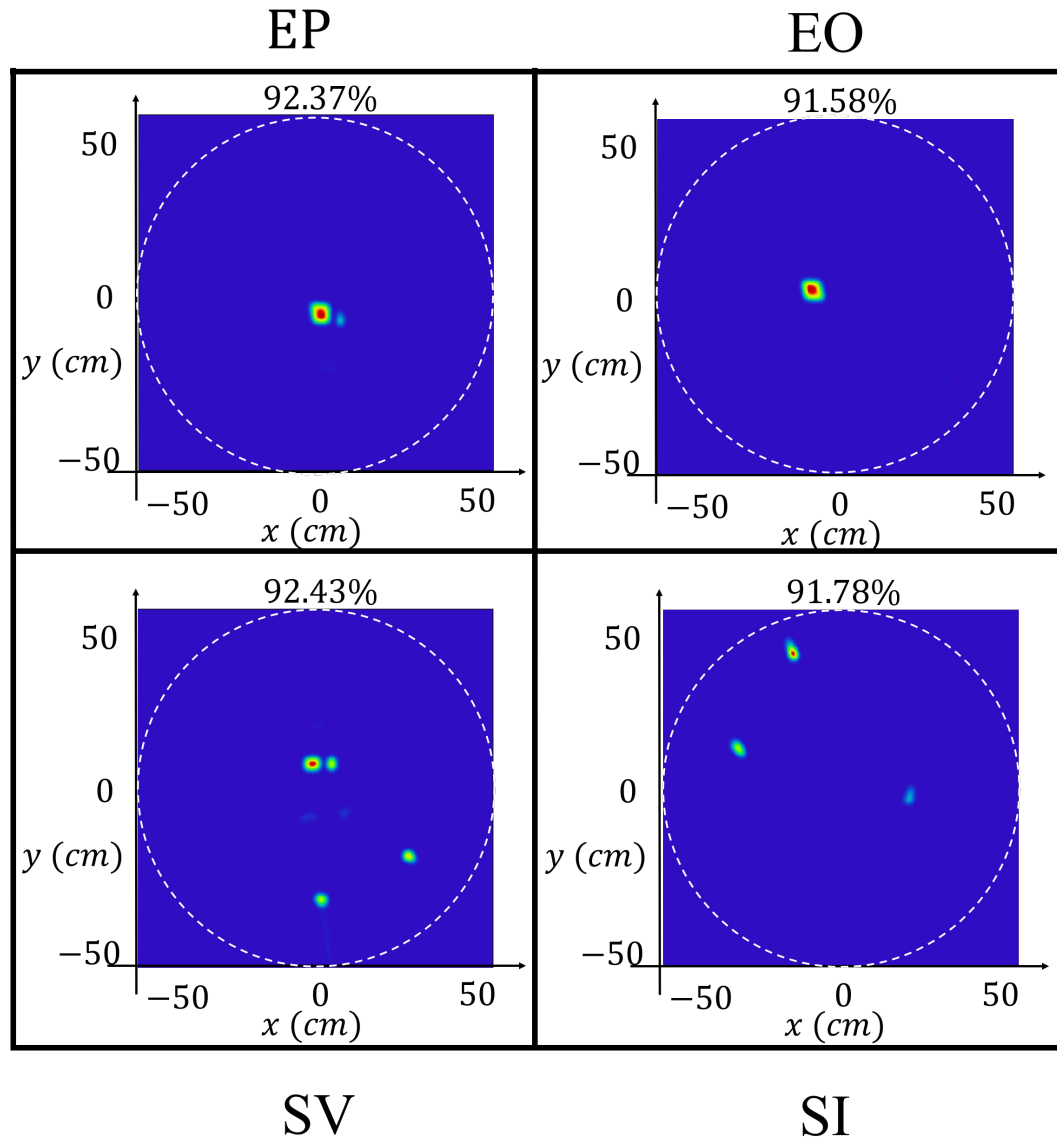


Figura 4.6: Simulaciones diarias - 15:00 horas. La eficiencia es indicada para cada caso, siendo EP el equinoccio de primavera, EO el de otoño, SV el solsticio de verano y SI, el de invierno. El color rojo, indica mayor concentración de luz en esa área y el azul, corresponde a 0 lúmenes. La línea blanca punteada representa el área de colección final esperada.

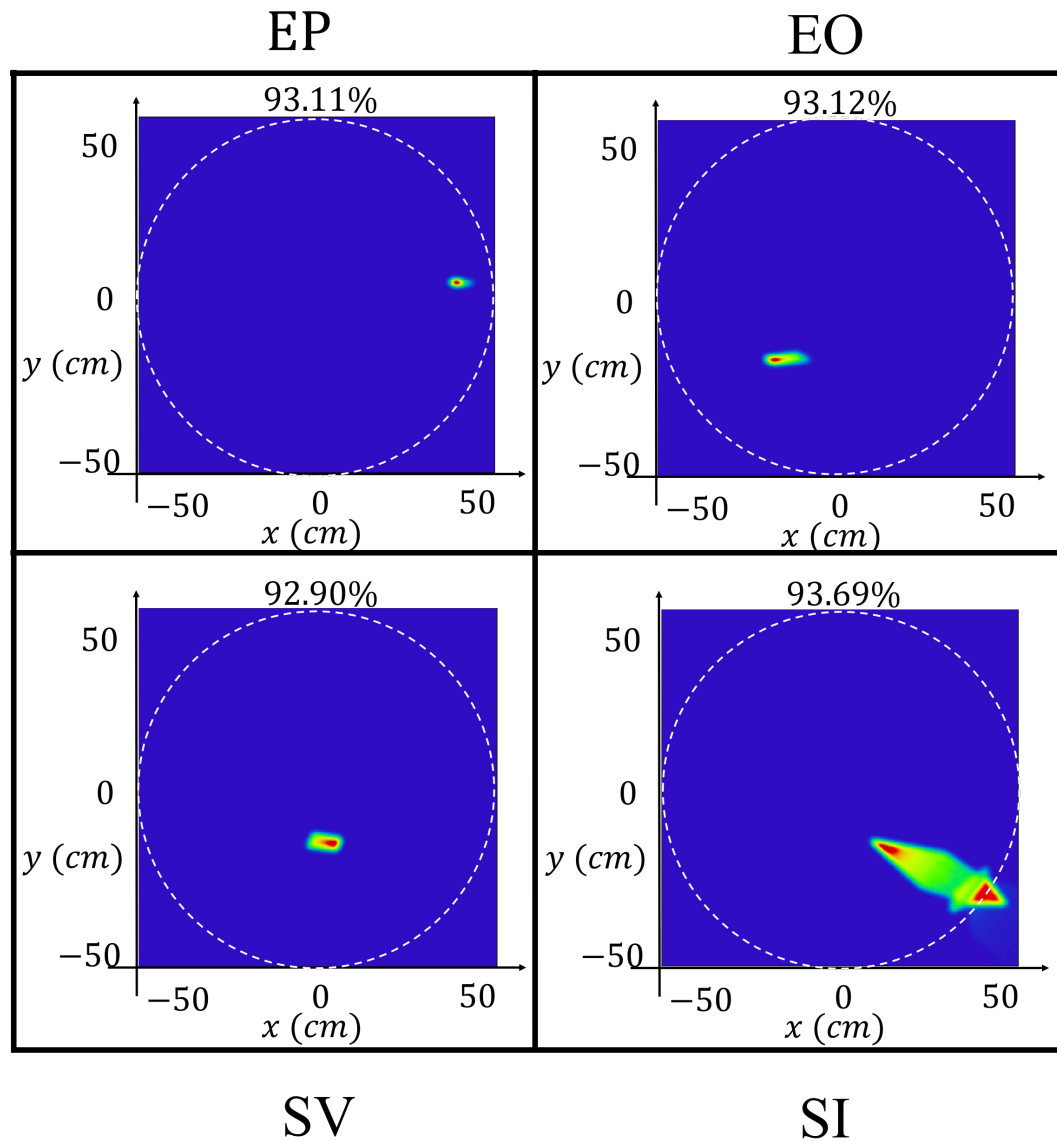


Figura 4.7: Simulaciones diarias - 18:00 horas. La eficiencia es indicada para cada caso, siendo EP el equinoccio de primavera, EO el de otoño, SV el solsticio de verano y SI, el de invierno. El color rojo, indica mayor concentración de luz en esa área y el azul, corresponde a 0 lúmenes. La línea blanca punteada representa el área de colección final esperada.

Analizando las figuras se observa que, en casi todos los casos ilustrados, la eficiencia se mantuvo alrededor del 90 %, lo cual nos indica que los segmentos están concentrando la luz solar dentro del área seleccionada. En el caso específico del solsticio de invierno, se observan aberraciones en la forma del foco, así como una disminución de la eficiencia.

4.2.2. Simulación integral

En esta simulación utilizamos una fuente radial grande de 50cm de radio, cuya geometría permite simular estar colocada en el infinito y mantener la divergencia de 0.25° de sus rayos. Además, la distancia entre la fuente y el centro del detector se mantuvo constante, con un valor de $l + f$, donde $f = 50\text{ cm}$, por ser la distancia focal, y l es la distancia entre la fuente y el domo, tal que $l = f$.

El flujo incidente fue medido con el mismo detector que en las simulaciones individuales, con la diferencia de que después de cada simulación las nuevas manchas focales son sumadas a las ya existentes, teniendo como resultado una medición sumativa del flujo que llega al detector, por ello, para calcular la eficiencia promedio total se utilizó la Ec. 4.3.

Para obtener la eficiencia promedio correcta, se utilizó un detector de superficie esférico, configurado para dejar pasar toda la radiación óptica incidente en él, lo que nos permitió medir el Φ_{in} que entra al colector en cada simulación y, el detector usado en las simulaciones individuales, fue reutilizado para esta simulación, considerando que se utilizó un objeto tipo anillo para obstruir todo aquel flujo que no proviniera del domo.

La frecuencia de la simulación corresponde a mediciones 5 veces al día, a los horarios correspondientes en las simulaciones individuales, con una frecuencia de cada 5 días².

El resultado de la simulación anual se muestran en la Fig. 4.8, donde la gráfica izquierda muestra el área final de colección a lo largo del año, lo que corresponde con el área esperada, gracias a la colocación del elemento tipo anillo. Además, la eficiencia promedio, $\bar{\eta}$, fue calculada alrededor de un 65%. En la misma imagen podemos observar, en la gráfica derecha, la distribución angular, conociendo así la inclinación angular de los rayos que llegan a nuestro detector.

4.2.3. Comparativa

Adicionalmente, utilizando el arreglo óptico de la simulación anual, se calculó la eficiencia óptica del domo segmentado a lo largo de los equinoccios y los solsticios, así como de un lente de Fresnel anidólico como el que compone los segmentos individuales y un lente de Fresnel de imagen distancia focal de 50 cm . Dichos elementos ópticos fueron posicionados siempre a la misma distancia de la fuente y a 50 cm del detector, como se observa en la Fig.4.9. Para asegurar que se tienen las mismas condiciones para la simulación, las superficies de colección, así como las distancias focales de los 3 elementos ópticos son las mismas y el lente de Fresnel anidólico se diseñó con un $\theta_{in} = \pm 30^\circ$.

²La limitación en la periodicidad de las simulaciones se realizó de la manera descrita ya que, por la complejidad del diseño del domo segmentado, cada simulación individual (para un día y hora específico) demoró alrededor de una hora, lo que representa más de 120 horas de computo continuo.

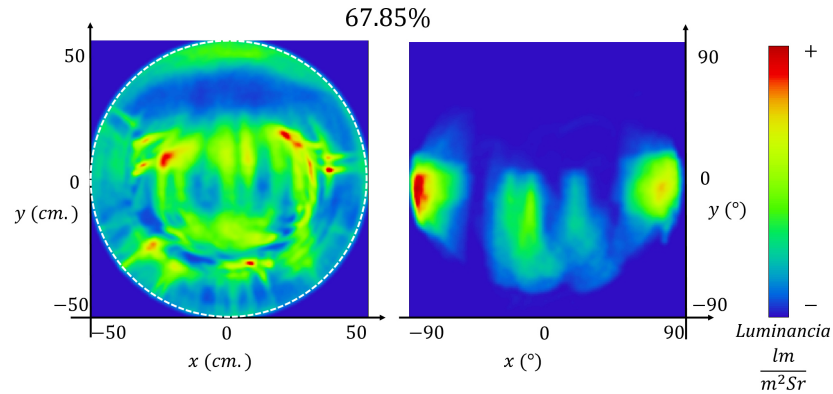


Figura 4.8: Simulación anual. Luminancia en espacio de posición (izquierda) y espacio angular (derecha). El área focal muestra una gran concentración en el centro; y la distribución angular tiene dos “spots” (manchas) cercanas a las coordenadas angulares ($\pm 90^\circ$, 0°). La eficiencia promedio, $\bar{\eta}$, es mostrada en la parte superior de la figura.

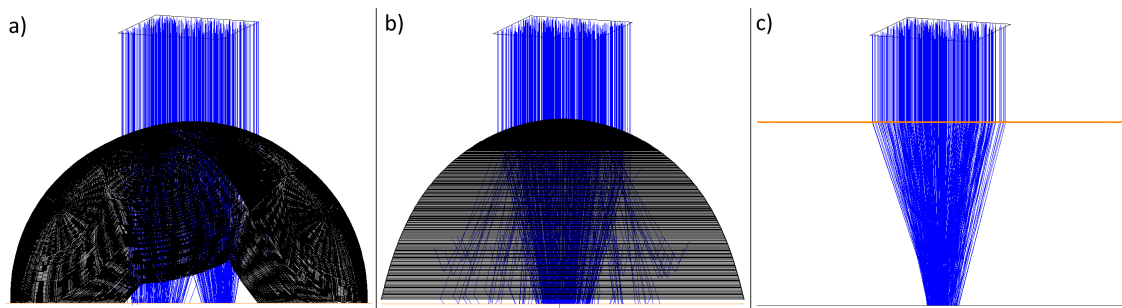


Figura 4.9: Sistemas ópticos empleados para la comparativa entre los distintos tipos de elementos ópticos. a) Domo segmentado. b) Lente anidólico. c) Lente de imagen. La fuente usada en la imagen es solo con fines ilustrativos.

La comparativa de las eficiencias ópticas fue graficada en la Fig. 4.10. Las comparativas entre el domo segmentado y el lente anidólico son equivalentes, por sus similitudes y parámetros de diseño. Por otro lado, la comparación con el lente de imagen no es equivalente, ya que, para adaptaciones con tubos de luz, su posición debería ser la misma que en el detector. Por lo anterior consideramos que la comparativa con el lente de imagen es solo agregada a modo de referencia.

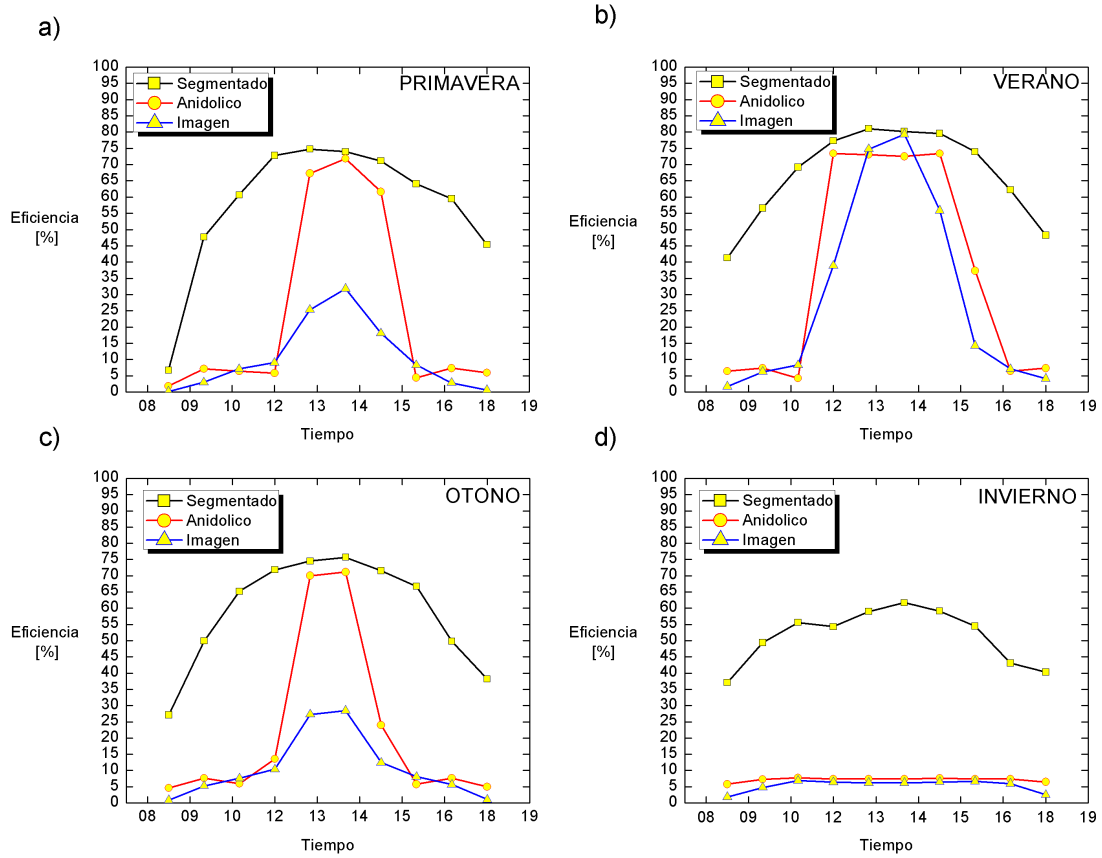


Figura 4.10: Eficiencia óptica de 3 colectores de radiación solar: un lente de Fresnel de imagen (plano), un lente de Fresnel anidólico con geometría de domo y el domo segmentado semi-estacionario.

4.3. Discusión de resultados

A continuación se revisan y discuten los resultados obtenidos de los análisis numéricos realizados sobre los lentes de Fresnel de imagen, anidólico y segmentados. Además, como primer punto, se discuten los resultados del desarrollo de software para diseño de lentes de Fresnel basados en los trabajos de Leutz.

4.3.1. Software de diseño de lentes de Fresnel anidólicos

Si bien los trabajos presentados por Leutz et al.[9, 13, 56] muestran un algoritmo y las ecuaciones para el diseño de lentes de Fresnel anidólicos, el análisis detallado de los caminos ópticos dentro de los prismas mostrado en las figuras 2.18 y 2.19 no se encuentra reportado explícitamente en la literatura, solo encontramos las ecuaciones finales 2.52 - 2.56, por lo que resulta valioso que se reporte de manera explícita el análisis matemático de los caminos ópticos dentro del prisma.

Por otro lado, la ecuación 2.57 no es presentada en los trabajos de Leutz, por lo que tuvo que ser deducida para poder desarrollar el algoritmo de manera exitosa.

Además, la aplicación para el diseño de lentes de Fresnel anidólicas fue desarrollada con base en el paradigma de programación orientada a objetos, lo que les permitió desarrollar rutinas de código para la solución de ecuaciones, álgebra vectorial y otras operaciones de geometría y trigonometría de manera robusta y con el objetivo de poder desarrollar, como parte del trabajo a futuro, una biblioteca de clases y funciones para lenguaje C y C++ que permita el desarrollo de lentes de Fresnel y otros elementos ópticos.

También es importante destacar que, aunque Akizawa y Zhuang ya reportaban la aplicación del círculo de mínima confusión en el diseño de lentes de Fresnel anidólicas[60, 62], este debió adaptarse al software desarrollado.

Aunque el método de diseño de Leutz y la adaptación que se realizó del mismo, permite generar lentes sin unidades de longitud, lo que brinda la posibilidad de escalar nuestros diseños a distintos tamaños, obteniendo eficiencias y factores de concentraciones similares.

Finalmente, la aplicación se desarrolló de manera flexible, para poder obtener como productos finales archivos que pueden ser utilizados fácilmente en software de diseño auxiliado por computadora como AutoCad®, así como para software de modelado óptico como Zemax®, por lo que podrían adaptarse los archivos generados a los formatos y extensiones requeridos por otras aplicaciones similares.

4.3.2. Metodología de diseño de domos semi-estacionarios segmentados

Los lentes de Fresnel de imagen requieren una incidencia normal de la luz incidente mientras que, los lentes de Fresnel anidólicas, tienen un semi-ángulo de aceptación limitado, por lo que se presentó una metodología de diseño de un colector segmentado, donde cada segmento corresponde a un lente de Fresnel anidólico que está alineado para coleccionar la radiación solar durante un periodo de tiempo determinado.

Los domos diseñados bajo este método funcionan como un colector solar, permitiendo que la luz del Sol incidente en un horario de 9:00 a 18:00 horas durante todo el año, incida en un área definida de radio (d) igual a la distancia focal del domo ($d = f$).

La división, alineación y ensamblado de los segmentos no es un problema trivial, ya que depende en gran medida del desplazamiento solar, propio de la zona geográfica para la que se diseña el domo.

El colector puede ser estacionario si se diseña para regiones donde no se tengan grandes variaciones en el desplazamiento del disco solar, como lo son países sobre la línea del ecuador, ya que es probable que el domo resultante pueda estar integrado de un menor número de segmentos. Por otra parte, si es diseñado para regiones como el norte de México, donde existen mayores variaciones del desplazamiento aparente del Sol durante el año, el colector estará integrado por 2 secciones, por lo que se define como un colector semi-estacionario, ya que necesita una rotación de 180° sobre el plano XY en los equinoccios.

4.3.3. Diseño de un domo segmentado semi-estacionario para Ciudad Universitaria

Para corroborar la validez de la metodología de diseño de domos segmentados, fue necesario diseñar un domo y hacer el modelado numérico de su eficiencia, por lo que se decidió estudiar el desplazamiento aparente del disco solar para Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el objetivo de que, como trabajo a futuro, se pueda realizar un prototipo del domo y realizar un análisis experimental de su eficiencia.

El domo segmentado diseñado para CU tiene un semi-ángulo de aceptación combinado $\theta_{in} \approx \pm 105^\circ$ y su área de colección es igual a la que tendría un lente de Fresnel anidólico con $\theta_{in} = 45^\circ$ y la misma distancia focal, como se puede ver debido a la relación entre el radio, la distancia focal y θ_{in} : $d = f \times \tan \theta_{in} = f \times \tan 45^\circ = f$ [9].

El diseño final que se muestra en la Fig. 3.8 presenta pequeñas áreas vacías formadas debido a la complejidad de la alineación del lente en tres dimensiones, teniendo como resultado que las partes de lentes adyacentes se superpongan solo en el plano XY, esto hace que una pequeña porción de la luz pueda alcanzar el detector sin pasar por el colector. Debido al hecho de que para cada segmento se utilizaron lentes de Fresnel idénticos, cuyo radio final, medido después de su diseño, fue de 35 cm, el domo se ve como una semiesfera “incompleta”. Una forma de superar este problema de diseño es usar un lente de Fresnel anidólico con un radio mayor para que los segmentos logren llenar los espacios “vacíos”.

4.3.3.1. Análisis numérico de la eficiencia del domo segmentado

Para la realización de las simulaciones individuales, los solsticios se utilizaron como referencias porque representan los valores límite del desplazamiento del disco solar a lo largo del año; en el caso de los equinoccios, estos fueron considerados por su particular de tener días y noches con la misma duración, por lo que se consideran casos que deben de colocarse dentro del rango de desplazamientos delimitado por los solsticios.

Se considera que los segmentos del colector muestran un buen rendimiento ya que, alcanzar un rendimiento que oscila entre $\sim 90\%$, aunque sea para un área limitada, se considera un buen resultado debido al hecho de que Radiant Zemax® incluye las pérdidas causadas por las reflexiones de Fresnel ($\sim 8\%$).

Tener uno o más puntos focales por simulación diaria, como se puede ver en las figuras 4.3 - 4.7, muestra que para una alineación solar es posible usar más de una sección de colector y esto contribuye a evitar pérdidas.

Además, se observa que, en general, los puntos focales presentan aberraciones producidas para el ángulo de la luz solar y los segmentos de lentes de Fresnel anidólicos, porque si bien cada segmento está diseñado para recoger la luz dentro del área de recolección, su área real de colección esta alineada de manera perpendicular al eje óptico de cada segmento. El resultado de esto nos lleva a tener radiación óptica incidente con ángulos muy variados, por lo que se recomienda la implementación

de algún elemento óptico secundario para las aplicaciones que requieran ángulos de entrada específicos o limitados.

Durante la primavera y el verano, los días son más largos que durante el otoño y el invierno, lo que hace que el desplazamiento angular del Sol sea más lento durante el período de este año. Este efecto se puede observar en las simulaciones individuales para el equinoccio de primavera y el solsticio de verano (Figs. 4.3 - 4.7), donde todos los puntos focales se ubican dentro del área de recolección. Podemos observar que, para el día más corto del año, el solsticio de invierno, las figuras 4.3 y 4.7 muestran el efecto de que el Sol esté cercano al amanecer o al atardecer, por lo que producen aberraciones.

Por otra parte, los equinoccios, que corresponden a los días cuando el colector debe ser rotado, presentan para casi todas las simulaciones puntos focales localizados en el centro del área de colección, lo que corresponde con la trayectoria del disco solar durante esos días. Además, la simulación correspondiente a las 9:00 horas durante el equinoccio de primavera (Fig. 4.3) y la correspondiente a las 18:00 horas del equinoccio de invierno (4.7) muestran comportamientos extremos de la luz llegando a los límites del área de colección, lo cual corresponde con el amanecer y el atardecer respectivamente.

En la Fig. 4.8, se observa la acción combinada de todos los lentes de Fresnel anidólicos en el sistema ensamblado. La eficiencia promedio obtenida con el colector propuesto durante todo el año fue del 67.85 %. De acuerdo con la luminancia acumulada en el espacio de posición que se muestra en el lado izquierdo de la Fig. 4.8, la luz colectada tiende a distribuirse sobre toda el área del detector, mostrando algunos puntos calientes. Sin embargo, si empleamos tubos de luz con diámetros similares al área detector para guiar la luz recolectada dentro de los edificios, se plantea la hipótesis de que estos puntos calientes puedan reducirse después de múltiples reflexiones a lo largo del tubo de luz antes de su extracción, por lo que este estudio debe ser considerado dentro de los trabajos a futuro.

Además, es interesante observar las mediciones de luminancia en el espacio angular que se muestra en el lado derecho de la Fig. 4.8, donde podemos observar algunos puntos formados sobre el eje x. Estos puntos indican que la distribución angular de la luz recolectada está altamente relacionada con la posición del Sol, principalmente al amanecer y al atardecer durante todo el año.

Un punto importante a considerar es que todos los lentes de Fresnel anidólicos empleados para integrar el domo segmentado se diseñaron de tal manera que todo el conjunto permita aumentar la eficiencia óptica. Como resultado, su eficiencia se muestra casi constante a lo largo del día, logrando el objetivo de evitar la dependencia con sistemas de seguimiento solar.

De acuerdo con la Fig. 4.10, la eficiencia óptica del colector segmentado propuesto fue más eficiente desde la mañana hasta la tarde con respecto a colectores solares de lente de Fresnel de imagen plana y de lente de Fresnel anidólico en forma de domo con áreas de incidencia iguales. Estos resultados satisfacen el objetivo de diseño del colector segmentado para aumentar la eficiencia óptica del domo segmentado a lo largo de un día.

De acuerdo a la literatura, los colectores solares que emplean múltiples lentes de Fresnel de imagen planos colocados en un plano horizontal de $1 m^2$ y que utilizan un sistema de seguimiento de un eje, presentan una eficiencia óptica máxima de 56.4% [65], mientras que para los colectores estacionarios segmentados basados en lentes de Fresnel planos de imagen ensamblados en formas piramidales no compactas, la eficiencia óptica se mantiene alrededor del 50% durante un día entero[66]. Pero, en este último caso, se emplearon dos colectores estacionarios segmentados con diferentes caras piramidales, uno de ellos para recolectar luz solar de mayo a agosto, y el otro para recolectar luz de septiembre a abril, respectivamente. En contraste, el domo segmentado basado en lentes de Fresnel anidólicos que se propone en este trabajo puede alcanzar una eficiencia promedio de 67.85% que se midió durante todo el año empleando un colector único y compacto sin utilizar sistemas de seguimiento rotatorios o lineales, mostrando de esta manera la eficacia de uso lentes Fresnel anidólicos en forma combinada para diseñar colectores solares sin mecanismos de seguimiento solar.

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Es bien sabido que las pérdidas por reflexión de Fresnel en las superficies refractivas pueden ser reducidas utilizando prismas con reflexión total interna (RTI) y las aberraciones cromáticas, usando el método del rayo marginal y el círculo de mínima confusión adaptado al método de diseño propuesto por Leutz[9, 61, 62, 68].

Como se mencionó en el algoritmo de diseño presentado en la sección 3.2.2.1, el principio del rayo marginal y el círculo de mínima confusión son aplicados para disminuir dichas pérdidas de la siguiente manera[9, 60]:

1. Determinar las longitudes de onda mayor y menor que se buscan coleccionar, ya que a cada longitud de onda le corresponde un índice de refracción diferente.
2. Asignar la longitud de onda más larga como la correspondiente al rayo marginal que proviene de $+\theta_{in}$ y que llega al borde derecho del receptor.
3. Asignar la longitud de onda más corta como la correspondiente al rayo marginal que proviene de $-\theta_{in}$ y que llega al borde izquierdo del receptor.

Con los pasos mencionados arriba, el método de diseño permite que todas las longitudes de onda consideradas para el diseño puedan ser coleccionadas dentro del área del detector, como se observa en la Fig. 5.1. Para la asignación del valor correcto del índice de refracción se pueden utilizar las ecuaciones vistas en la Tabla 2.2, siendo la presentada por Cauchy (Ec. 2.23) la utilizada en este trabajo.

A continuación se presenta una propuesta para diseñar lentes de Fresnel con prismas de distintos caminos ópticos que permita la optimización de su eficiencia reduciendo pérdidas por transmitancia, para tal efecto se estudian las pérdidas por reflexión de Fresnel y se introduce el diseño de prismas de reflexión total interna.

5.1. Pérdidas por reflexión de Fresnel

La cantidad de luz reflejada en las superficies refractivas depende del ángulo de incidencia de la radiación, así como de su polarización y se calcula con las ecuaciones 2.59 - 2.61[9, 61]. Analizando las ecuaciones de transmitancia final, que consideran las pérdidas por reflexión de Fresnel, se obtiene que la transmitancia final de cada

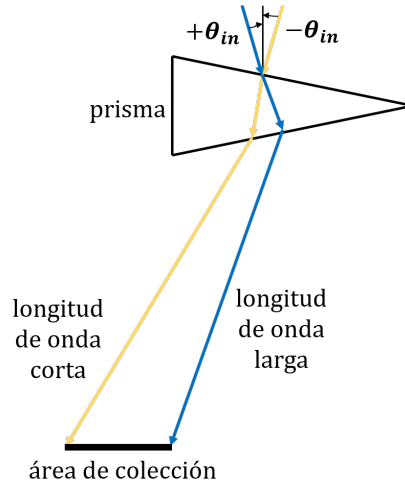


Figura 5.1: Descripción gráfica de la aplicación del método del círculo de mínima confusión en un prisma que integra un lente de Fresnel anidólico acorde a los trabajos presentados por Akizawa y Zhuang[60, 62].

prisma, por estar integrado por 2 superficies refractivas, puede ser calculada como:

$$\tau_{total} = \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_0)}{\tan^2(\phi_1 + \phi_0)} + \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_0)}{\sin^2(\phi_1 + \phi_0)} \right)\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\phi_3 - \phi_2)}{\tan^2(\phi_3 + \phi_2)} + \frac{\sin^2(\phi_3 - \phi_2)}{\sin^2(\phi_3 + \phi_2)} \right)\right) \quad (5.1)$$

donde los ángulos ϕ_0 , ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3 son los ángulos del vector de propagación dentro del prisma y pueden ser identificados en las figuras 2.18 y 2.19 y pueden ser calculados considerando las ecuaciones 2.52 - 2.56. De este modo, es posible calcular matemáticamente la fracción de luz que será transmitida por el prisma.

A continuación se presenta una alternativa para disminuir las pérdidas por reflexión de Fresnel.

5.2. Prisma de reflexión total interna para lentes anidólicos

En la literatura se encuentran reportes que nos muestran que es posible construir lentes de Fresnel de imagen que sean formados por prismas con reflexión total interna. Los prismas propuestos se ilustran en la figura 5.2. Cuando se utilizan los prismas propuestos por Wallhead obtenemos, dependiendo de los parámetros de diseño del lente de Fresnel de imagen, un incremento de hasta un 20 % en la eficiencia considerando las pérdidas por reflexión de Fresnel[61].

Partiendo de los prismas mostrados en la Fig. 5.2, se propone utilizar un prisma de reflexión total interna con geometría de triángulo rectángulo el cual tendrá su ángulo recto orientado en la parte superior derecha, tal como se muestra en la Fig. 5.3.

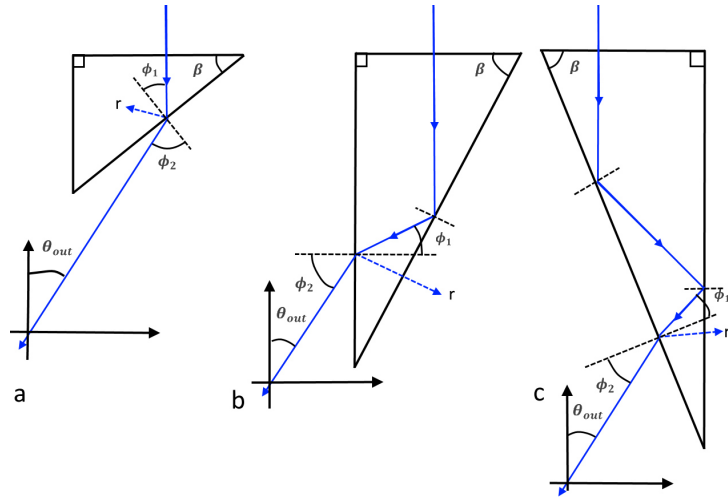


Figura 5.2: Propuestas de prismas para diseño de lentes de Fresnel de imagen. a) Prisma refractivo, es el usado tradicionalmente. b) Prisma con reflexión total interna. c) Prisma con doble reflexión total interna[61].

El análisis matemático del camino óptico dentro de los prismas con reflexión total interna se realizó considerando los 2 casos mostrados en la Fig. 5.3. Partiendo de esta imagen, se muestran a continuación las ecuaciones que describen los ángulos ϕ_i en cada caso.

- **Caso a.** Se tiene que $\theta_{in} > 0^\circ$, sus ángulos se calculan como:

$$\phi_0 = \alpha + \theta_{in} \quad (5.2)$$

$$\phi_2 = \beta - \phi_1 \quad (5.3)$$

$$\theta_{out} = \beta - \phi_3 + \alpha \quad (5.4)$$

- **Caso b.** Se tiene $\theta_{in} < 0^\circ$, por lo que los ángulos se calculan como:

$$\phi_0 = \alpha + \theta_{in} \quad (5.5)$$

$$\phi_2 = 2\beta - \pi/2 + \phi_1 \quad (5.6)$$

$$\theta_{out} = \pi/2 - \alpha - \phi_3 \quad (5.7)$$

Por lo que, para este caso, β se puede calcular como:

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} - \phi_1 + \phi_2 \right) \quad (5.8)$$

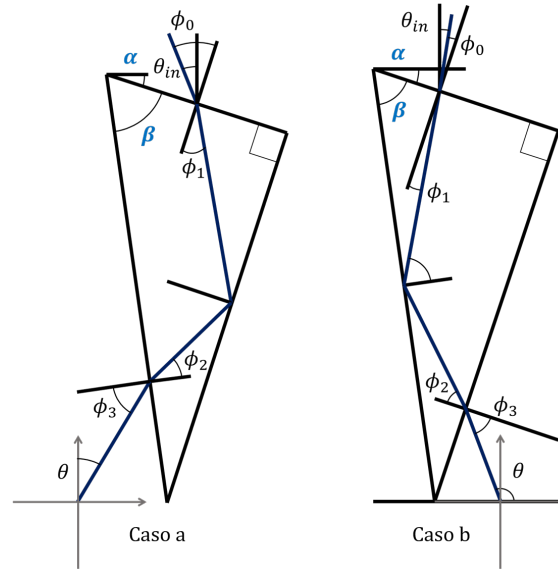


Figura 5.3: Caminos ópticos en prismas RTI. a) Prisma con $\theta_{in} > 0^\circ$. b) Prisma con $\theta_{in} < 0^\circ$.

Los ángulos ϕ_1 y ϕ_3 siguen las mismas ecuaciones presentadas anteriormente (Ecs. 2.53 y 2.55).

Ahora que se ha establecido el diseño del prisma de RTI y se han definido las ecuaciones que definen los 2 caminos ópticos posibles de la luz dentro de él, se procederá a mostrar el método para diseñar un lente de Fresnel de prismas RTI.

5.3. Lente de Fresnel anidólico con prismas RTI

En la sección 3.2.2.1 se describe a detalle el algoritmo de diseño de lentes de Fresnel anidólicos; partiendo de este método se decidió proponer un nuevo método para diseñar un lente anidólico formado por prismas RTI. Las modificaciones a considerar para este nuevo método son:

- α y β deben ser calculadas de manera iterativa, justo como en el método inicial, pero combinando las diferentes ecuaciones obtenidas.
- Se realizan aproximaciones de α desde 0.0° con saltos de 0.1° para poder converger ambas soluciones de β .

El resto del procedimiento de lentes de Fresnel anidólicos se realiza de la misma manera.

En la Fig. 5.4 observamos el perfil de un lente de Fresnel anidólico formado únicamente por prismas RTI. Podemos notar que los prismas son alargados, lo que genera que la luz que sale de un prisma, en ocasiones entre al prisma siguiente, causando un desvío del rayo fuera del detector, como se observa en la Fig.5.5, donde

el objeto naranja corresponde con el lente de Fresnel con prismas RTI, las líneas azules corresponden a los rayos de luz y el área donde la mayoría se concentran, es el detector. Ahí se observa que parte de los rayos que llegan a la parte superior del lente son desviados lejos del detector.

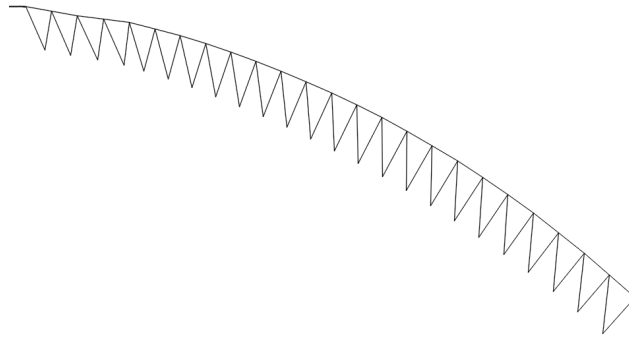


Figura 5.4: Perfil de lente de Fresnel anidóptica formado con prismas RTI.

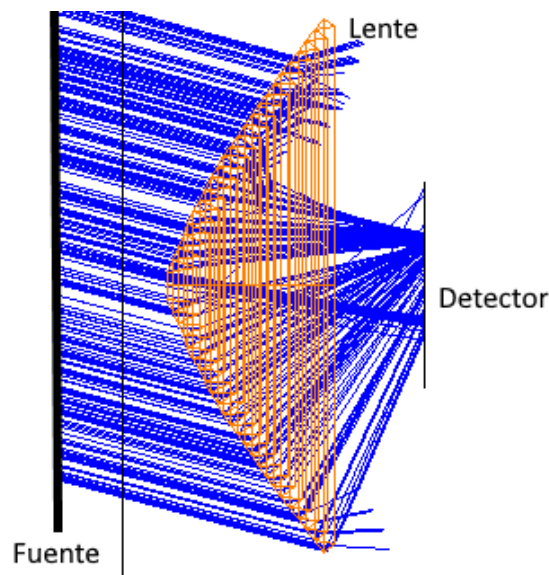


Figura 5.5: Desviación del camino óptico en prismas RTI debido al efecto óptico de ensombrecimiento.

A pesar del problema de sombra, se busca analizar la transmitancia final de los lentes para, en un trabajo a futuro, proponer una metodología de diseño que permita, a través del uso de una superficie no esférica ni asférica, integrar los prismas RTI sin que se causen dichas pérdidas. Además, como se explicará más adelante, se pretende diseñar un lente de Fresnel anidóptico híbrido el cual, por contar con una combinación de prismas, se busca evite las pérdidas generadas por el ensombrecimiento.

5.3.1. Comparativa entre lentes con prismas refractivos y lentes con prismas RTI

Para realizar la comparativa de los efectos en la transmitancia en lentes con prismas refractivos y con prismas RTI, se estudiará la variación de 2 parámetros importantes del diseño de lentes de Fresnel anidólicos: el semi-ángulo de aceptación θ_{in} y la apertura angular de los prismas ω , así como la relación de ω con el número de prismas. Para estas comparativas utilizaremos la Ec. 5.1 y calcularemos una transmitancia promedio definida como:

$$\bar{\tau}_{total} = \frac{\sum_{i=1}^{num_{prismas}} (\tau_{total_{i1}} + \tau_{total_{i2}})}{num_{prismas}} \quad (5.9)$$

donde $\tau_{total_{i1}}$ es la transmitancia final del prisma “i” para el ángulo $\theta_{in} > 0^\circ$ y $\tau_{total_{i2}}$, para el ángulo $\theta_{in} < 0^\circ$ y $num_{prismas}$.

Para las simulaciones siguientes se estandarizaron algunos de los parámetros de diseños, los cuales son mostrados en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros de diseño de los lentes de Fresnel anidólicos.

Rango de longitudes de onda	390 – 750 nm.
Índice de refracción	PMMA (Ver Ec. 2.23)
Distancia focal	50 cm.
ΔE	0.000001

5.3.1.1. Análisis de θ_{in}

Se decidió cuantificar las variaciones en la transmitancia promedio para lentes de Fresnel anidólicos formados por prismas refractivos y por prismas RTI, manteniendo los mismos parámetros de diseño en todos los casos, pero variando únicamente el semi-ángulo de aceptación θ_{in} . Las variaciones sobre este parámetro se definieron de 0° a 50° con saltos de 5° . La cantidad de prismas que formaron cada lente se fijó en 100 y se les asignó una apertura angular de $\omega = 1^\circ$. Se consideró que la distancia focal de los lentes es de 50 cm y se decidió utilizar PMMA como material de construcción, implementando el CLC para el diseño de cada lente.

Los resultados del primer análisis numérico se muestran en la Fig. 5.6, donde las transmitancias para los casos donde $20^\circ < \theta_{in} < 45^\circ$ para el lente de Fresnel con prismas RTI son mayores que para los lentes con prismas refractivos, pero menores en todos los casos.

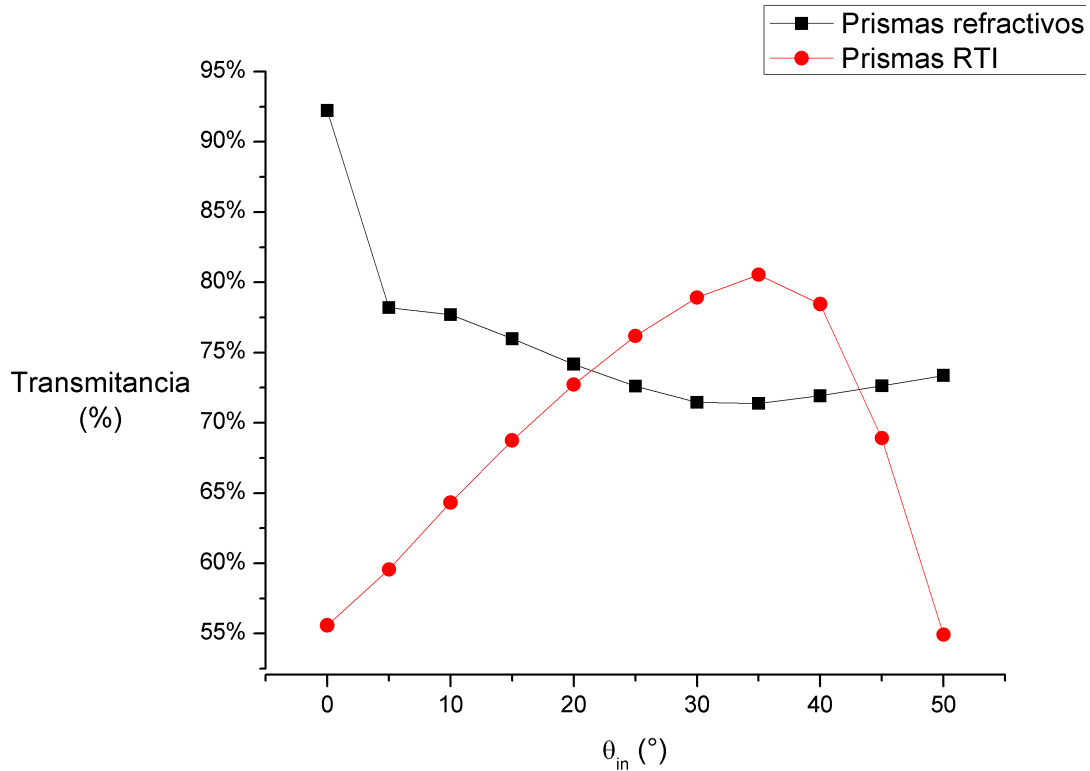


Figura 5.6: Cambios presentados en la transmitancia promedio, $\bar{\tau}_{total}$, para lentes de Fresnel con prismas refractivos (línea negra) y lentes de Fresnel con prismas RTI (línea roja), El eje x representa el ángulo θ_{in} y el eje y, la transmitancia total promedio.

5.3.1.2. Análisis del tamaño de prisma en relación con ω

Para este análisis numérico, el semi-ángulo de aceptación fue definido con un valor de $\theta_{in} = \pm 25^\circ$ y la cantidad de prismas $num_{prismas}$ fue modificada en cada iteración para satisfacer que el semi-ángulo de apertura de la lente, $\theta_{1/2}$, se mantenga entre $75^\circ - 76^\circ$, solo modificando el ángulo ω . La relación entre estos dos parámetros es:

$$\theta_{1/2} = num_{prismas} \times \omega \quad (5.10)$$

La transmitancia promedio total para cada caso puede ser vista en la Fig. 5.7.

La Fig. 5.7 muestra como, cuando el número de prismas se incrementa y su tamaño es reducido, el lente incrementa su transmitancia total, debido a que su superficie exterior se aproxima mejor a una superficie lisa. Los valores de ω fueron usados considerando el rango de valores típicos mostrado en la Tabla 2.4.

A partir del estudio de los parámetros θ_{in} y ω , se diseñará un lente de Fresnel híbrido que, además, se comparará en un experimento matemático con lentes de Fresnel anidólicos con prismas refractivos y lentes anidólicos con prismas RTI. La siguiente sección describe el procedimiento de diseño de los lentes de Fresnel híbridos.

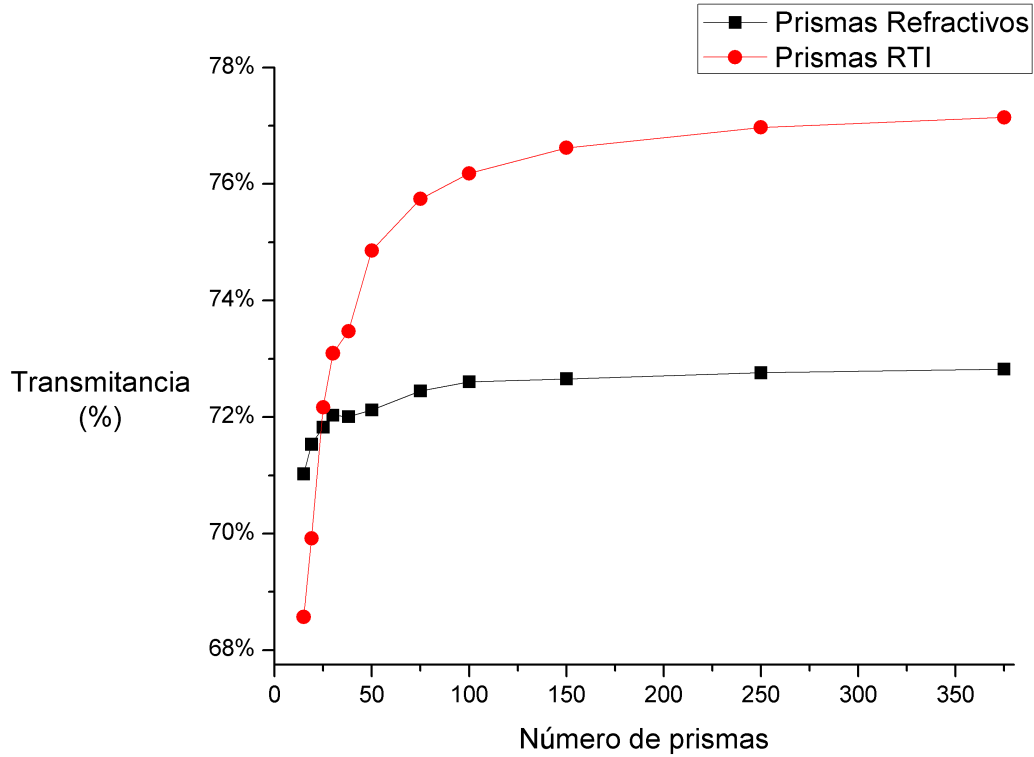


Figura 5.7: Cambios presentados en la transmitancia promedio, τ_{total}^- , para lentes de Fresnel con prismas refractivos (línea negra) y lentes de Fresnel con prismas RTI (línea roja), El eje x representa el número de prismas de cada lente y el eje y, la transmitancia total promedio.

5.4. Lente de Fresnel híbrido anidólico

Para el diseño del lente de Fresnel híbrido se busca obtener la transmitancia de cada prisma y elegir al que mayor transmitancia tenga, y de esta forma reducir las pérdidas por reflexión de Fresnel.

Por lo anterior se propone una metodología de diseño de lentes híbridos, la cual se muestra en la Fig. 5.8. En general, el algoritmo plantea el diseñar 2 prismas para cada prisma que vaya a formar parte del lente y, calculando sus transmitancias, para los ángulos ϕ_i relacionados con el θ_{in} positivo, como por el negativo y promediarlas para comparar cual se desempeña mejor. El prisma con mayor transmitancia es agregado al lente y se repite el procedimiento hasta terminar el lente.

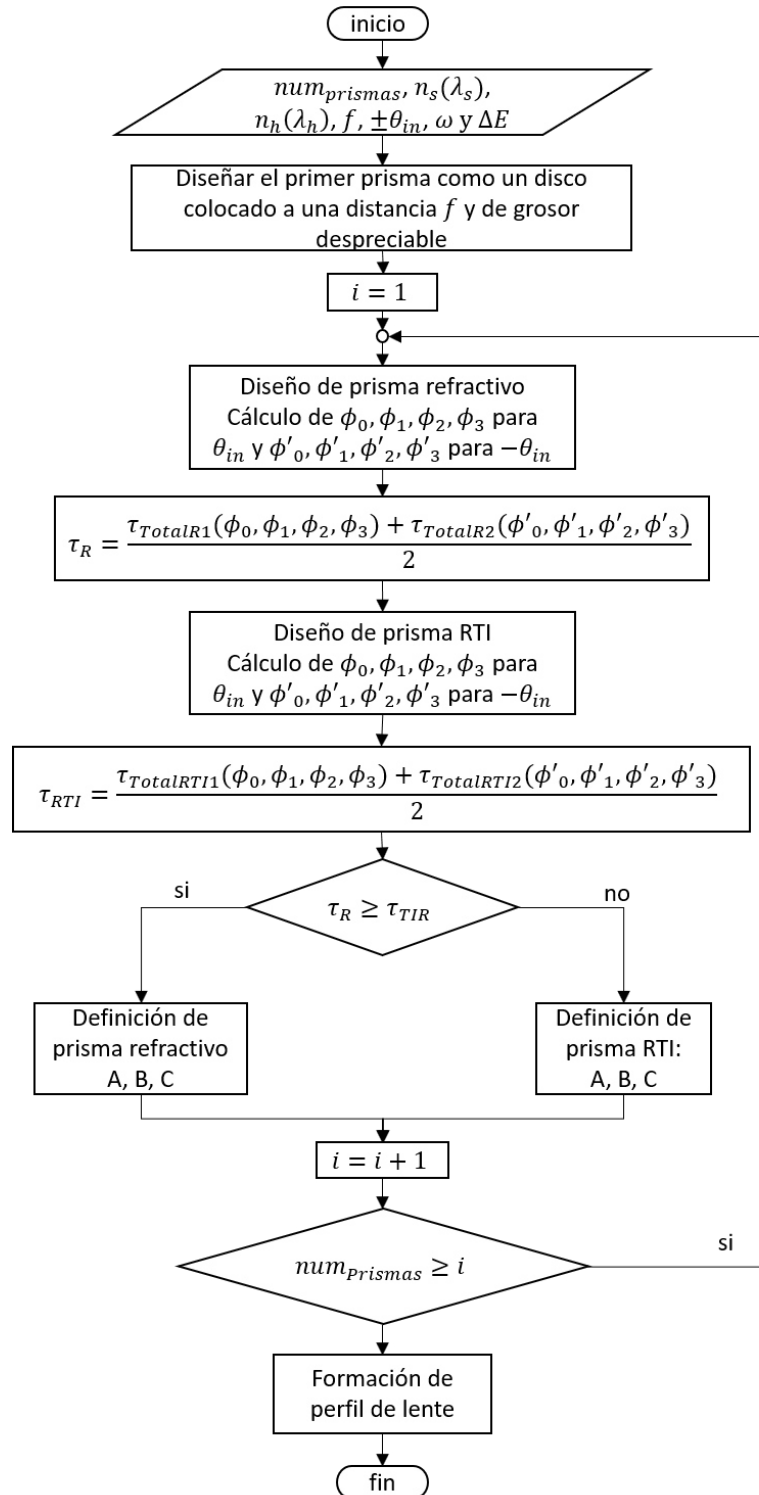


Figura 5.8: Diagrama de flujo del método para el diseño de lentes de Fresnel híbridos. Las transmitancias con subíndice R están relacionadas con los prismas refractivos y los que tienen subíndice RTI , con prismas RTI.

5.4.1. Comparativa de transmitancia final

Se diseñaron 3 lentes de Fresnel anidólicas con el objetivo de comparar sus transmitancias, los tipos de lentes creados fueron:

1. Lente de Fresnel anidólica refractiva. Es el diseño tradicional construido con prismas refractivos.
2. Lente de Fresnel anidólica RTI. Solo está formado con prismas RTI.
3. Lentes de Fresnel anidólicas híbridas. Siguen el algoritmo de diseño presentado en la Fig. 5.8.

Para los 3 casos, los parámetros de diseño se mantuvieron constantes para evitar variaciones innecesarias en el resultado final; los parámetros usados son mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros de diseño para lente refractiva, RTI e híbrida.

Rango de longitudes de onda	$\lambda_s = 390 \rightarrow \lambda_h = 750 \text{ nm.}$
Índice de refracción	PMMA (Ver Ec. 2.23)
Distancia focal	50 cm.
Número de prismas	325
$\pm\theta_{in}$	25°
ω	0.2°
ΔE	0.000001

La Fig. 5.9 presenta perfiles ilustrativos de los lentes diseñados. El lente refractivo tiene una superficie final con una curvatura similar a una esfera, el lente RTI tiene secciones rectas, mientras que el híbrido muestra una combinación de superficies.

Analizando la Fig. 5.9, si hacemos la simetría de revolución para construir los lentes de forma tridimensional obtendríamos:

- Un lente con curvatura esférica o asférica para el lente de prismas refractivos.
- Un cono, con cambios de inclinación para el lente con prismas RTI.
- Un lente tipo “sombrero” con curvaturas esféricas/asféricas y secciones planas, todo dependiendo de los parámetros iniciales de diseño.

La transmitancia de cada prisma, con sus respectivas variaciones de acuerdo a los valores extremos de θ_{in} , así como el promedio de dichas transmitancias fueron calculados y graficados como se muestra en la Fig. 5.10a, 5.10b and 5.10c. Además, la transmitancia promedio de ambos caminos ópticos fue graficada y comparada en la Fig. 5.10d. Las figuras 5.10a y 5.10b muestran que después del prisma 295 y 325,

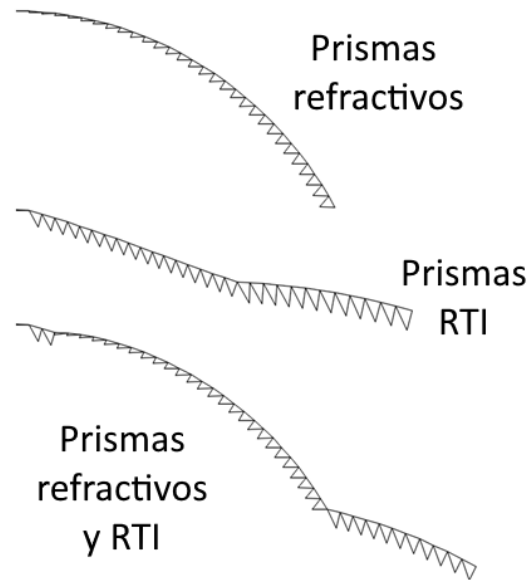


Figura 5.9: Perfil de los 3 lentes de Fresnel: refractivo, RTI e híbrido.

para el lente refractivo y el lente RTI, respectivamente, no hay una convergencia en la solución y, como consecuencia, se limita el número de prismas que componen el lente.

El perfil de distribución espacial para cada lente se muestra en la Fig. 5.11, donde también se observa el cálculo de su eficiencia promedio resultado de las simulaciones en Zemax®. Se menciona que la eficiencia es promedio ya que, como las lentes poseen un rango de ángulos de aceptación de $-\theta_{in}$ a θ_{in} , la eficiencia final que se muestra en la Fig. 5.11 incluye dos fuentes, una con un ángulo de incidencia θ_{in} y otro con $-\theta_{in}$.

5.5. Discusión de resultados

Teniendo en cuenta el análisis matemático realizado, la lente de Fresnel refractiva (Fig. 5.11a), presenta un área de recolección definida con una eficiencia promedio de 70 %, lo que significa que toda la luz colectada para el rango de $-\theta_{in}$ a θ_{in} se redirige a la superficie circular. Por el contrario, la lente TIR Fresnel (Fig. 5.11b) tiene una transmitancia del 77.1 % pero una parte significativa de la luz recolectada llega fuera del área del receptor con una eficiencia final del 55.1 %. Además, la lente híbrida de Fresnel (Fig. 5.11c), como en el caso de la lente refractiva, tiene una transmitancia media del 90.1 %, donde se recoge toda la luz, dentro del área del detector, teniendo una eficiencia final (85 %) similar a la transmitancia calculada.

La aberración en la distribución espacial para las lentes TIR se presenta debido a la simetría rotacional aplicada sobre el prisma y por el efecto sombra que provoca entre prismas contiguos, estos efectos se pueden observar en la Fig. 5.3. En el caso de la lente híbrida, este efecto de sombreado se evita porque, como se puede ver en

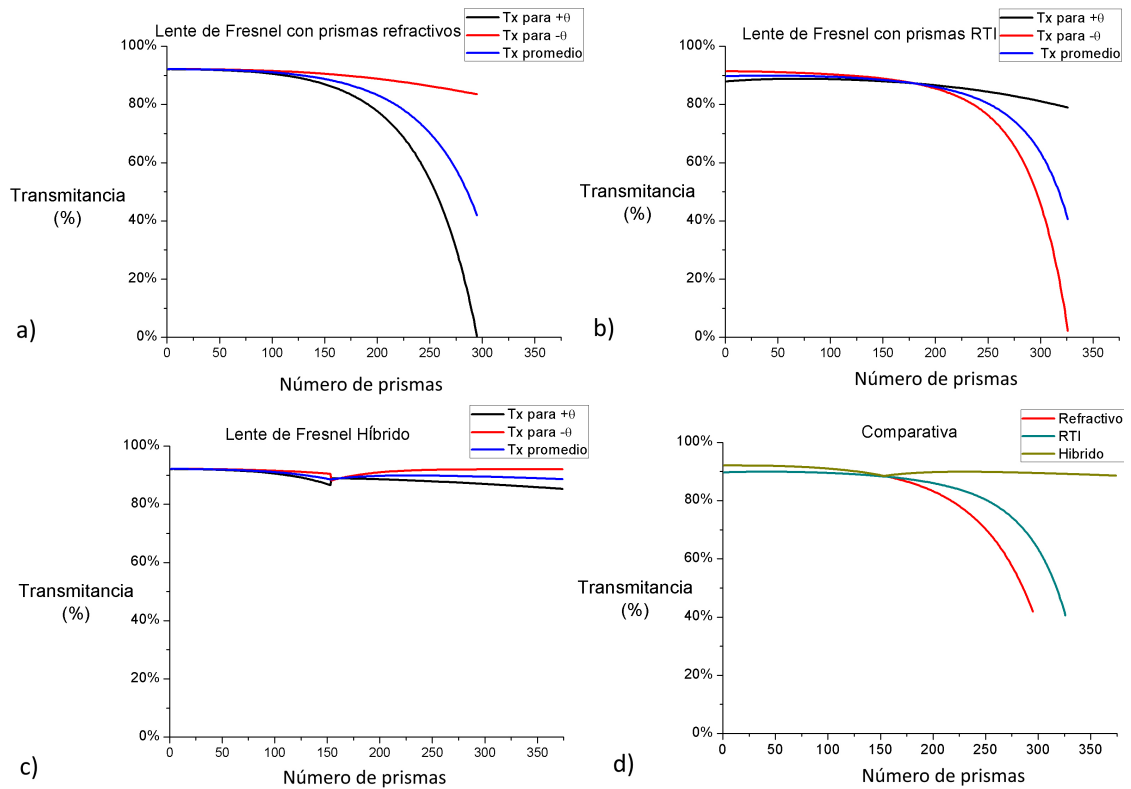


Figura 5.10: Transmitancia obtenida en cada uno de los prismas de los 3 diferentes lentes de Fresnel diseñados bajo los mismos parámetros. La línea negra en las gráficas a), b) y c) corresponde a la transmitancia para el camino óptico cuando $\theta_{in} > 0^\circ$, la línea roja cuando $\theta_{in} < 0^\circ$ y la línea azul es el promedio de ambas. Las gráficas a, b y c corresponden a los lentes refractivo, RTI e híbrido, respectivamente, mientras que la gráfica d es la comparación del promedio de transmitancia de los 3 lentes.

la Fig. 5.9, la orientación de los prismas cambia en el prisma exterior.

En resumen, el método de diseño presentado permite el diseño de lentes Fresnel anidóticos con mayor eficiencia. Esto se logra porque se reducen las pérdidas relacionadas con la reflexión de Fresnel. Como se puede ver en la Fig. 5.10, para las lentes híbridas, es posible modular la transmitancia, cuando comienza a disminuir, se fuerza a aumentarla, manteniéndola casi constante. Este resultado no es posible con otras lentes.

Y si bien los resultados obtenidos son satisfactorios, se tienen que realizar más propuestas de diseño y análisis numéricos que permitan generar lentes de RTI con superficies esféricas o esféricas ya que, si se busca integrarlos a diseños como el del domo segmentado, es necesario que cada segmento tenga una curva “suave” que permita su fácil integración.

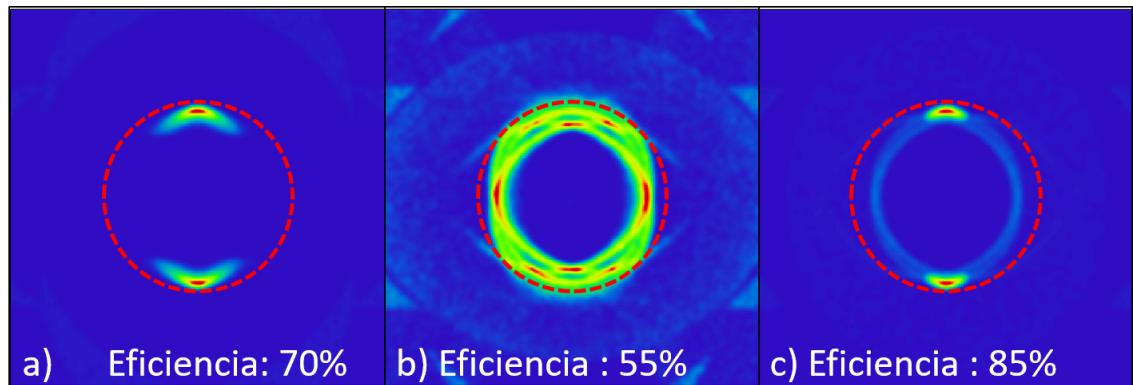


Figura 5.11: Perfil de distribución espacial para los lentes anidóticos a) refractivo, b) TIR e c) híbrido para los valores extremos de θ_{in} . La línea roja punteada representa el área de colección final en cada caso y la eficiencia es calculada acorde a la Ec. 4.1.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

La búsqueda de nuevas alternativas para el ahorro energético y el interés científico existente para aprovechar la principal fuente de energía de la Tierra, el Sol, fueron los motivos centrales para la realización del presente proyecto de investigación donde se aplicaron los conocimientos referentes a óptica, radiometría, fotometría, análisis numérico y desarrollo de soluciones a través de algoritmos y desarrollo de aplicaciones de software en la tarea de diseñar y mejorar la eficiencia de colectores basados en lentes de Fresnel anidólicas.

Se presentó un diseño de colector solar semi-estacionario para el noreste de México, que está formado por la conjunción de lentes de Fresnel anidólicas idénticas para la captación de radiación solar durante períodos específicos de tiempo. El domo tiene un semi-ángulo de aceptación combinado de $\theta_{in} = \pm 105^\circ$ que permite la colección de luz solar en la región mencionada durante todo el año de 9:00 a 18:00 horas y no requiere un sistema de seguimiento solar, solo necesita una rotación de 180° sobre el plano XY en cada equinoccio. El colector segmentado presenta una eficiencia promedio de más del 67.8 % en un área circular de radio igual a su longitud focal; esta eficiencia incluye las pérdidas por reflexión de Fresnel calculadas por Radiant Zemax[®] y el área de colección corresponde con el círculo de menor confusión para evitar aberraciones cromáticas.

El procedimiento presentado se puede aplicar y generalizar para diseñar colectores de Fresnel segmentados para otras ubicaciones geográficas y diferentes períodos de tiempo. Además, es posible optimizar el proceso de diseño cambiando el número de segmentos del colector, sus tamaños o eligiendo diferentes valores de θ_{in} y f para mejorar las eficiencias de cada sección individual. El colector diseñado y su método de diseño proporcionan datos valiosos para optimizar la eficiencia de los dispositivos de captación solar basados en lentes de Fresnel anidólicas como sistemas de iluminación solar.

El método de optimización propuesto es una variación del método de diseño presentado por Leutz e incluye la propuesta realizada por Akisawa para reducir las pérdidas relacionadas con la aberración cromática. Para el ejemplo que se muestra en el Capítulo 5, las lentes híbridas evitan la disminución de la transmitancia, pero este nuevo diseño presenta algunas desventajas, ya que al no tener una superficie exterior lisa, presenta problemas relacionados con la fabricación y su proceso de limpieza será más complicado.

Es importante ver que las lentes refractivas tienen superficies esféricas y lisas, pero las lentes TIR e híbridas no, por lo que aún no ha sido posible integrarlas a un domo segmentado, donde una superficie esférica o, al menos lisa, es vital para una integración adecuada de los segmentos como un conjunto.

A continuación se muestra una recapitulación de lo realizado en este proyecto y se enlistan las contribuciones a la generación de conocimiento científico. Para finalizar, se incluyen las áreas de oportunidad y el trabajo a futuro.

6.1. Recapitulación

La presente tesis describe un estudio sobre el estado del arte de los sistemas de iluminación natural, así como de los lentes de Fresnel, incluyendo su historia y sus principales aplicaciones. Además, describe los sistemas de colección de energía solar y analiza la importancia de conocer y tomar en cuenta los desplazamientos del disco solar para su diseño e implementación.

También, se construyó un amplio marco teórico que incluye todos los conceptos, leyes y ecuaciones necesarias para entender, diseñar y evaluar lentes de Fresnel anidólicas. Para esto se estudiaron los conceptos básicos de la Radiometría y la Fotometría, que son necesarios para modelar y evaluar los sistemas ópticos. Posteriormente se revisaron los conceptos básicos relacionados con la Óptica Geométrica y la Óptica anidólica. Finalmente, se hizo un compendio de toda la teoría relacionada con prismas y lentes de Fresnel, tanto de imagen como anidólicas.

Además, se presentó una metodología de diseño para domos segmentados semi-estacionarios basados en lentes de Fresnel anidólicas y se diseñó un domo para que colecte la luz de una localización geográfica específica durante todo el año en un horario de 9:00 a 18:00 horas. El diseño del domo segmentado semi-estacionario se vio complementado con la evaluación de la eficiencia del mismo, lo cual se enriqueció con la comparación de su eficiencia contra las obtenidas con un lente de Fresnel de imagen y uno anidólico de características similares.

Finalmente, se propuso el diseño de lentes de Fresnel anidólicas conformados por prismas de reflexión total interna, así como lentes de Fresnel anidólicas con prismas refractivos y de reflexión total interna para disminuir las pérdidas por la reflexión de Fresnel.

6.2. Contribuciones a la generación de conocimiento científico

La aplicación de los conceptos fundamentales de Óptica Geométrica y Óptica Anidólica en combinación con el uso de las herramientas matemáticas, desarrollo de software y el uso de simulaciones ópticas permitió que se realizarán las siguientes contribuciones:

- Desarrollo de una aplicación de software que permite diseñar lentes de Fresnel anidólicas basada en el algoritmo de diseño propuesto por Leutz y con la

implementación del método del “Círculo de mínima confusión” para reducir la aberración cromática en su mancha focal.

- Desarrollo de una metodología para el diseño de domos semi-estacionarios segmentados integrados por lentes de Fresnel anidólicas adaptados a áreas geográficas específicas.
- Diseño de un lente de domo semi-estacionario segmentado para Ciudad Universitaria en San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- Desarrollo de una metodología para el diseño de lentes de Fresnel anidólicas integrados por prismas con reflexión total interna.
- Desarrollo de una metodología para el diseño de lentes de Fresnel anidólicas híbridos integrados por prismas refractivos y prismas con reflexión total interna para reducir las pérdidas por reflexión de Fresnel.

Los diversos colectores de Fresnel obtenidos de las actividades mencionadas, fueron analizados matemática y numéricamente, mostrando resultados favorables, así como áreas de oportunidad que permitirán mejorar el trabajo realizado.

6.3. Áreas de oportunidad y trabajo a futuro

A continuación se listan algunas de las áreas de oportunidad y trabajos a futuro que se proponen como resultado del presente proyecto de investigación doctoral.

6.3.1. Software de diseño de lentes de Fresnel

- Desarrollo de un algoritmo para el trazado de rayos que permita visualizar en software de diseño asistido por computadora los caminos ópticos que seguirán los rayos incidentes a los lentes, para reducir así la dependencia con software de modelado óptico.
- Encapsulamiento del código desarrollado para integrar una librería para lenguaje C y C++ que permita desarrollar lentes de Fresnel, tanto de imagen como anidólicas, así como otros elementos ópticos.
- Introducción de nuevas metodologías de diseño de lentes de Fresnel basadas en óptica anidólica y diseño de forma libre.
- Introducir los pasos necesarios al algoritmo para que se diseñen lentes con un grosor fijo.
- Proponer nuevas geometrías de prismas que permitan incrementar la eficiencia final de los lentes, disminuyendo sus aberraciones y pérdidas.
- Incluir módulos que permitan calcular numéricamente los distintos tipos de aberraciones y pérdidas propias de los prismas.

6.3.2. Colectores segmentados semi-estacionarios

- Perfeccionar la metodología de diseño para lograr mapear los desplazamientos angular con áreas, para lograr un domo con segmentos con una geometría que facilite el proceso de fabricación y, además, asegure un área en relación con el periodo de tiempo que colectará luz cada segmento.
- Adaptar la metodología de diseño al uso de lentes de Fresnel anidólicos híbridos.
- Adaptar el método para contar con segmentos diferentes que busquen maximizar la eficiencia de los distintos periodos de tiempo.
- Incrementar las áreas de los lentes base para evitar la existencia de “vacíos” en la superficie del domo.
- Crear diferentes domos segmentados para distintas áreas geográficas y probar su eficiencia.
- Realizar prototipos de diversos domos segmentados para medir experimentalmente su eficiencia.

6.3.3. Lentes con prismas de RTI y lentes híbridos

- Proponer nuevas geometrías de prismas de reflexión total interna.
- Realizar simulaciones ópticas de los lentes de RTI e híbridos para verificar sus resultados en Zemax®.
- Modificar el método de diseño para garantizar una superficie externa lisa.
- Proponer el diseño de prismas con doble reflexión total interna, como los propuestos por Wallhead para lentes de Fresnel de imagen[61].
- Proponer una nueva metodología para evitar la pérdidas por el efecto sombra de los prismas RTI.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dincer, Ibrahim y Calin Zamfirescu: *Sustainable Energy Systems and Applications*. Springer US, Boston, MA, 2012, ISBN 978-0-387-95860-6.
- [2] Koshel, R John: *Illumination Engineering: design with nonimaging optics*. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] Ruck, Nancy C: *International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Task 21, 'Daylighting in Buildings'*. ECBCS Bookshop, 2010, ISBN 978-0-9562808-2-4.
- [4] Edwards, L., P.A. Torcellini y National Renewable Energy Laboratory (U.S.): *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants*. National Renewable Energy Laboratory, 2002, ISBN NREL/TP-550-30769. <http://books.google.com.mx/books?id=WGMzOAAACAAJ>.
- [5] Pauley, Stephen M.: *Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue*. Medical Hypotheses, 63(4):588 – 596, 2004, ISSN 0306-9877. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306987704002336>.
- [6] Kischkoweit-Lopin, Martin: *An overview of daylighting systems*. Solar Energy, 73(2):77–82, 2002.
- [7] Arecchi, Angelo V, R John Koshel y Tahar Messadi: *Field guide to illumination*. SPIE, 2007. [doi:10.1117/3.764682].
- [8] Medina Carrasco, Rodrigo Eduardo: *Análisis del Flujo Energético 3D en Colectores Concentradores Solares de Diversas Geometrías*. Tesis de Doctorado, Universidad de Chile, 2010.
- [9] Leutz, Ralf y Akio Suzuki: *Nonimaging Fresnel Lenses*, volumen 83 de *Physics and astronomy online library*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, ISBN 9783540418412.
- [10] Chaves, Julio: *Introduction to nonimaging optics*. CRC Press, 2008, ISBN 1420054325.

- [11] Xie, W T, Y J Dai, R Z Wang y K Sumathy: *Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6):2588–2606, 2011, ISSN 1364-0321. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001341>, [doi:10.1016/03.031].
- [12] Fresnel, Augustin: *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares*. Impr. royale, 1822.
- [13] Leutz, Ralf, Akio Suzuki, Atsushi Akisawa y Takao Kashiwagi: *Shaped nonimaging Fresnel lenses*. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2(2):112–116, mar 2000, ISSN 1464-4258. <http://stacks.iop.org/1464-4258/2/i=2/a=307?key=crossref.c9cd7de8ad79e8af69790860b8e0864e>.
- [14] Donald Bren School of Information and Computer Sciences: *Fresnel lens*. <http://www.ics.uci.edu/~eppstein/pix/mendocino5/h1/Fresnel1.html>, 2004. Accessed: 2018-02-14.
- [15] Green Cooking: *Green Cooking Wiki*. <http://greencooking.wikidot.com/solar-cooker-photos>, 2009. Accessed: 2018-02-14.
- [16] Light Prescriptions Innovators: *Solar Electricity*. <http://www.lpi-llc.com/portfolio/solar-electricity-45/>, 2016. Accessed: 2018-02-14.
- [17] Pan, Jui Wen, Jiun Yang Huang, Chih Ming Wang, Hwen Fen Hong y Yi Ping Liang: *High concentration and homogenized Fresnel lens without secondary optics element*. Optics Communications, 284(19):4283–4288, 2011, ISSN 00304018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.06.019>.
- [18] Fu, Ling, Ralf Leutz y Hans Philipp Annen: *Secondary optics for Fresnel lens solar concentrators*. En Winston, Roland y Jeffrey M. Gordon (editores): *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration VII*, volumen 7785, páginas 778509–778509–6, aug 2010. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=754230>.
- [19] Chen, Yi Cheng y Hung Wei Chiang: *Design of the Secondary Optical Elements for Concentrated Photovoltaic Units with Fresnel Lenses*. Applied Sciences, 5(4):770–786, 2015, ISSN 2076-3417. <http://www.mdpi.com/2076-3417/5/4/770/>.
- [20] Viera-González, Perla Marlene: *Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.
- [21] Duffie, John A y William A. Beckman: *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 4ª edición, apr 2013, ISBN 9781118671603.
- [22] Viera-González, Perla M., Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Daniel E. Ceballos-Herrera y Romeo Selvas-Aguilar: *Design of a solar collector system formed by a*

- Fresnel lens and a CEC coupled to plastic fibers.* En Winston, Roland y Jeffrey M. Gordon (editores): *Proc. SPIE*, página 95720B, aug 2015.
- [23] Abdallah, Salah y Salem Nijmeh: *Two axes sun tracking system with PLC control.* *Energy conversion and management*, 45(11-12):1931–1939, 2004.
- [24] Bakos, George C: *Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement.* *Renewable energy*, 31(15):2411–2421, 2006.
- [25] Khalifa, Abdul Jabbar N y Salman S Al-Mutawalli: *Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators.* *Energy Conversion and Management*, 39(10):1073–1079, 1998.
- [26] Secretaría de Energía: *Día Mundial del Ahorro de Energía.* <https://www.gob.mx/sener/en/articulos/21-de-octubre-dia-mundial-del-ahorro-de-energia>, 2015. Accessed: 2017-11-30.
- [27] Grant, B.G.: *Field Guide to Radiometry.* Número no. 1 en *Field Guide Series.* SPIE, 2011, ISBN 9780819488275.
- [28] McCluney, William Ross: *Introduction to radiometry and photometry.* Artech House, 1994.
- [29] Palmer, James M y Barbara Geri Grant: *The art of radiometry.* SPIE Press Bellingham, 2010.
- [30] Boyd, Robert W: *Radiometry and the detection of optical radiation.* New York, John Wiley and Sons, 1983.
- [31] Hetch, E: *Óptica . Ed.* Pearson, Addison Wesley, 2005.
- [32] Wolfe, William L.: *Introduction to Radiometry*, volumen 29. SPIE Press, apr 1998, ISBN 9780819427588.
- [33] Schwiegerling, Jim: *Field guide to visual and ophthalmic optics.* 2004.
- [34] Jutglar, L.: *Energía solar.* Energías alternativas y medio ambiente. CEAC, 2004, ISBN 9788432910630. <http://books.google.es/books?id=10qPPTGMRUYC>.
- [35] Díez, Pedro Fernández: *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.* Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 1992.
- [36] Duffie, J.A. y W.A. Beckman: *Solar Energy Thermal Processes.* A Wiley-Interscience Publication. Wiley : New York., 1974, ISBN 9780471223719. <http://books.google.com.mx/books?id=iKoGAAAAMAAJ>.

- [37] Fernández Balbuena, Antonio Álvarez: *Sistemas Ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Escuela Universitaria de Óptica, 2011.
- [38] Jaramillo Salgado, Oscar Alfredo: *Transporte de energía solar concentrada a través de fibra 'optica. Acoplamiento fibra concentrador y estudio térmico*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.
- [39] Duffie, J. A., William A. Beckman y W. M. Worek: *Solar Engineering of Thermal Processes*. Journal of Solar Energy Engineering, 116:67, 2003, ISSN 01996231. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=qkaWBrOuAEgC&pgis=1>.
- [40] Thuillier, G. et al.: *The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 1 2 3 and EURECA missions*. Sol. Phys., 214:1–22, 2003.
- [41] Uruguay, Ministerio de Industria Energía y Minería de: *Manual de Iluminación eficiente*. Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, Uruguay, 2013. http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/eficiencia-energetica/-/asset_publisher/WbkdYyodoL20/content/manual-de-iluminacion-eficiente.
- [42] Muhs, Jeff D.: *Hybrid solar lighting doubles the efficiency and affordability of solar energy in commercial buildings*. CADDET Energy Efficiency, 4:6–9, 2000.
- [43] Schanda, J.: *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007, ISBN 9780470175620. <http://books.google.com.mx/books?id=uZadszSGe9MC>.
- [44] (Loucetios), Kevin Houser: *Spectral power distribution of D65*. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=868392/>, 2006. Accessed 2015.
- [45] ZEMAX, Development Corporation: *ZEMAX User's Guide*. ZEMAX, 2009.
- [46] Winston, R., J.C. Miñano y P. Benítez: *Nonimaging Optics*. Electronics & Electrical. Elsevier Academic Press, 2005, ISBN 9780127597515. <http://books.google.com.mx/books?id=MliJHWwTnVQC>.
- [47] Hecht, E.: *Óptica*. Fuera de colección Out of series. Addison-Wesley Iberoamericana Espana, S.A., 2000, ISBN 9788478290253. <http://books.google.com.mx/books?id=XdCaQQAACAAJ>.
- [48] Pedrotti, Leno S.: *Module 1.3 Basic Geometrical Optics*. PDF Format, 2003. <http://spie.org/x17229.xml>.
- [49] Vanderwerf, Dennis F.: *Applied Prismatic and Reflective Optics*. SPIE, 2010, ISBN 9780819483324.

- [50] Malacara, Daniel: *Óptica básica*. Fondo de cultura económica, 2015.
- [51] Cvetković, Aleksandra: *Free-Form Optical System for Nonimaging Applications*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [52] Winston, Roland: *How nonimaging optics began*, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2239175>.
- [53] Hernández, M., A. Cvetkovic, P. Benítez y J. C. Miñano: *High-performance Kohler concentrators with uniform irradiance on solar cell*, 2008. <http://dx.doi.org/10.1117/12.794927>.
- [54] Ries, Harald y Ari Rabl: *Edge-ray principle of nonimaging optics*. J. Opt. Soc. Am. A, 11(10):2627–2632, Oct 1994. <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-11-10-2627>.
- [55] Perla M. Viera-Gonzalez, G. E. Sanchez-Guerrero, D. E. Ceballos Herrera y R. Selvas-Aguilar: *Radiant Flux Analysis of a System based in Imaging Fresnel Lens and Plastic Optical Fiber with Fiber Lenses*. Research in Computing Science, 131(15):119–124, Ene 2017.
- [56] Leutz, R, a Susuki, a Akisawa y T Kashiwagi: *Nonimaging Fresnel lens concentrators for photovoltaic applications*. En *ISES Solar World Congress*. ISES, 1999, ISBN 8142388707.
- [57] Araki, K. Uozumi, H., M. Kondo, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, Y. Kemmoku, a. Akisawa, H.S. Lee, N.J. Ekins-Daukes y M. Yamaguchi: *Development of a new 550X concentrator module with 3J cells - performance and reliability*. En *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, número 1, páginas 2–5, 2005, ISBN 0-7803-8707-4. [doi:10.1109/PVSC.2005.1488210].
- [58] Kumar, Vinod, R. L. Shrivastava y S. P. Untawale: *Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44:376–390, 2015, ISSN 13640321. [doi:10.1016/j.rser.2014.12.006].
- [59] Viera-González, Perla M., Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Edgar Martínez-Guerra y Daniel E. Ceballos-Herrera: *Mathematical Analysis of Nonimaging Fresnel Lenses Using Refractive and Total Internal Reflection Prisms for Sunlight Concentration*. Mathematical Problems in Engineering, 2018:1–7, sep 2018, ISSN 1024-123X. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/4654795/>.
- [60] Akisawa, Atsushi, Masao Hiramatsu y Kouki Ozaki: *Design of dome-shaped non-imaging Fresnel lenses taking chromatic aberration into account*. Solar Energy, 86(3):877–885, 2012, ISSN 0038092X. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.017>, [doi:10.1016/j.solener.2011.12.017].

- [61] Wallhead, Ian, Teresa Molina Jiménez, Jose Vicente García Ortiz, Ignacio Gonzalez Toledo y Cristóbal Gonzalez Toledo: *Design of an efficient Fresnel-type lens utilizing double total internal reflection for solar energy collection*. Optics Express, 20(S6):A1005, nov 2012, ISSN 1094-4087. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-20-S6-A1005>.
- [62] Zhuang, Zhenfeng y Feihong Yu: *Optimization design of hybrid Fresnel-based concentrator for generating uniformity irradiance with the broad solar spectrum*. Optics and Laser Technology, 60:27–33, 2014, ISSN 00303992. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.021>.
- [63] Sharma, Pratibha, Matthew M Wilkins, Henry P Schriemer y Karin Hinzer: *Concentrating optical system optimization for 3-and 4-junction solar cells: impact of illumination profiles*. Journal of Photonics for Energy, 7(1):014501–014501, 2017. [doi:10.1117/1.JPE.7.014501].
- [64] Zheng, Cheng, Qiyuan Li, Gary Rosengarten, Evatt Hawkes y Robert A Taylor: *Design and indoor testing of a compact optical concentrator*. Optical Engineering, 56(1):015102–015102, 2017. [doi:10.1117/1.OE.56.1.015102].
- [65] Vu, Ngoc Hai y Seoyong Shin: *Development of daylighting systems with non-imaging concentrator*. En *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XII*, volumen 9572, página 95720P, 2015. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2189159>, [doi:10.1117/12.2189159].
- [66] Nair, M., A. Ganesan y K. Ramamurthy: *Conceptual design and assessment of a profiled Fresnel lens daylight collector*. Lighting Research and Technology, 47(5):533–547, 2015, ISSN 1477-1535. <http://lrt.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1477153514535421>, [doi:10.1177/1477153514535421].
- [67] SunEarthTools: *Sun Position Tool by Sun Earth Tools*. SunEarthTools.com <http://www.sunearthtools.com/>, 2009. (Accessed: April 2016).
- [68] Jenkins, Frances A, Harvey E White y Donald G Brukhard: *Fundamentals of Optics*. American Journal of Physics, 26(4):272–272, 1958.

Apéndice A

DESPLAZAMIENTO SOLAR EN SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

A continuación se muestra una tabla que indica el ángulo de altitud que tiene al Sol para un día y horario determinado, así como el ángulo azimutal acorde a la Figura 1.6. Estos datos son válidos para las coordenadas geográficas $25^{\circ} 43' 31''$ al Norte y $100^{\circ} 18' 56''$ al Oeste.

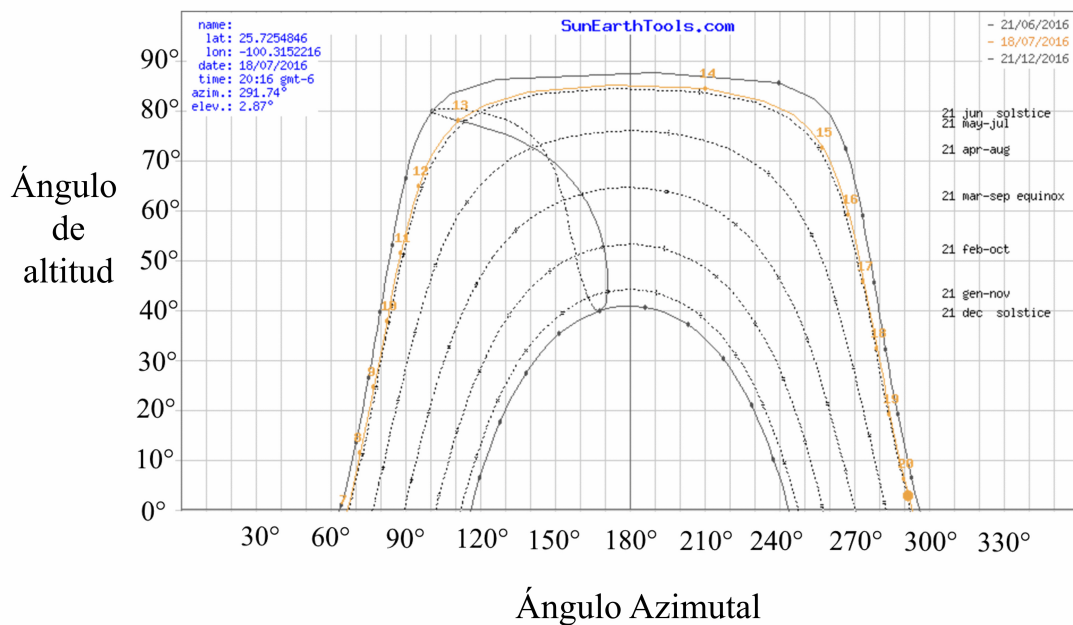


Figura A .1: Mapa Solar para Ciudad Universitaria (UANL) en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México[67].

Tabla A.1 - *Continúa desde página anterior.*

Fecha	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	18:30
01/11	13.97	20.03	25.83	31.31	36.36	40.84	44.58	47.4	49.09	49.51	48.63	46.52	43.36	39.33	34.63	29.42	23.82	17.92	11.79	5.48
07/11	12.97	18.94	24.65	30.02	34.95	39.31	42.94	45.65	47.28	47.69	46.86	44.84	41.79	37.9	33.33	28.23	22.74	16.93	10.88	4.65
14/11	11.79	17.67	23.28	28.55	33.37	37.61	41.14	43.77	45.36	45.78	45.02	43.12	40.21	36.46	32.04	27.08	21.71	16.01	10.06	3.91
21/11	10.6	16.41	21.95	27.13	31.87	36.04	39.5	42.09	43.68	44.14	43.46	41.68	38.92	35.31	31.03	26.2	20.95	15.36	9.5	3.43
28/11	9.45	15.21	20.69	25.82	30.51	34.63	38.06	40.65	42.27	42.8	42.22	40.57	37.94	34.48	30.33	25.62	20.48	14.99	9.21	3.22
01/12	8.98	14.72	20.19	25.3	29.98	34.09	37.52	40.12	41.76	42.32	41.79	40.19	37.62	34.22	30.12	25.47	20.37	14.91	9.18	3.22
07/12	8.08	13.81	19.26	24.36	29.02	33.14	36.58	39.22	40.91	41.56	41.12	39.63	37.18	33.88	29.89	25.33	20.31	14.92	9.25	3.34
14/12	7.16	12.88	18.33	23.44	28.12	32.27	35.75	38.45	40.23	40.99	40.67	39.31	36.98	33.81	29.92	25.45	20.51	15.19	9.57	3.72
21/12	6.39	12.13	17.61	22.75	27.47	31.67	35.24	38.02	39.91	40.78	40.59	39.35	37.14	34.06	30.26	25.86	20.98	15.72	10.14	4.32
28/12	5.82	11.6	17.12	22.31	27.1	31.39	35.04	37.94	39.94	40.94	40.88	39.76	37.64	34.65	30.91	26.56	21.72	16.48	10.92	5.11
31/12	5.64	11.44	16.99	22.21	27.04	31.36	35.06	38.01	40.07	41.13	41.11	40.04	37.96	34.99	31.27	26.94	22.1	16.87	11.31	5.51
01/01	5.63	11.43	16.98	22.21	27.03	31.36	35.07	38.02	40.08	41.14	41.14	40.06	37.98	35.02	31.3	26.97	22.13	16.9	11.35	5.54
07/01	5.4	11.26	16.87	22.17	27.08	31.5	35.3	38.37	40.55	41.22	41.23	40.17	38.1	35.15	31.44	27.11	22.27	17.04	12.22	6.41
14/01	5.38	11.31	17	22.4	27.41	31.95	35.89	39.1	41.41	42.72	42.92	42	40.03	37.13	33.43	29.09	24.23	18.96	13.37	7.52
20/01	5.57	11.57	17.34	22.82	27.94	32.59	36.66	39.99	42.43	43.84	44.12	43.26	41.3	38.39	34.67	30.29	25.38	20.07	14.43	8.53
25/01	5.87	11.93	17.78	23.34	28.55	33.3	37.47	40.91	43.45	44.95	45.29	44.45	42.5	39.56	35.79	31.36	26.4	21.03	15.34	9.4
31/01	6.41	12.55	18.48	24.15	29.47	34.34	38.64	42.22	44.88	46.48	46.88	46.06	44.08	41.08	37.23	32.72	27.68	22.23	16.46	10.45
01/02	6.52	12.67	18.62	24.3	29.64	34.54	38.86	42.45	45.14	46.75	47.16	46.34	44.35	41.34	37.48	32.95	27.89	22.43	16.65	10.63
07/02	7.28	13.51	19.54	25.33	30.78	35.8	40.26	43.99	46.8	48.5	48.96	48.12	46.08	42.97	39.01	34.36	29.2	23.64	17.77	11.67
14/02	8.37	14.69	20.83	26.73	32.32	37.5	42.12	46.01	48.96	50.76	51.25	50.37	48.21	44.96	40.83	36.03	30.72	25.03	19.05	12.86
21/02	9.67	16.07	22.31	28.33	34.06	39.39	44.17	48.23	51.32	53.21	53.7	52.74	50.43	46.99	42.67	37.69	32.21	26.38	20.28	13.99
28/02	11.13	17.61	23.95	30.08	35.94	41.43	46.38	50.61	53.85	55.81	56.28	55.2	52.69	49.02	44.47	39.29	33.64	27.66	21.44	15.04
01/03	11.58	18.08	24.44	30.61	36.5	42.03	47.03	51.31	54.59	56.58	57.04	55.91	53.33	49.59	44.98	39.73	34.03	28.01	21.76	15.33
07/03	12.96	19.52	25.95	32.21	38.22	43.88	49.03	53.46	56.87	58.92	59.33	58.05	55.26	51.28	46.45	41.02	35.16	29.02	22.66	16.16
14/03	14.64	21.26	27.77	34.13	40.27	46.08	51.41	56.02	59.59	61.71	62.04	60.54	57.45	53.17	48.07	42.41	36.38	30.09	23.63	17.05

Tabla A.2 - *Continúa desde página anterior.*

01/11	114.19	118.37	123.1	128.52	134.8	142.11	150.57	160.2	170.8	181.91	192.91	203.21	212.44	220.48	227.4	233.35	238.51	243.02	247.03	250.65
07/11	115.77	119.94	124.65	130.03	136.24	143.42	151.66	160.97	171.15	181.78	192.31	202.22	211.17	219.05	225.87	231.78	236.91	241.42	245.42	249.03
14/11	117.32	121.46	126.13	131.45	137.56	144.57	152.57	161.53	171.27	181.42	191.49	201.04	209.73	217.44	224.18	230.05	235.17	239.66	243.66	247.26
21/11	118.55	122.64	127.25	132.5	138.49	145.33	153.1	161.75	171.11	180.87	190.59	199.84	208.33	215.92	222.6	228.44	233.56	238.06	242.06	245.65
28/11	119.44	123.47	128.02	133.17	139.04	145.72	153.27	161.65	170.72	180.16	189.6	198.64	206.99	214.5	221.15	226.99	232.11	236.62	240.63	244.23
01/12	119.71	123.72	128.23	133.34	139.16	145.78	153.24	161.53	170.48	179.82	189.16	198.13	206.44	213.93	220.57	226.41	231.55	236.07	240.09	243.69
07/12	120.06	124.02	128.46	133.5	139.22	145.71	153.02	161.13	169.9	179.06	188.26	197.13	205.38	212.86	219.51	225.38	230.54	235.09	239.13	242.75
14/12	120.15	124.04	128.41	133.36	138.98	145.34	152.51	160.46	169.07	178.09	187.19	196	204.25	211.75	218.44	224.36	229.58	234.18	238.26	241.91
21/12	119.88	123.72	128.03	132.9	138.43	144.69	151.75	159.59	168.1	177.06	186.13	194.96	203.25	210.83	217.6	223.6	228.88	233.54	237.68	241.37
28/12	119.3	123.09	127.34	132.15	137.6	143.79	150.77	158.55	167.03	175.99	185.11	194.03	202.43	210.12	217.01	223.1	228.48	233.21	237.41	241.16
31/12	118.95	122.73	126.96	131.74	137.17	143.33	150.3	158.07	166.55	175.53	184.7	193.67	202.14	209.89	216.84	222.99	228.4	233.17	237.4	241.17
01/01	118.79	122.56	126.79	131.56	136.98	143.13	150.09	158.02	166.51	175.49	184.66	193.64	202.12	209.88	216.83	222.98	228.4	233.17	237.4	241.17
02/01	118.79	122.56	126.79	131.56	136.98	143.13	150.09	158.02	166.51	175.49	184.66	193.64	202.12	209.88	216.83	222.98	228.4	233.17	237.4	241.17
07/01	118.06	121.81	126.01	130.75	136.14	142.27	149.21	156.98	165.51	174.59	183.89	193.03	201.67	209.58	216.67	222.93	228.44	233.28	237.57	241.4
14/01	116.81	120.54	124.72	129.43	134.79	140.9	147.86	155.69	164.33	173.57	183.1	192.49	201.38	209.51	216.78	223.19	228.81	233.74	238.1	241.99
20/01	115.55	119.28	123.44	128.14	133.49	139.61	146.6	154.52	163.3	172.76	182.54	192.21	201.36	209.71	217.15	223.69	229.41	234.42	238.84	242.77
25/01	114.39	118.12	122.27	126.97	132.32	138.46	145.5	153.51	162.45	172.12	182.17	192.11	201.51	210.08	217.67	224.33	230.12	235.19	239.65	243.61
31/01	112.88	116.61	120.76	125.46	130.82	137	144.12	152.27	161.44	171.43	181.86	192.19	201.93	210.76	218.56	225.34	231.22	236.35	240.85	244.85
01/02	112.62	116.35	120.5	125.2	130.57	136.75	143.88	152.06	161.27	171.33	181.82	192.22	202.03	210.91	218.73	225.54	231.43	236.56	241.07	245.08
07/02	110.98	114.72	118.87	123.57	128.96	135.19	142.43	150.79	160.29	170.74	181.69	192.56	202.76	211.93	219.95	226.88	232.85	238.02	242.55	246.58
14/02	108.96	112.7	116.86	121.57	126.98	133.28	140.65	149.27	159.17	170.17	181.77	193.26	203.98	213.51	221.76	228.8	234.82	240.01	244.55	248.59
21/02	106.84	110.59	114.75	119.46	124.9	131.26	138.79	147.7	158.08	169.74	182.11	194.34	205.62	215.52	223.96	231.08	237.12	242.3	246.82	250.84
28/02	104.65	108.4	112.55	117.26	122.7	129.13	136.83	146.06	156.99	169.45	182.74	195.82	207.72	217.97	226.56	233.71	239.73	244.86	249.33	253.31
01/03	104.02	107.76	111.91	116.61	122.06	128.5	136.24	145.57	156.68	169.39	182.98	196.32	208.4	218.75	227.37	234.52	240.52	245.63	250.08	254.04
07/03	102.09	105.81	109.94	114.61	120.06	126.55	134.42	144.06	155.73	169.28	183.85	198.05	210.69	221.3	229.98	237.1	243.01	248.04	252.41	256.32
14/03	99.8	103.49	107.57	112.2	117.61	124.12	132.14	142.15	154.55	169.26	185.19	200.52	213.81	224.65	233.33	240.33	246.11	250.99	255.26	259.08

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Perla Marlene Viera González

Candidata para el grado de
Doctor en Ingeniería Física Industrial

Tesis:

DISEÑO DE UN COLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR
BASADO EN LENTES DE FRESNEL ANIDÓLICOS PARA
APLICACIONES DE ILUMINACIÓN

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. 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, durante el periodo 2012 - 2014, realizó sus estudios de Maestría en Ingeniería Física Industrial, donde se graduó con honores y su tesis fue ganadora del XXV Certámenes Nacionales de Tesis por parte del Instituto de Investigaciones Eléctricas.