



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“COLECTORES DE LUZ PARA SISTEMAS
DE ILUMINACIÓN CON FIBRAS ÓPTICAS”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ELÉCTRICA-INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A :

ORAÉL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. AUGUSTO GARCÍA VALENZUELA

MÉXICO 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Dios quien me da la vida y la oportunidad de concluir una etapa más en mi preparación profesional.

A Verónica mi esposa por apoyarme y alentarme para llevar acabo mis estudios hasta el día de hoy.

A mis padres Adolfo y Cristina por el apoyo y consejos que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi Tía Aurora su apoyo incondicional para lograr una meta más en mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, la cual me brindo y permitió prepararme con los estudios de Maestría.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico por brindarme sus instalaciones y equipo para realizar mi estudios.

Agradezco al Dr. Augusto García Valenzuela, quien siendo mi tutor me ha dado un gran apoyo para el desarrollo de este proyecto y que a pesar de sus diversas actividades me ha brindado su tiempo, conocimientos, instrucción, experiencia y consejos que he tomado y valorado durante el desarrollo de mis estudios y estancia en el CCADET.

Agradezco a la Dra. Celia Sánchez Pérez, por el tiempo, conocimiento y comentarios constructivos que ha brindado durante el desarrollo de mi tesis.

Agradezco al Dr. Eduardo Sandoval Romero, a la Dra. Graciela Velasco Herrera y al Dr. Pablo Pérez Alcázar, por el conocimiento que me han compartido y transmitido. Así también les agradezco por el tiempo que invirtieron para revisar, corregir y sugerir en el contenido y la edición de esta tesis.

Agradezco al Proyecto PAPITT IN-116106 por el apoyo y recursos que recibí durante el desarrollo de mis estudios, permitiéndome culminar el presente trabajo.

El científico no tiene por objeto un resultado inmediato. Él no espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir, y señalar el camino

Nikola Tesla

El futuro pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños

Eleanor Roosevelt

En cuanto al futuro, tu tarea no es predecirlo, sino hacerlo posible.

Antoine de Saint-Exupery

ÍNDICE

	Página
Prefacio	1
Capítulo 1 Estado del arte	
Introducción	4
1 Sistemas Colectores y Concentradores de Luz	4
1.1 Colectores y Concentradores Especulares	6
1.2 Celdas Solares	9
1.3 Concentradores de óptica de Volumen	12
Capítulo 2 Recursos Solares y Fotometría	
Introducción	14
2 Radiación Solar, Irradiancia y Constante Solar	14
2.1 Fotometría y unidades	19
2.2 Esfera integradora	20
Capítulo 3 Concentradores de Luz y Concentradores Parabólicos Compuestos	
Introducción	22
3 Principios y Bases Ópticas	22
3.1 Concentradores Refractivos	25
3.2 Concentrador Parabólico Compuesto	27
3.3 Concentrador Cilíndrico Parabólico y Disco Parabólico de Concentración	28
3.4 Concentradores de Luz Difusa	29
Capítulo 4 Principio de un sistema colector de luz difusa	
Introducción	32
4 Metodología	32
4.1 Consideraciones para el diseño	33
4.2 Implementación	35
4.3 Caracterización Experimental	35
Capítulo 5 Adaptación de una Cavidad Lambertiana a un Colector de Luz	
Introducción	48
5 Implementando una Cavidad Lambertiana a un Sistema Colector de Luz	49
5.1 Pruebas Experimentales de los Prototipos	54

Capítulo 6 Conclusiones

6	Conclusiones	66
6.1	Perspectivas de la línea de Investigación	69

Anexos

	Bibliografía y Referencias	70
--	----------------------------	----

PREFACIO

En la actualidad uno de los factores principales que han permitido mejorar el estilo de vida de los seres humanos, es el avance de la ciencia y la tecnología. Todo esto es posible gracias a la mejora continua de los sistemas. Los sistemas están conformados de diversos tipos de componentes, ya sean partes mecánicas, eléctricas, electrónicas, ópticas, etcétera, todas integradas en un solo ente y es a lo que denominamos maquinas u herramientas, muchas de ellas llamadas invenciones. El conocimiento adquirido a través del tiempo y cada uno de los avances logrados ha permitido al ser humano su desarrollo y realización. Al pasar de los siglos el hombre ha emprendido una carrera tecnológica en la cual ha creado maquinas y herramientas que permiten la transformación y aprovechamiento de nuestros recursos naturales. Sin embargo la mala administración de los recursos y los incrementos de la contaminación ambiental ha hecho que nuestro planeta se vea envuelto en una serie problemas. Cada día nuestros recursos no renovables como los hidrocarburos se agotan, su demanda excesiva y su existencia limitada, ha orillado a que los científicos enfoquen sus líneas de investigación al desarrollo de nuevas tecnologías en búsqueda de fuentes alternativas de energía. Las corrientes de aire, la luz del sol, las mareas y la biomasa son energías abundantes en la naturaleza y que aparentemente no tienen un límite bajo la concepción humana. La idea de utilizarlas causaría gran impacto en nuestro medio ambiente, ya que son fuentes de energía no agresivas y son fuentes completamente sustentables a futuro. Es ahí donde este trabajo trata de aportar una solución al aprovechamiento de energía solar como fuente de iluminación de interiores.

La energía solar es uno de los recursos naturales más abundantes e ilimitados, está presente en la naturaleza para ser utilizada como energía luminosa, eléctrica ó térmica. Al utilizar la energía solar y transformarla en energía térmica, energía eléctrica o bien como energía luminosa, se ha de requerir de un diseño eficiente. Cada uno de los sistemas para uso de energía solar tendrá metas diferentes pero todos tienen un objetivo en común que es obtener la mayor cantidad de energía posible de la luz incidente en la tierra. La idea central de este trabajo es iluminar infraestructuras subterráneas o aquellas carentes de entradas de luz natural, ya sea por medio de sistemas colectores y concentradores de luz o bien por tuberías de luz (*Lightpipes*). El objetivo principal de esta tesis es obtener un diseño que aumente la eficiencia de los sistemas comerciales y que permita la captura de la radiación difusa de una forma más eficiente. Hay que mencionar que este trabajo contribuirá al ahorro de recursos naturales y que tiene finalidades tanto ecológicas como de salud, la primera por que reducirá la producción de gases invernadero generados en la producción de energía eléctrica, la segunda porque permite un ahorro de energía eléctrica al no utilizar fuentes de iluminación artificiales. Finalmente en cuanto a salud se trata, los sistemas de iluminación natural suplen la necesidad indispensable de las personas y seres vivos de recibir luz solar. En el caso del ser humano evita algunas enfermedades y la asimilación de vitaminas así como de sustancias necesarias para procesos naturales. De manera que el presente trabajo se orienta al diseño de un sistema colector de luz solar mas eficiente en condiciones de luz difusa. Se incluyen propuestas de arreglos de guías de onda que permiten la transmisión de luz de manera mas eficiente, aunado a esto se presenta el diseño, desarrollo, características y su conveniente uso e implementación.

El manuscrito de esta tesis presenta en el primer capítulo el estado del arte en el que se presentan las tecnologías y los sistemas mas utilizados en la actualidad, especialmente para sistemas de colección y concentración de energía solar en el área de producción de energía eléctrica e iluminación. El segundo capítulo tratará la importancia de la energía solar como una fuente inagotable de energía, también se enfatizara las propiedades de esta clase de energía, la manera en la que se puede aprovechar y algunas técnicas para medir el flujo de luz. En el tercer capítulo se explicarán los principios de los sistemas de concentración de luz solar más utilizados en la industria de la energía solar. En el cuarto capítulo encontraremos la aportación de esta investigación la cual consiste en una nueva propuesta de un sistema complementario, el cual permite aumentar la eficiencia de los sistemas actuales para iluminación, es aquí donde se analizan las diferentes variantes y las posibilidades que permiten el máximo aprovechamiento de la radiación solar con la propuesta realizada. Finalmente en el capítulo 5 se analizarán los resultados obtenidos de los diferentes prototipos implementados y se plantean nuevas propuestas para ser implementadas y aplicadas a los sistemas comerciales con la finalidad de aumentar su desempeño y eficiencia. Al final del presente manuscrito se abordan las propuestas y expectativas de trabajo a futuro concluyendo cual será la línea de investigación a seguir para dar continuidad a esta investigación.

Capítulo 1

Estado del Arte

En la actualidad existen diversos sistemas para la colección y la concentración de luz utilizándola para generar energía calorífica o bien energía eléctrica o simplemente como iluminación natural. Cada uno de los sistemas existentes son utilizados con fines distintos, brindando diferentes ventajas de acuerdo a su diseño y características. Su selección depende de su aplicación; sin embargo la eficiencia es uno de los factores más importantes para la creación de nuevos diseños. Por lo cual nuestro punto de partida se enfoca al estudio de las tecnologías y diseños actuales en cuanto a sistemas concentradores y colectores de luz solar. A continuación se da un breve panorama del estado del arte de estos sistemas.

1 Sistemas Colectores y Concentradores de Luz

Los diferentes sistemas que son utilizados para coleccionar y concentrar luz tienen características específicas que los sitúan en alguna aplicación en particular. Llamaremos “radiación” o “luz” a la energía solar que es emitida por el sol y que se manifiesta por medio de fotones que emanan de él. Habrá que remarcar la diferencia que existe entre un sistema colector y un sistema concentrador. Un sistema colector es todo aquel que captura o absorbe la luz, en algunos casos teniendo la capacidad de redirigir la luz a una superficie de igual o mayor tamaño que donde ésta incidió primeramente. Ahora bien, un sistema concentrador es aquel que captura, redirige y confina la luz en un área mas pequeña que en el lugar donde

incide inicialmente. Al convertir la luz solar en energía eléctrica ó calorífica, uno seleccionará algún diseño ó sistema en particular teniendo especial atención en las ventajas y desventajas del sistema según la aplicación. Un sistema concentrador muy comúnmente utilizado es una lente la cual se utiliza en una gran variedad de configuraciones. La concentración que se obtiene con las lentes depende de su superficie, la apertura numérica y la transmitancia de la lente. Otro sistema colector muy común en la actualidad son las celdas solares generalmente utilizadas para producir energía eléctrica. Su desempeño depende del diseño y la calidad de los materiales con los que se fabrican. Para las celdas solares la eficiencia está en función de la cantidad de energía eléctrica que transforman a partir de la cantidad de energía solar que éstas reciben en un área determinada. Las celdas solares pueden o no tener sistemas de seguimiento solar para aumentar su eficiencia, e incluir algún tipo de concentrador de luz. Por otra parte existen los sistemas de superficies parabólicas reflectoras o bien espejos que son usualmente utilizados en los helióstatos o torres de concentración, que se utilizan para obtener altas temperaturas y generar electricidad. Generalmente son sistemas activos y dinámicos debido a que incluyen el seguimiento solar. En último lugar, en una menor escala de concentración se encuentran los sistemas a los que denominaremos compuestos, ya que utilizan combinación de elementos como son lentes y superficies reflectoras para concentrar la luz. Se habla de una escala menor debido a que la energía concentrada se utiliza como tal para iluminación evitando la transformación de la misma. Al igual que los anteriores utilizan sistemas activos de seguimiento del sol que optimizan su desempeño. En la siguiente sección analizamos el desempeño de todos estos sistemas.

1.1 Colectores y Concentradores Especulares

En la actualidad los reflectores especulares son uno de los tipos de colector de luz solar más comúnmente utilizados, a estos reflectores comúnmente se les conoce como espejos. Los espejos pueden clasificarse como planos, esféricos, parabólicos hiperbólicos y de superficie. Los espejos planos se utilizan para formar los helióstatos o bien torres de concentración, aunque por sí solos no tienen la característica de ser concentradores solares. Los discos o platos parabólicos tienen la característica de ser concentradores de luz solar y frecuentemente se emplean en hornos solares. Estos pueden ser fabricados en sola pieza o bien por medio de múltiples superficies especulares Fig 1.1 (a y b). Dado que su principio se basa en la teoría paraxial, podemos obtener el comportamiento de estas superficies por un simple trazo de rayos. En la Fig. 1.1 (c) se observa como los rayos paralelos al eje óptico del sistema se concentran en su foco, dada la característica geométrica de la parábola, el mismo efecto sucederá en concentradores parabólicos de 2D como se muestra en el corte transversal de la Fig 1.1 (c). Los sistemas de tipo parabólico se utilizan frecuentemente para concentrar el flujo solar y obtener energía

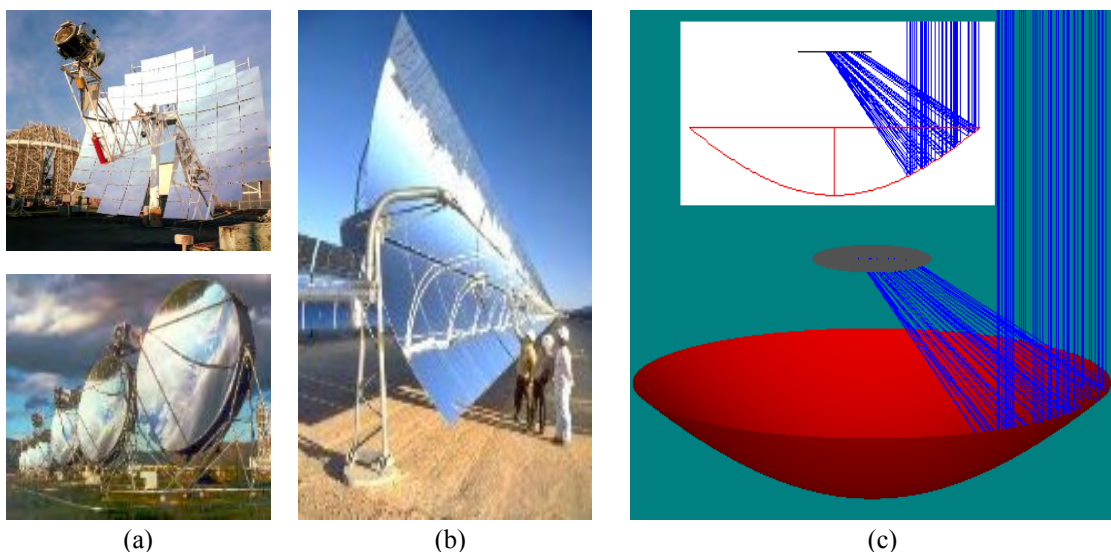


Fig. 1.1 Ejemplos de sistemas concentradores: a) Discos concentradores de tipo parabólico 3D, b) Concentrador de tipo parabólico 2D EUCLIDES y c) Esquema del funcionamiento de un disco parabólico por medio del trazo de rayos.

térmica, con la finalidad de generar energía eléctrica por medio de un ciclo Stirling^[1]. El sistema EUCLIDES es un ejemplo de un concentrador de tipo parabólico (Fig 1.1 (b)), utilizado para generar energía eléctrica, EUCLIDES fue desarrollado en el Instituto Español de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid (IES-UPM), y es capaz de producir 480kW. Otra aplicación en la que se emplean los platos parabólicos es en sistemas de iluminación, donde el flujo de luz concentrado en el foco del sistema se acopla a un manojo de fibra óptica ^[2,3] para ser guiado al interior de las construcciones. En la actualidad las soluciones que se han encontrado para aumentar la eficiencia de esta clase de sistemas son: el aumentar la razón de concentración, e incrementar la calidad de la reflectividad y durabilidad de la superficie reflectora ^[4,5]. De lo anterior podemos decir que la razón de concentración ($C=A_i/A_s$) está definida por el cociente entre el área de la abertura (A_i) de entrada y el área del receptor (A_s) ^[6,7]

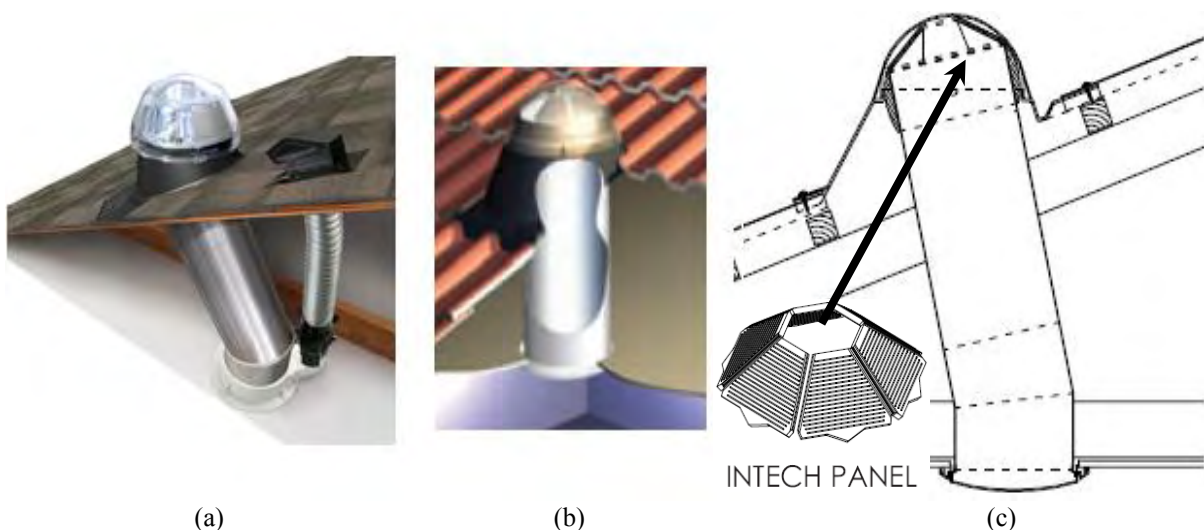
En las torres de concentración se utilizan una gran cantidad de espejos formando arreglos de tipo parabólico con la finalidad de concentrar y aumentar el flujo en un área determinada. Las torres se emplean para generar electricidad por medio de ciclos termodinámicos, ya sean Rankie o Carnot^[7]; cada uno de estos procesos requiere para su funcionamiento energía térmica la cual se consigue al concentrar y



Fig. 1.2 Hornos solares: (a) Horno solar en Almería España, (b) “Solar Two” la cual es una torre de concentración en el Desierto de Mojave, California.

redirigir en una cierta área una alta cantidad de flujo de radiación solar. Las torres de concentración obtienen toda esta energía gracias a los múltiples espejos que se enfocan en un área específica. En la Fig. 1.2 se muestran algunos de estos sistemas, donde cada uno de los espejos posee un sistema independiente de seguimiento solar. El incremento del flujo en las torres se eleva hasta de 20,000 hasta 100,000 soles ^[6] (Un sol es la unidad para expresar flujo solar la cual expresa un flujo de 1000 W/m²). Las diferentes capacidades dependen de la razón de concentración, la reflectividad de las superficies y del seguimiento correcto del flujo solar.

En la industria de la iluminación la idea de superficies reflectoras también es explotada, Solatube y Skydome producen sistemas tubulares denominados *Lightpipe*^[8,9] (Fig 1.3). El enfoque que se tiene es el de transportar luz solar por medio de tuberías de alta reflectividad interna que permitan llevar la iluminación natural a interiores. Algunos de los diseños de Solatube que se encuentran en venta, consisten de sistemas servoactivos que incluyen espejos con seguimiento solar para incrementar la cantidad de luz capturada. En el caso de Skydome utiliza su tecnología *Intech Panel* ^[9] (Fig. 1.3c), la cual se usa un dispositivo de tipo panel



(a) (b) (c)
 Fig. 1.3. Sistema de tipo *Lightpipe*: (a) Solatube, (b) Sistema Skydome, (c) corte transversal del sistema ST250 de Skydome.

en forma hexagonal, el dispositivo captura la luz a baja elevación proveniente de cualquier dirección aumentando especialmente el desempeño por las mañanas y las tardes. Aunque una limitante es la longitud del tubo y su diámetro, el cual no excede los 50 cm. Esto significa que la cantidad de flujo radiante que puede entrar es realmente reducida, y dependerá de la posición en la que se encuentre con respecto al sol, la reflectancia y longitud del tubo. Por ello no se considera como un sistema de concentración, si no mas bien como un sistema transportador de iluminación natural.

1.2 Celdas Solares

Las celdas solares son conocidas como colectores de placas planas, las cuales están fabricadas principalmente de silicio y constituyen una de las tecnologías más utilizadas para el aprovechamiento de la energía solar en la actualidad. Su uso en generación de energía eléctrica se ha extendido alrededor del planeta y el avance de la tecnología y la microelectrónica ha hecho su fabricación más accesible y económica. Sus eficiencias se encuentran alrededor del 13 al 22 % ^[10-12] con un promedio de eficiencia de 15%. Los nuevos sistemas propuestos tienen expectativas de incrementar las eficiencias por encima del 33 %. La solución que han encontrado para ello es aplicar Celdas Fotovoltaicas (*Photovoltaic Cells, PVC*) de múltiples capas por medio de la implementación de diferentes materiales como: Ge, GaAs y GaInP₂ ^[13,14]. Algunos otros investigadores proponen el uso de materiales con SiO₂, Ti, Al, Ag con eficiencias similares sin embargo; aun se encuentran en desarrollo ^[15-16]. Los diferentes tipos de materiales permiten absorber y transformar luz en un ancho espectral mayor como se esquematiza en la Fig. 1.4. El diseño de esta generación de PVC se fundamenta en colocar diferentes capas de materiales que permitan absorber la radiación solar en diferentes anchos espectrales, de manera

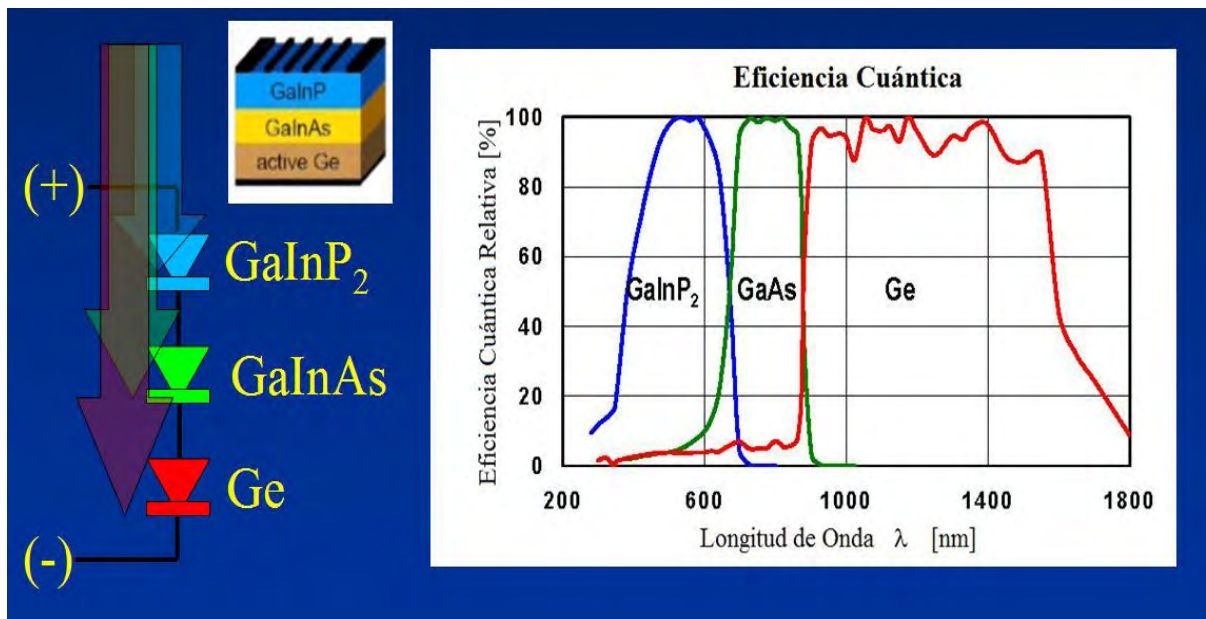


Fig. 1.4 Esquema y espectro de absorción de una celda fotovoltaica (PVC)

que la transformación de los fotones en energía eléctrica se extienda en todo el ancho espectral que el sol emite. En la búsqueda de mayores eficiencias, los diseñadores han impulsado el desarrollo de sistemas de concentración implementados a las celdas solares. Los ejemplos más utilizados para la concentración de luz son las lentes simples, las lentes de Fresnel y las superficies reflectoras. El principio de funcionamiento de las lentes se basa en enfocar los

rayos paralelos al eje óptico en su punto

focal, es ahí donde es colocada la PVC para capturar la luz solar concentrada (Fig 1.5)

[17]. Por otra parte las superficies reflectoras de tipo parabólico son empleadas para concentrar la radiación solar en una pequeña área donde se coloca la PVC. Los diseños implementados a la fecha por la compañía SOLFOCUS utilizan

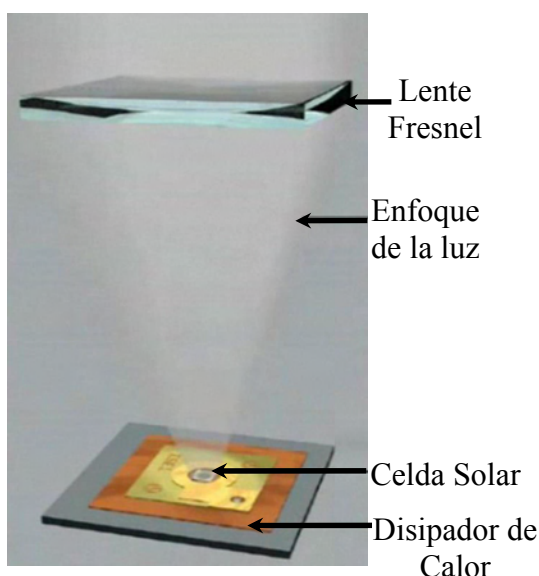


Fig. 1.5 Sistema lente Fresnel-PVC

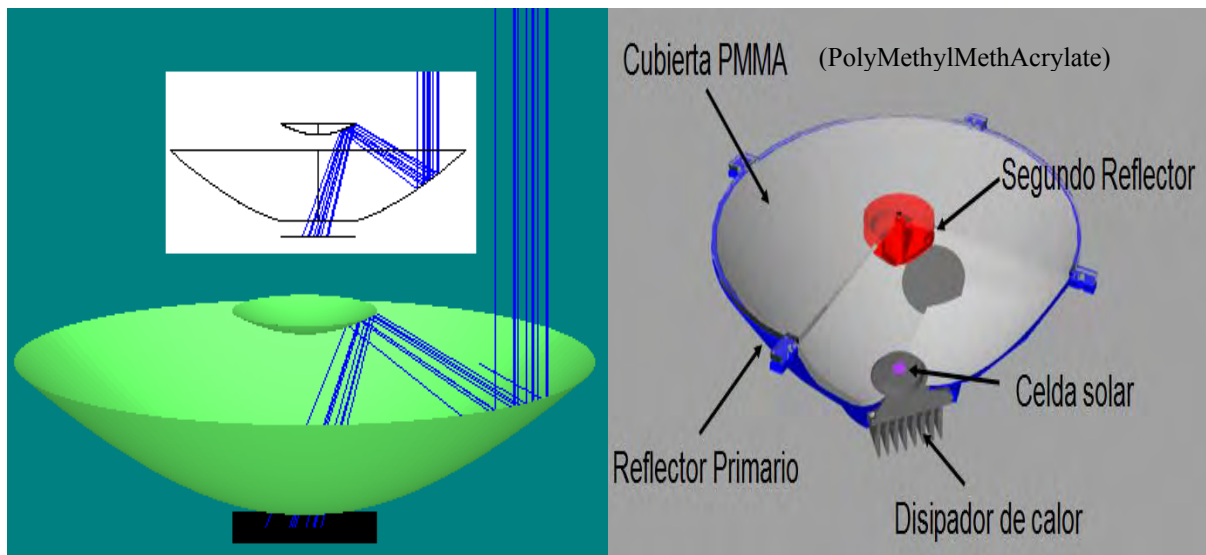


Fig. 1.6 Diseño de reflector utilizado en las PVC para aumento de eficiencia.

dos reflectores y su funcionamiento es como el de los telescopios Cassegrain. El principio consiste en concentrar en un segundo reflector la radiación incidente del primer reflector proporcionando así una mayor concentración del flujo solar en la celda solar (Fig. 1.6). Las ventajas observadas al implementar los sistemas de concentración a las PVC de nueva generación, son el aumento de eficiencias para convertir la luz solar en energía eléctrica y la disminución en la cantidad de PVC utilizadas. Los únicos inconvenientes que se han encontrado en el uso de este tipo de colectores de luz son la eficiencia térmica ^[18] y las altas temperaturas debidas a la concentración que puede dañar la PVC, para ello emplean enfriadores o disipadores de calor Fig. 1.6. La eficiencia térmica se refiere a que cuando existe una mayor transferencia de energía luminosa en calor, se pierde la eficiencia de las celdas solares, ya que al aumentar su temperatura se requerirá mayor cantidad de fotones para producir un flujo de electrones ^[18]. Las mejoras implementadas a las PVC prometen aumentar la eficiencia muy cerca del 40 % ^[17,19], lo que llevaría a un gran avance en el aprovechamiento de la energía solar en sistemas de producción de energía eléctrica. Algunas líneas de investigación proponen utilizar Concentradores Parabólicos Compuestos CPC (*Compound Parabolic Concentrator*)

para aumentar la eficiencia y capacidad de concentración ya sea en volúmenes de vidrio o superficies de revolución. La diferencia radica en que estos sistemas utilizan el fenómeno de la reflexión total interna al emplear materiales dieléctricos como el vidrio para así fabricar concentradores sólidos en el siguiente apartado se describen esta clase de concentradores.

1.3 Concentradores de Óptica de Volumen

La óptica de volumen ha tomado importancia para el desarrollo de concentradores de luz como es el caso de la compañía Isuzu Glass quien incorpora concentradores tipo CPC (Compound Parabolic Concentrator) a las celdas solares ^[20] (Fig. 1.7) de manera que se garantiza la concentración de luz que se recibe dentro de un determinado cono de aceptación^[6]. El ángulo de aceptación significa el ángulo máximo de incidencia respecto a su eje óptico, en el cual se garantiza que la luz atravesará el puerto de salida del sistema. El CPC de Isuzu es un ejemplo muy claro de un concentrador de volumen, sin embargo existen otros tipos de concentradores que se han utilizado desde hace mucho tiempo, me refiero a las lentes simples como

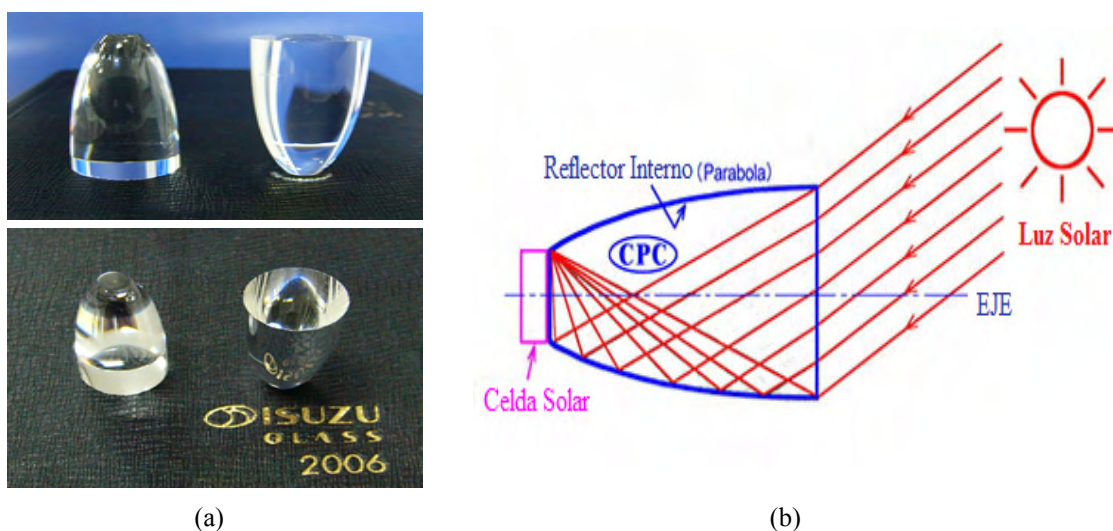


Fig. 1.7 Imagen de CPC de vidrio fabricado por Isuzu: (a) Imagen real del CPC, (b) diagrama de la implementación de un CPC de vidrio a una celda solar.

son las biconvexas o bien las lentes de Fresnel, las cuales al ser acopladas a fibras ópticas pueden ser utilizados como concentradores solares ^[21]. Las dimensiones de los arreglos resultantes son a mediana escala dando la ventaja de ser modulares y escalables. Utilizando esta idea de concentración de luz, Parans diseña sus sistemas SP1 y SP2. El SP2 utiliza lentes de Fresnel y sistemas mecánicos activos que permiten un buen seguimiento solar (Fig. 1.8) ^[21,22]. La concentración de la luz por la lente es llevada a una fibra óptica la cual conducirá a la luz solar a una luminaria. La luminaria es un difusor que esparce la luz, esta clase de sistemas son llamados de iluminación solar de fibra óptica. Los sistemas confinan en 1 m² 64 lentes, cada una de ellas concentrando la luz en una fibra óptica de 0.75 mm de diámetro cuya eficiencia de transmisión es de 95.6 % ^[22]. Al igual que los demás sistemas estos poseen un cono de aceptación de $\pm 60^\circ$ con respecto a su eje óptico. Las eficiencias para días soleados oscila alrededor del 14% ^[22], sin embargo dejan de funcionar y transmitir la luz cuando existe nubosidad debido a que funcionan esencialmente con radiación directa del sol. Ésta problemática existente en dichos sistemas, es la motivación del presente trabajo, para la búsqueda de soluciones que permitan aumentar la eficiencia, la cantidad de luz colectada y concentrada por los sistemas de iluminación como es caso del SP2.



Fig. 1.8 Sistema SP2 de Parans Solar Lighting, compañía Sueca.

Capítulo 2

Recursos Solares y Fotometría

En este capítulo se explicaran conceptos como radiación, irradiación, constante solar, ángulo de incidencia y todo lo concerniente al movimiento del sol y el aprovechamiento que se puede obtener al conocerlo.

2. Radiación Solar, Irradiancia y Constante Solar

Desde tiempos antiguos los cuerpos celestes han cautivado la atención del ser humano, y es a través de la astronomía que el ser humano estudia el movimiento y características de estos cuerpos celestes. Las estrellas son algunos de los cuerpos celestes estudiados, nuestro sol es uno de ellos y tiene alrededor de más de 5000 millones de años asignándole la edad de una estrella joven. Durante su vida el sol ha producido gran cantidad de energía luminosa a través de las reacciones nucleares que se llevan acabo en él. Esta energía proviene de la fusión de átomos de deuterio para dar átomos de helio, energía que se percibe como una radiación electromagnética o como coloquialmente la llamamos Luz. La Tierra recibe en el exterior de su atmósfera una potencia total de 1.73×10^{14} [kW] ^[7]. La magnitud tan inmensa de energía hace considerar al sol como una fuente inagotable de energía bajo la perspectiva humana. La radiación es emitida en toda la gama del espectro electromagnético, pero debido a los efectos de la fonosfera el flujo del sol corresponde a la radiación de un cuerpo negro, 6000 K. Es por ello que casi la mitad de la energía solar que recibimos se encuentra en la región visible del espectro. La distribución temporal de la energía que alcanza la superficie es muy irregular, ya que no solo varía la insolación máxima diaria (las horas en la que el sol

se encuentra arriba del horizonte) sino que la radiación se atenúa de acuerdo a la composición de la atmósfera que atraviesa. Es por ello que solo alrededor de un 47% de la radiación incidente en la atmósfera terrestre alcanza la superficie terrestre [7]. El 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser dispersada por el polvo en suspensión, el vapor de agua y las moléculas del aire [7]. El 53% de la energía restante es reflejada al exterior o absorbida por la atmósfera.

La potencia de radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como irradiancia (I_s) y se expresa en W/m^2 . El valor de la irradiancia en un plano exterior a la atmósfera y normal a los rayos del sol a una distancia media Tierra-Sol se conoce como *Constante Solar* (S_s). El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es de 1.353 kW/m^2 . El 5% de esta energía se encuentra en longitudes de onda menores a $0.38 \mu\text{m}$, el 49% en un intervalo de longitudes entre $0.38 \mu\text{m}$ y $0.78 \mu\text{m}$ y el 46% restante para longitudes de onda mayores de $0.78 \mu\text{m}$ [7]. La atenuación que sufre la radiación debido a la atmósfera por efectos de refracción, reflexión y absorción, atenúa la irradiancia a un valor de 1.000 kW/m^2 en la superficie terrestre.

Es posible establecer la diferencia entre la radiación directa (I_D) y la radiación difusa (I_s) que son las radiaciones recibidas en la superficie terrestre. La primera es aquella que no sufre ningún cambio al atravesar la atmósfera y llega a la superficie en la dirección del disco solar. La segunda procede del resto de la bóveda celeste debida a la dispersión de Rayleigh, del polvo y aerosoles. El porcentaje que se refleja en una superficie respecto del total incidente es conocido como la reflectividad y se encuentra en función de la longitud de onda. Hay que tener presente que la reflectividad del entorno influye directamente en la radiación difusa. En el aprovechamiento de la energía solar es importante conocer las diferentes

magnitudes de irradiancia que existen alrededor de nuestro planeta, para así poder aprovecharla. Ciertamente el seguimiento solar (SS) es una parte fundamental de los sistemas solares, ya que éste permite el máximo aprovechamiento del flujo directo del sol. El SS puede ser en un plano o bien en dos, dependerá del diseño del concentrador y de la aplicación que se esté utilizando. Las ventajas de usar un SS es que aumentan la cantidad de energía obtenida con respecto a un sistema estático. Sin embargo depende del tipo de radiación y de la posición del sol a lo largo del año y durante el transcurso del día. El factor más importante que determinará la incidencia de radiación sobre un captador solar es la trayectoria del sol a través de la bóveda celeste, el tomar en cuenta cada uno de los factores que intervienen en el movimiento del sol influirá directamente en la eficiencia del sistema. Sin embargo, no es la meta de este trabajo el desarrollar los modelos matemáticos de seguimiento solar, ya que en la actualidad existen en manuales técnicos [7,23-24].

Para el diseño de sistemas de concentración y colección solar lo que cuenta principalmente es el flujo directo que incide en el sistema; por lo cual es importante conocer la posición del sol a través de los diferentes sistemas de referencia. Existen dos tipos de coordenadas, las horarias (Fig.2.1a) y las horizontales (Fig.2.1b).

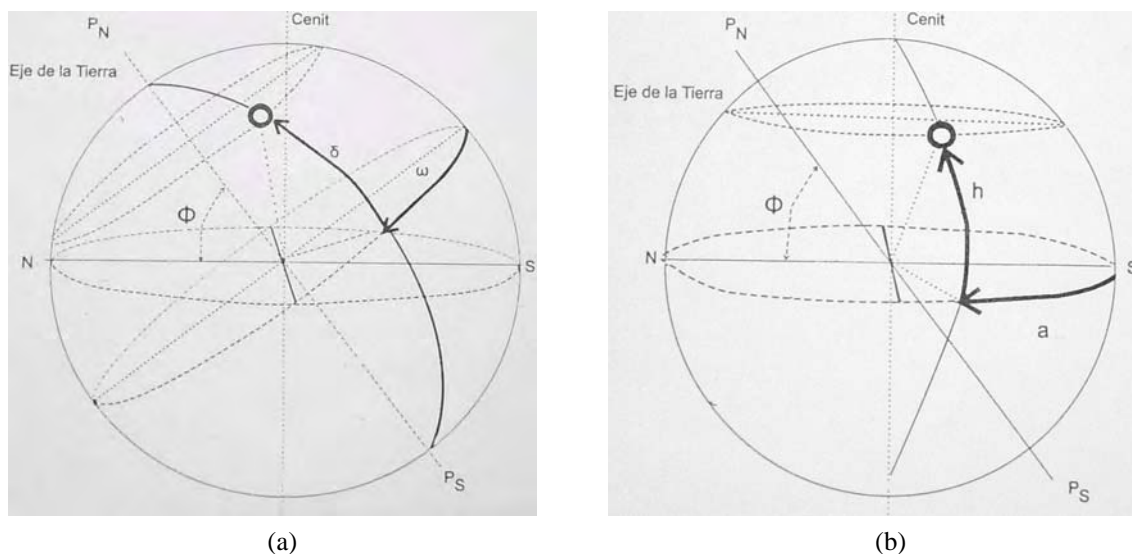


Figura 2.1 Esquemas para: (a) Coordenadas horarias, (b) coordenadas horizontales.

Las primeras están definidas por la declinación solar (δ_s) y el ángulo horario solar (ω_s), siendo δ_s la posición angular del sol al medio día solar, con respecto al plano del Ecuador terrestre. Mientras que ω_s es el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar. Las expresiones que definen a las coordenadas son:

$$\omega_s = (\text{horasolar} - 12h) / 15^\circ \quad [^\circ],$$

$$\text{donde la } \text{horasolar} = \text{horasolarlocal} + 4(\text{min}/^\circ)(L_{\text{Ref}} - L_{\text{loc}}) + \Delta t.$$

En la ecuación anterior L_{Ref} es la longitud geográfica, L_{Loc} es la longitud del meridiano local $[^\circ]$, y $\Delta t = 9.87 \sin^2 B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$, siendo $B(^\circ) = 360(J - 81) / 364$. Δt es una corrección necesaria debido a que el sol se adelanta y retrasa respecto a la hora solar media.

$$\delta_s = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{248 + J}{365}\right) \quad [^\circ],$$

J es el día Juliano del año.

Las coordenadas horizontales (Fig.2.1b) están definidas por la altura solar (h_s) y el acimut solar (a_s). La altura solar es el ángulo que forma la radiación solar directa y el plano del horizonte. El acimut solar es el ángulo que forma la radiación directa solar y el meridiano del observador, cabe hacer notar que se toma como origen el acimut del medio día solar. Utilizando trigonometría esférica calculamos las coordenadas horizontales a partir de las coordenadas horarias, relacionadas mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sin(h_s) &= \sin \phi \sin \delta_s + \cos \phi \cdot \cos \delta_s \cdot \cos \omega_s \\ \sin(h_s) \cdot \cos(a_s) &= \sin \phi \cdot \cos \delta_s + \cos \omega_s - \cos \phi \cdot \sin \delta_s \\ \sin(h_s) \cdot \sin(a_s) &= \cos \phi \cdot \sin \omega_s \end{aligned}$$

Donde ϕ es la latitud del lugar.

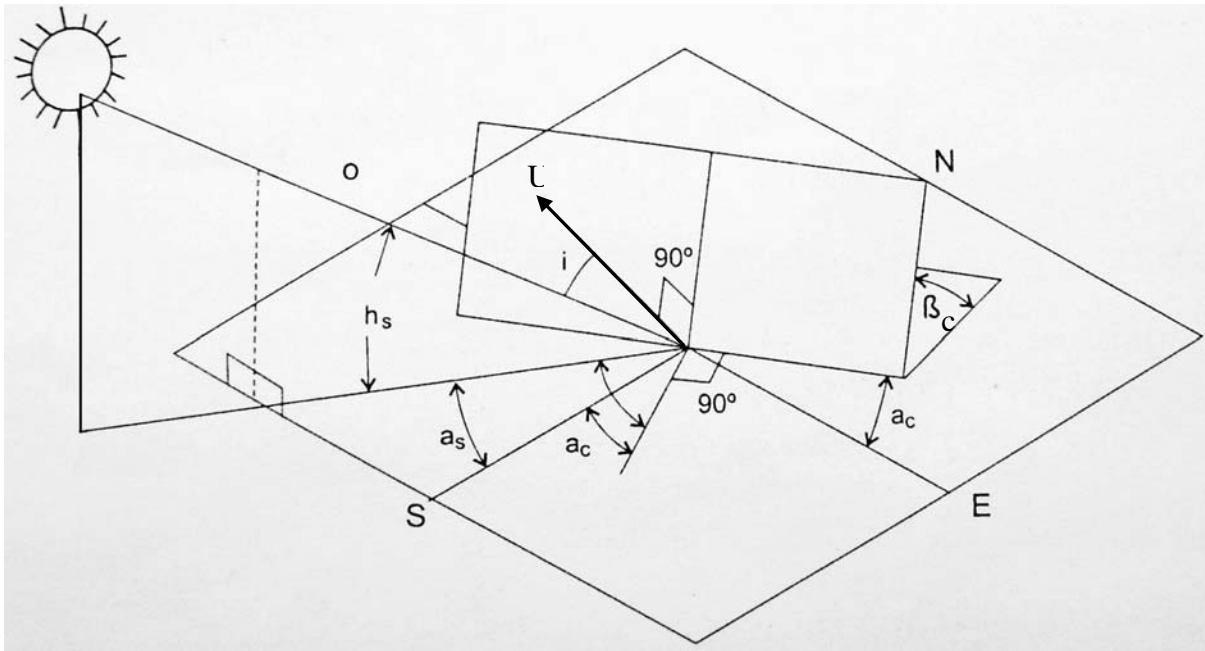


Figura 2.2 Definición del ángulo de incidencia sobre un plano inclinado y orientado.

Ahora bien, las relaciones de la página anterior son útiles para obtener la orientación de un captador, la cual se determina a partir de las coordenadas del vector director U , perpendicular a él. Este vector queda definido por el ángulo cenital que coincide con la inclinación del plano (β_c) Fig. 2.2. Se define el ángulo de incidencia como el ángulo que forma la radiación solar directa con el vector director del plano. Debe tomarse en cuenta que la irradiancia recibida sobre un plano inclinado dependen del ángulo de incidencia (i) de los rayos solares sobre éste. El ángulo de incidencia sobre un plano depende de las coordenadas horarias del sol (δ_s, ω_s), según la expresión trigonométrica [7]:

$$\cos(i) = \sin \delta_s \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta_c - \sin \delta_s \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta_c \cdot \cos(a_c) + \cos \delta_s \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta_c \cdot \cos \omega_s + \cos \delta_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta_c \cdot \cos(a_c) \cdot \cos \omega_s + \cos \delta_s \cdot \sin \beta_c \cdot \sin(a_c) \cdot \sin \omega_s$$

Haciendo uso de las coordenadas horizontales del sol (a_s, h_s), la ecuación se simplifica notablemente:

$$\cos(i) = \sin(h_s) \cdot \cos \beta_c + \sin(h_s) \cdot \sin \beta_c \cdot \cos(a_s - a_c),$$

donde h_s es la altura solar, a_s es el acimut solar y ϕ es la latitud del lugar. Con estas expresiones podemos conocer la inclinación óptima en la que el colector deberá de

colocarse. En la siguiente sección se muestran las unidades con las que se trabaja en el área de energía solar.

2.1 Fotometría y Unidades.

El área que se encarga de cuantificar y definir los conceptos de flujos luminosos es la Fotometría, la cual se auxilia de instrumentos o sensores capaces de registrar magnitudes energéticas y fotométricas con la finalidad de apreciar la energía luminosa. En el caso de las aplicaciones solares se emplean los piranómetros y pirheliómetros. No obstante, en el laboratorio se emplean fotodetectores o fotosensores que en conjunto con sistemas electrónicos permiten conocer las magnitudes físicas y la cantidad de energía luminosa que hay en un medio. Con la finalidad de comprender los conceptos básicos y la terminología utilizada en el área fotométrica, definiremos algunos de los conceptos más importantes.

Los conceptos que definiremos son:

Flujo Radiante: Es la potencia media de la radiación óptica durante cierto intervalo de tiempo t , considerablemente mayor que el periodo de las oscilaciones luminosas, y se mide en Watts [W].

Luminancia energética (Radiancia): Es la densidad superficial de la intensidad luminosa en una dirección dada. Puede ser diferente para diversos elementos de la superficie radiadora. Por esta razón para valorar la luminancia de un elemento de

área dS con una intensidad dI en una dirección dada se aplica; $B = \frac{dI}{dS \cos \theta_i}$ [25,26],

sus unidades son $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. Donde la intensidad se define como el flujo radiante por

ángulo sólido: $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$

Illuminancia energética (Irradiancia): Es la densidad de flujo radiante que incide, que emerge, o que atraviesa una superficie específica: $E = \frac{d\Phi}{ds}$ [25,26] y sus unidades son $W \cdot m^{-2}$.

2.2 Esfera Integradora.

Un instrumento muy útil en óptica para medir reflectancia y transmitancia difusa de los materiales son las esferas integradoras. Una esfera integradora es en esencia un recinto para contener y esparcir la luz entrante, donde la luz se propaga igualmente sobre toda el área de la superficie de la esfera. Este esparcimiento es completado a través de dos mecanismos: una superficie de reflectancia lambertiana y un contorno esférico. Una reflectancia lambertiana tiene una reflectividad ideal del 100% y es completamente uniforme la propagación angular de la luz [27,28]. Lo anterior es mostrado en la Fig. 2.2, donde el rayo representa una radiación incidente I_0 . En caso de que la radiación incida con un ángulo θ_i , la irradiancia variará con el ángulo

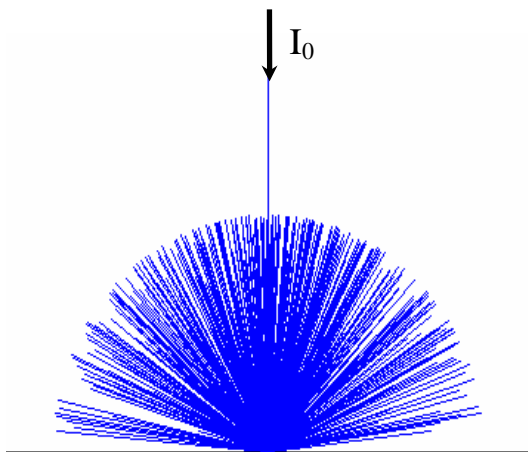


Figura 2.2 Diagrama que muestra el comportamiento de una superficie lambertiana al incidir un rayo de luz sobre la superficie.

de visión de la superficie como $I = I_0 \cos \theta_i$, θ_i es el ángulo medido con respecto a la normal de la superficie. Cuando una superficie lambertiana es combinada con un recinto esférico, la geometría de la esfera asegura que todo punto dentro de la esfera recibirá la misma intensidad o luz como toda otra parte de la esfera en el primer rebote. Ahora bien, tomando en cuenta las propiedades de una esfera

integradora, podemos afirmar que la luz incidente en cualquier lugar del interior de la

esfera integradora es inmediatamente distribuida uniformemente sobre toda su superficie. Por lo tanto, cualquier detector localizado en la superficie de la esfera recibirá un flujo el cual es directamente proporcional a la luz incidente de la esfera, independientemente de su localización. Para conocer el flujo tenemos que definir la luminancia de la esfera (L_{esfera}) después de que la luz ha incidido en la superficie.

Esta se define como:

$$L_{esfera} = \frac{\phi_{in}}{\pi A_S} * \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}$$

donde ϕ_{in} es el flujo de entrada, A_S es el área de la esfera, ρ es la reflectividad de la superficie de la esfera y f es la proporción de área que ocupan los baffles, detectores y puertos de entrada y salida en el interior de la esfera.

Ahora bien para conocer el flujo radiante detectado ($L_{Detectado}$) por un fotodetector se tiene el siguiente modelo:

$$L_{Detectado} = \frac{\phi_{in}}{\pi A_S} * \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} * A_d * \Omega$$

donde A_d es el área del detector, Ω es el ángulo sólido de visión del detector.

Finalmente, una esfera integradora permitirá conocer el flujo radiante de fuentes que posean una distribución angular o bien que cambie su distribución espacialmente, ya que ésta realizará una distribución uniforme en el interior de la esfera, lo cual permitirá conocer el flujo radiante de la fuente independientemente de su ángulo de incidencia y patrón de radiación.

Con estos conceptos reunidos, se poseen las herramientas necesarias para comprender los principios y conceptos que se irán desarrollando en los siguientes capítulos.

Capítulo 3

Concentradores de Luz y

Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC)

Para el diseño de CPC's y concentradores de luz se tienen que tomar en cuenta ciertas consideraciones, como la zona geográfica en la que se instalará el equipo, ya que es de vital importancia para los sistemas de colección de luz solar su ubicación frente al flujo de radiación solar. La implementación de sistemas de Seguimiento Solar (SS) soluciona el problema mencionado y permite ubicar el sistema directo al sol a lo largo del día. A pesar de ello no soluciona la problemática que surge cuando no existe luz directa del sol, o bien bajo condiciones de nubosidad donde solo hay presente luz difusa. Es aquí donde deben emplearse otra clase de colectores o redirectores para este tipo de luz. Sin embargo una parte importante del diseño de sistemas colectores y concentradores se basa en su cono de aceptación y su razón de concentración. Estos aspectos importantes serán discutidos en este capítulo; así como una serie de consideraciones que deben tomarse en cuenta para el diseño de colectores y concentradores de luz.

3. Principios y Bases Ópticas

El conocer el comportamiento del sol como fuente de luz nos permite diseñar sistemas de concentración y colección de luz a partir de la teoría paraxial y la óptica geométrica. Lo anterior es posible cuando se modela al sol como una fuente puntual ubicada en el infinito, de manera que la radiación emitida se propaga en forma de ondas esféricas. El radio de las ondas ira aumentando conforme se desplaza el plano de observación, conservando siempre una relación existente entre su radio y

la amplitud de su energía. Los rayos emanarán radialmente en la dirección en que fluye la energía proveniente de cada una de las ondas esféricas emitidas [29]. La distancia existente del sol a la tierra es muy grande, de 1.5×10^{11} m, por lo que el radio de las ondas esféricas que se apreciaría en la superficie de la tierra sería inmenso, y entonces el ángulo sólido proyectado sobre la tierra sería muy pequeño. Estas condiciones permiten modelar al frente de onda proveniente del sol como un frente de onda plano. Lo anterior sugiere que para expresar el desplazamiento y la propagación del frente de onda, es válido utilizar su representación por medio de rayos. Cada uno de éstos representa la dirección del flujo de la energía radiante del frente de onda. El modelar los sistemas bajo estas condiciones facilita la tarea de los diseños, los cuales frecuentemente son elaborados en papel o bien por medio de programas de cómputo como lo son Zemax y Oslo, los cuales permiten observar el comportamiento de las superficies concentradoras así como las razones de concentración y eficiencia de los sistemas por medio del trazo de rayos. La descripción del comportamiento de estos frentes de onda, en dispositivos o medios reflectores y refractores que forman un sistema óptico, es en lo que se enfoca la óptica geométrica y la teoría paraxial. Con lo anterior es válido aplicar las leyes de Snell para la reflexión y refracción, Ec. 3.1 y Ec. 3.2 [29-30].

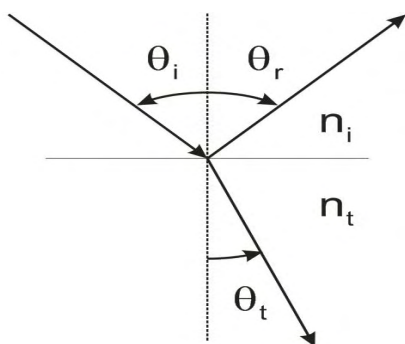


Figura 3.1 Diagrama que muestra la ley de Snell para un haz incidente, aplicable a la reflexión y refracción.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (3.1)$$

$$\theta_r = \theta_i \quad (3.2)$$

La Fig. 3.1 da una visión mas clara de esta ley. Por lo tanto habrá que tomar en cuenta al trazo de rayos como una herramienta fundamental para el diseño de los sistemas especialmente

para aquellos que se enfocan en captura de energía solar por medio de lentes y superficies especulares.

Otro de los conceptos importantes empleados en el diseño de sistemas concentradores, es la razón de concentración. Existen dos tipos: la concentración geométrica (C_G) [6,7] que se denomina al cociente entre el área de la abertura (A_{ap}) del concentrador y el área del receptor (A_r):

$$C_G = \frac{A_{ap}}{A_r} \quad (3.3)$$

y la concentración óptica (C_O) [7,8] que es definida como el cociente entre la irradiancia en el plano de abertura ($I_{S,ap}$) y la irradiancia en el receptor ($I_{S,r}$).

$$C_O = \frac{I_{S,ap}}{I_{S,r}} \quad (3.4)$$

Hay que recordar que la irradiancia es el flujo sobre unidad de área de superficie en el ángulo de incidencia de la radiación y se mide en $W \cdot m^{-2}$, mientras que la luminancia es la cantidad de flujo por unidad de ángulo sólido emitido o dispersado por unidad de área proyectada de superficie [25-26,29] $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. La concentración geométrica máxima teórica ($C_{G,Max}$) [7] que se puede alcanzar es:

$$C_{G,Max} = \frac{A_{ap}}{A_r} = \frac{n^2}{\sin^2 \theta_s} \quad (3.5)$$

donde n es el índice de refracción y θ_s es el semiángulo de entrada. Las razones de concentración permiten dar una idea real de la capacidad de los sistemas y son útiles como una herramienta de diseño. En la siguiente sección se presentarán algunos de los principios básicos para el diseño de sistemas concentradores de tipo refractivo.

3.1 Concentradores Refractivos

Los lentes son concentradores de tipo refractivo los cuales utilizan el fenómeno de la refracción para concentrar la luz. El más utilizado de este tipo son las lentes de Fresnel, inventadas por Augustin Fresnel en 1822. Estas lentes en realidad son un conjunto de prismas de geometría radial que tienen un foco común donde concentran la luz. En la actualidad estas lentes se fabrican en láminas de material transparente curvadas en una o varias direcciones, además brindan la ventaja de ser fabricadas en materiales poliméricos que las hacen más ligeras y menos costosas. Dentro de este mismo rubro existen sistemas de Fresnel que no forman imágenes, llamados concentradores refractivos de 3D, los cuales son generalizaciones del concepto de lente de Fresnel en forma laminar curvada. Este tipo de lentes son diseñadas por medio de programas de trazo de rayos con ángulos de aceptación mayores a 47° [7]. Tradicionalmente los sistemas refractivos son diseñados por medio de la ecuación de Gauss, ya sean lentes simples o arreglos de lentes.

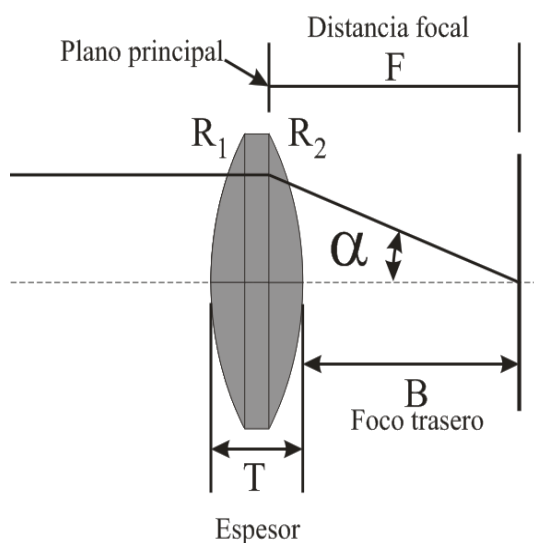


Figura 3.2 Diagrama básico de una lente. Obsérvese que R_1 es positivo y R_2 es negativo según se ha dibujado.

En la Fig. 3.2 se muestra el diagrama básico de una lente delgada con radios de curvatura R_1 y R_2 para las superficies respectivas. Si n es el índice de refracción del material de la lente y F la distancia focal, se tiene que la ecuación es:

$$\frac{1}{F} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (3.6)$$

En caso de ser una lente gruesa habrá de diseñarse bajo:

$$\frac{1}{F} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \left[\frac{(n-1)}{n} \right] \left(\frac{T}{R_1 R_2} \right), \quad (3.7)$$

donde T es el espesor de la lente.

Uno de los aspectos de mayor importancia para los concentradores refractivos es su ángulo de aceptación, el cual esta íntimamente vinculado con su abertura numérica y foco. El siguiente modelo matemático permite obtener la abertura numérica de una lente:

$$N.A. = n_0 \text{sen} \theta_{\max} \quad (3.8)$$

donde θ_{\max} es la mitad del ángulo del cono máximo de la luz captada por la lente y n_0 es índice de refracción del medio que rodea la lente ^[30-31]. Otras relaciones importantes para determinar la abertura numérica son el número $-f$ ó $f/\#$ []:

$$f/\# \approx \frac{1}{2(N.A.)} \quad (3.9)$$

$$f/\# \approx \frac{f}{D} \quad (3.10)$$

donde f es el foco de la lente y D su diámetro.

Cada una de ellas puede ser implementada a cualquier tipo de lente simple. En el apartado 3.2 encontraremos los modelos matemáticos para aberturas de espejos parabólicos que comúnmente se utilizan en los sistemas de concentración.

3.2 Concentrador Parabólico Compuesto

El Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) es una clase de sistemas de concentración, el cual se encuentra formado por dos superficies reflectoras parabólicas simétricas colocadas de tal forma que el área de concentración se encuentra en la línea que une el foco de las dos parábolas, donde el foco de de cada parábola se encuentra en el extremo contrario del absorbedor. Los CPC son concentradores que no forman imágenes pero que tienen características relevantes. De la Fig 3.3 podemos se deducir que para un CPC lineal el factor de concentración máxima en 2D será:

$$C_{G_{\max}} = \frac{d_{ob}}{d_r} = \frac{n}{\sin \alpha_{ap}}, \quad (3.11)$$

mientras que en 3D es,

$$C_{G_{\max}} = \frac{d_{ob}}{d_r} = \frac{n^2}{\sin^2 \alpha_{ap}}. \quad (3.12)$$

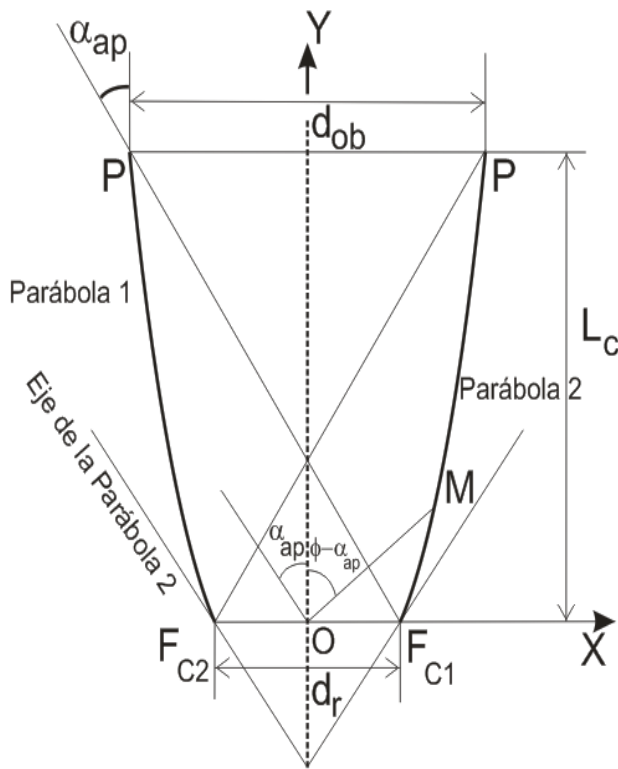


Figura 3.3 Esquema de un concentrador parabólico compuesto CPC.

Ahora bien, si el índice del material que forma el CPC es igual al del exterior, la altura L_c del colector es:

$$L_c = d_r \frac{C_G + 1}{2} \sqrt{C_G^2 - 1} \quad (3.13)$$

Con los anteriores modelos matemáticos es posible hacer el diseño de un CPC que se adapte a las necesidades de un sistema de iluminación, recordando que n es el índice de refracción del material del cual esta hecho el CPC [7].

3.3 Concentrador Cilíndrico Parabólico y

Disco Parabólico de Concentración

El Concentrador Cilíndrico Parabólico es uno de los concentradores que se generan a partir de una parábola trasladada a lo largo de un plano, formando así una superficie reflectora mediante una translación lineal, dando como resultado un concentrador lineal. Las características geométricas de la parábola, que proyecta un haz de rayos paralelos entre sí y paralelos al eje de la parábola sobre el foco de la misma, son las que hacen interesante esta clase de concentradores para aplicaciones prácticas. La parábola es una curva simétrica respecto a su eje. El punto de cruce entre la parábola y su eje es el vértice. La distancia sobre el eje entre el vértice y el foco F_c , se denomina distancia focal d_F . Si escogemos el vértice de la parábola como origen de coordenadas la ecuación de la parábola es:

$$y = 4d_F x^2 \quad (3.14)$$

La anchura de la abertura d_{ob} de la parábola y el ángulo de abertura α_{ap} están relacionados mediante:

$$d_{ob} = 4d_F \operatorname{tg} \frac{\alpha_{ap}}{2} \quad (3.15)$$

La anchura d_s de la imagen del disco solar es $d_s = d_F \cdot 2 \cdot \theta_s \cong 0.01 \cdot d_F$; es decir, el número que nos da la distancia focal en metros es el mismo que nos da el tamaño del diámetro de la imagen del disco solar en centímetros. Si el receptor es una superficie sobre el foco perpendicular al eje de la parábola la concentración media máxima que se puede obtener con la parábola es 4 veces inferior al valor dado por la ley de los senos de la concentración (Ec. 3.11). Cabe mencionar que los concentradores cilíndrico parabólicos solo concentran en una dimensión teniendo

como $C_{G,max}$ el valor de 212 ^[7]. El receptor de los rayos concentrados se sitúa en el foco de la parábola y permite una abertura angular de aproximadamente igual a 2. Esta clase de concentradores se utilizan en sistemas de intercambio de calor, para generar energía térmica, el flujo de radiación sobre el receptor está entre 40 y 60 kWm^{-2} ^[7] y pueden operar con temperaturas de hasta 450° C. Su eficiencia aumenta al tener sistemas de SS respecto un único eje paralelo a la línea focal.

El Disco Parabólico de Concentración posee características ópticas de la parábola y mediante la rotación de ésta sobre su propio eje se generan los concentradores o Discos Parabólicos. Son sistemas denominados de foco puntual, con seguimiento a dos ejes, donde el receptor está situado en el foco del paraboloides de revolución. Su curvatura parabólica y la baja relación distancia focal/diámetro (d_f/d) hace posible conseguir altas concentraciones de trabajo por encima de 3,000 soles. Esta clase de sistemas son utilizados frecuentemente para alcanzar altas concentraciones, fundamentalmente para aprovechamiento térmico. Un ejemplo de aplicación es en el uso de motores Stirling, los cuales muestran una gran eficiencia de conversión de radiación térmica a eléctrica. Otro ejemplo del uso de los discos parabólicos se encuentra en algunas aplicaciones de tipo fotovoltaico de última generación ^[32], finalmente los discos parabólicos también son utilizados en el ámbito de la iluminación.

3.4 Colectores de Luz Difusa

En la actualidad el desarrollo de sistemas de radiación difusa es casi nulo, debido a su dificultad para concentrar este tipo de radiación, sin embargo en la actualidad se tienen algunas ideas para recolección y redirección de este tipo de luz.

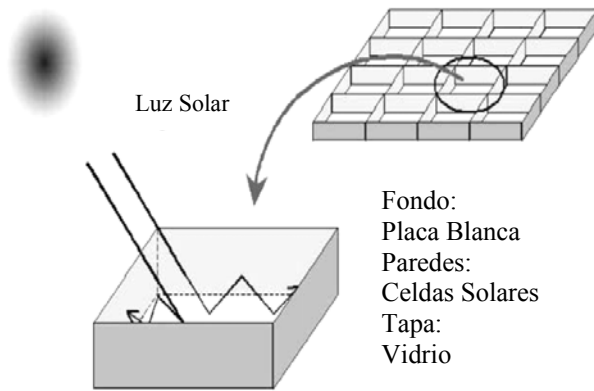


Figura 3.4 Arreglos de celdas fotovoltaicas utilizando como fondo una superficie blanca con la finalidad de aumentar su eficiencia.

Las actuales líneas de investigación se enfocan a optimizar la eficiencia de celdas solares por medio de superficies reflectoras [33]. En la figura 3.4 se muestra como este concepto es aplicado en sistemas experimentales [33], donde se coloca un arreglo de celdas solares como

paredes perpendiculares sobre una placa plana de color blanco. La finalidad es que no importando el ángulo de incidencia de la luz, el sistema permita capturar una mayor cantidad de luz al aprovechar las reflexiones que existan, de manera que sea posible hacer reincidir la luz en la CPV.

La apreciación cuantitativa del aumento de flujo de luz solar dependerá ciertamente del tipo de radiación incidente. Imaginemos que si el sistema se encuentra fijo, el movimiento del sol a lo largo del día causará que el ángulo de incidencia del flujo radiante cambie durante el transcurso del día. Esto significa que habrá momentos en los que exista una incidencia directa en alguno de los paneles y en otras ocasiones no exista ninguna incidencia del flujo radiante. Sin embargo las reflexiones del entorno entrarán y serán reflejadas en el interior de las paredes y serán absorbidas en un momento dado por las celdas solares. La misma situación se presenta cuando solo existe la radiación difusa, la cual está conformada por la luz que ha sufrido refracción, dispersión o reflexiones múltiples en el entorno. Al tener este tipo de sistemas bajo radiación difusa, existe la posibilidad de capturar luz en un ángulo sólido de 2π [28,29]. Lo anterior se logrará al redirigir una porción de la

radiación difusa incidente en las superficies lambertianas a un área de colección específica.

La validación práctica de esta afirmación es uno de los objetivos de esta investigación y se ha tratar en el desarrollo del capítulo 4. Ahora bien, la oportunidad de la aplicación de estos sistemas se encuentra en sistemas de celdas fotovoltaicas y de iluminación. Un ejemplo claro son los tragaluz o bien "*Lightpipe*", por su término en inglés. Los "*Lightpipe*" estrictamente no son colectores ni concentradores, solamente son sistemas que permiten el paso de la luz que existe en su entorno. Al aplicar un arreglo de superficies lambertianas a un *Lightpipe* se tendrá como objetivo particular hacer incidir la mayor cantidad de luz posible al interior del tubo, por lo que se pretenderá tener superficies de dimensiones mayores al diámetro, dado que solo una porción es redirigida. Cada una de las superficies deberá ubicarse dentro del cono de aceptación del *Lightpipe* con el fin de incrementar el flujo que atraviesa el tubo. La bondad que tiene este tipo de colectores de radiación difusa, es que no solo pueden aplicarse a sistemas de celdas solares o de iluminación, si no que pueden emplearse en sistemas de concentración de luz. Por lo que en el capítulo siguiente se presentará una propuesta basada en el uso de superficies lambertianas con la finalidad de coleccionar luz y aumentar la eficiencia de los sistemas a lo largo del día.

Capítulo 4

Principio de un colector de luz difusa

En los capítulos anteriores examiné el estado del arte de los de colectores solares. Durante este análisis se observaron las características de cada uno de ellos y sus posibles ventajas, que los hacen aptos para alguna aplicación en particular. Sin embargo, la investigación en este trabajo se ha de enfocado exclusivamente al mejoramiento de sistemas de iluminación natural. El objetivo es aportar nuevos desarrollos para el ahorro energético ^[34,35] y beneficios para la salud ^[36]. En este capítulo se presentarán los diseños propuestos e implementaciones en sistemas a escala. Las propuestas mostradas pueden ser clasificadas como complementos de los sistemas de iluminación actuales, permitiendo aumentar su eficiencia en condiciones de nubosidad parcial o total.

4 Metodología

En el desarrollo de prototipos experimentales es necesario tener una metodología donde exista una mejora continua, así que el primer paso fue elaborarla. El diagrama mostrado en la Fig. 4.1 muestra el proceso de diseño e implementación

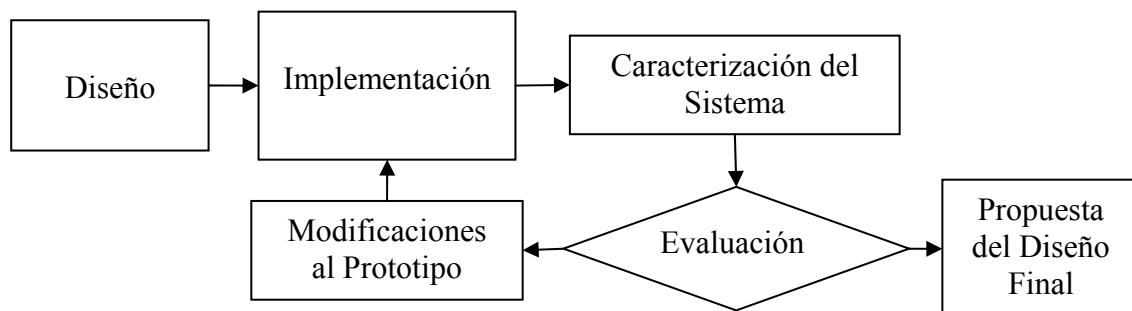


Figura. 4.1 Diagrama de flujo para el diseño y fabricación del colector de luz difusa

utilizado. A la par de la fabricación en algunos casos se simuló el diseño por medio del trazo de rayos, lo cual permite observar su comportamiento brindando una idea de su funcionamiento. Posteriormente se realizó una caracterización física y se cuantificó su eficiencia. Inicialmente se propuso un diseño prototipo, el cual se fabricaría e implementaría con óptica de volumen. Después de obtener la información del diseño se elaboraran cambios al prototipo que permitan aumentar su eficiencia, al aplicar “n” veces este ciclo obteniendo como resultado un prototipo final. El aplicar la metodología facilita detectar las fallas y por ende aplicar a los prototipos las modificaciones necesarias para ser optimizados. Durante el proceso se tomaron en cuenta 3 características importantes que impactan directamente la eficiencia de los sistemas, estas son:

- La geometría y óptica del sistema.
- El cono de aceptación del sistema.
- La razón Beneficio/Costo.

Tomando en cuenta estos factores y utilizando la metodología propuesta se planeó un estudio para aportar mejoras a los sistemas comerciales. El estudio consistió en conocer el principio de diseño de un sistema comercial existente y de estudiar algunas nuevas propuestas.

4.2 Consideraciones para el Diseño

Al investigar las capacidades y debilidades de los sistemas de iluminación comerciales, se encontraron los principales inconvenientes de operación de cada uno de ellos. Por ejemplo, la compañía sueca Parans ^[22], experta en el ámbito de iluminación natural, basa la tecnología de su SP2 en el uso de lentes de Fresnel como colectores de concentración, con lo que se obtienen buenas eficiencias en

radiación directa. No obstante, el SP2 no puede concentrar la luz difusa procedente del cielo o de objetos circundantes, lo cual implica que su eficiencia en días nublados o en periodos de tiempo en que no tiene acceso directo al sol sea prácticamente nula. Por otra parte, los sistemas para iluminación que utilizan discos parabólicos y CPC encontrados en patentes recientes [37-38], presentan la misma problemática incluyendo también un Ángulo de Aceptancia (AA) [6] reducido. El tener un AA reducido asocia la necesidad de implementar sistemas mecánicos para el Seguimiento Solar (SS), aumentando su costo de manera significativa. Hay que tomar en cuenta que la desventaja de poseer un AA relativamente pequeño, causa el rechazo de la radiación directa o difusa por encima de su AA [6,39-40].

Los problemas mencionados anteriormente incentivaron a realizar una caracterización de los sistemas bajo dichas condiciones, de manera que los resultados obtenidos permitieran diseñar e implementar una mejora. Se propuso evaluar así 3 sistemas simples: Fibra Óptica Lente (FOL), Cavidad Lambertiana (CL) y Fibra Óptica (FO). El sistema FOL es utilizado en circunstancias de radiación directa y lo encontramos en el diseño sueco SP2. La configuración FOL se basa en colocar una fibra óptica en el foco de la lente, donde la lente tiene la función de concentrar la luz. Por otro lado la CL es uno de los diseños introducidos por esta investigación para el aprovechamiento de la luz difusa. La CL es un arreglo de superficies planas de color blanco que forman un paralelepípedo recto sin tapa superior. Por último se encuentra la FO que solo tiene la intención de ser utilizada como referencia de los sistemas en estudio, sin embargo la FO puede ser utilizada para modelar el diseño de una “*Lightpipe*”.

4.2 Implementación.

Los sistemas FOL fueron implementados primeramente con una lente acromática y después con una lente de Fresnel. En ambos casos se utilizó una fibra óptica con un diámetro de núcleo 600 μm de tipo comercial, la cual se colocó en el foco de la lente. Por otra parte la CL se fabricó con cartón ilustración y se recubrió con una película de pintura blanca (Vinimex de Comex) cuya reflectancia se encuentra alrededor del 90%. Las CL están dimensionadas por Ancho x Profundidad x Altura de: 5x5x1.8 cm, de 5x5x5 cm y de 5x5x10 cm. Previamente se elaboraron algunas simulaciones que mostraban el comportamiento de los prototipos y se encontró que la CL daba una ganancia a diferencia del FOL en condiciones de exposición de radiación difusa. En la figura 4.2 se muestran las imágenes de las implementaciones realizadas.

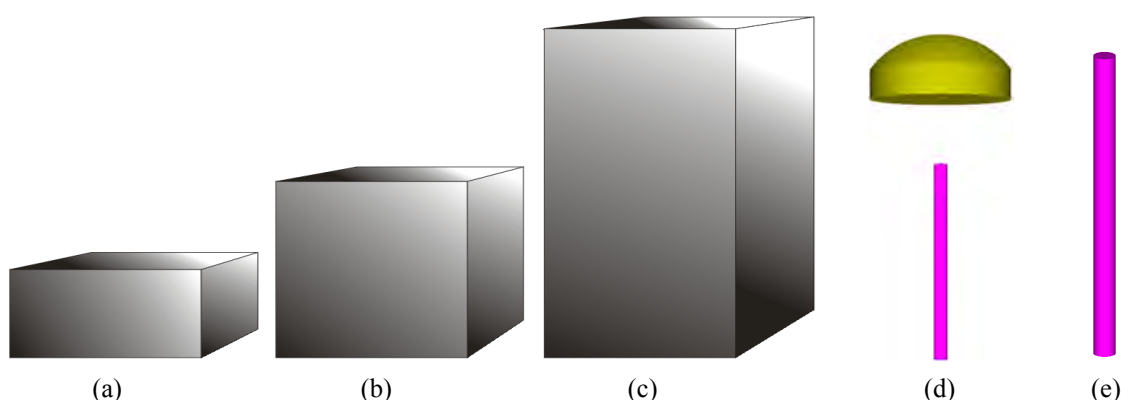


Figura. 4.2 Dimensiones de los Sistemas Colectores de Luz (Ancho x Profundidad x Altura):
(a) CL1 5x5x1.8 cm, (b) CL2 5x5x5 cm, (c) CL3 5x5x10 cm, (d) FOL el foco de la lente es 2.5 cm, (e) FO.

4.3 Caracterización Experimental.

La caracterización de un Sistema Colector de Luz (SCL) consiste en conocer su razón de concentración, sus pérdidas, sus ganancias y sus límites de operación. Cada valor asignado a dichas características se obtiene de la respuesta que el sistema entrega a las diferentes condiciones de entrada. El flujo de radiación, el

ángulo de inclinación, el tamaño de la abertura de entrada y el área de colección son ejemplos de variables de entrada, particularmente encontradas en los sistemas solares. El estudio del comportamiento de un SCL permitirá conocer sus características e identificar sus limitaciones. Durante el proceso de caracterización se identificó la importancia de tener un control de las variables de entrada, lo cual condujo a la necesidad de anular las fluctuaciones presentes en el entorno, pues son fenómenos aleatorios que dificultan la caracterización y la comparación entre diferentes sistemas. Por esta razón se decidió fabricar una Fuente de Radiación Difusa que proporcione una luminancia homogénea y un entorno libre de fuentes luminosas externas diferentes a la fuente de radiación difusa. Las anteriores condiciones son importantes para cuantificar la luz capturada por un SCL bajo condiciones de iluminación estables.

La fuente de radiación difusa diseñada basa su funcionamiento en el principio de una Esfera Integradora (Cap 2.2). Se fabricó con una bóveda semiesférica a la cual le fue aplicado un recubrimiento de alta reflectancia ($R \approx 0.9$ Vinimex Comex). En su interior la bóveda tiene instalada una lámpara incandescente de 100 W a 3 mm de distancia de la superficie de uno de los bordes (Fig. 4.3a). La finalidad es obtener el esparcimiento de la luz por medio de múltiples reflexiones para lograr una luminancia cuasi-isotrópica en su interior. El diagrama de la Fig. 4.3a muestra el diseño de la bóveda y la Fig. 4.3b muestra el comportamiento de la luz por medio

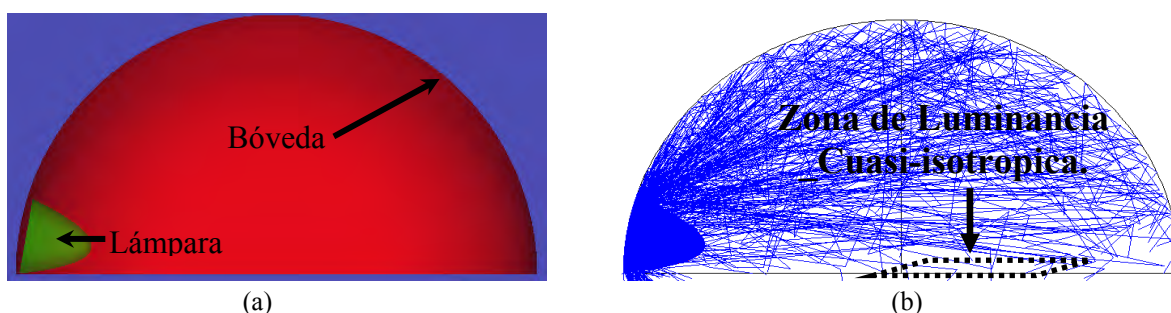


Figura. 4.3 Bóveda de caracterización: (a) Esquema de la bóveda, (b) trazo de rayos para observar el comportamiento de la bóveda y la Zona de Luminancia Cuasi-Isotrópica.

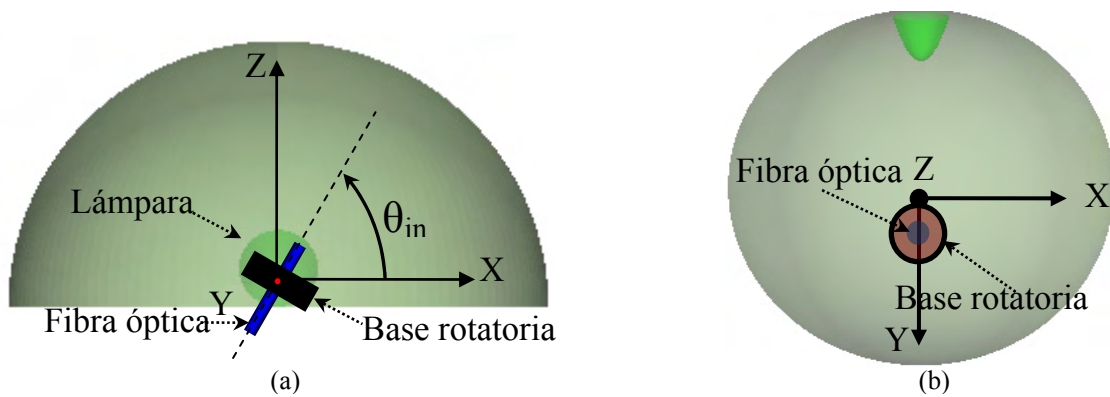


Fig. 4.4 Diagrama experimental de la bóveda de prueba: (a) vista transversal de la configuración del arreglo experimental para caracterizar los sistemas FOL, FO, CL, (b) vista superior de la configuración.

del trazo de rayos dentro de la bóveda. En el interior de la bóveda encontraremos una región a la que llamaremos Zona de Luminancia Cuasi-Isotrópica (Fig.4.3b). Ésta zona de luminancia, es la mitad de la semiesfera donde se verificó la isotropía de la bóveda. Para ello empleé una fibra óptica (f.o) sujeta al centro de una base rotatoria como se muestra en la Fig. 4.4a. La base fue ubicada en el centro de la semiesfera y tiene como eje de rotación el eje Y (Fig. 4.4b). La f.o. está acoplada a un fotodetector (Newport, 818-SL) conectado a un medidor de potencia óptica (Newport, 1930C), la longitud de onda seleccionada para la detección fue de 550 nm. La selección de la longitud de onda está relacionada con el tipo de aplicación de los SCL. Dado que se desea una implementación de los SCL's para la iluminación de interiores, la luz capturada deberá tener su máxima amplitud espectral en la longitud de onda de mayor sensibilidad de nuestro sentido de la vista.

Una vez fijo el sistema, se efectuaron diferentes barridos azimutales contenidos en el plano XZ tomando como referencia el plano XY (Fig. 4.5a). La finalidad de esta acción es detectar la luminancia en función del ángulo θ_{in} , donde θ_{in} es el ángulo formado entre la f.o. y la base de la bóveda (Π_{XY}). Se realizaron 3 series de medidas, cada una consistía de un barrido desde 0° hasta 180° en pasos de 10° . La gráfica en la Fig. 4.5b muestra las medidas registradas para tres series en donde se observa un flujo radiante con muy poca variación desde los 10° hasta 170°

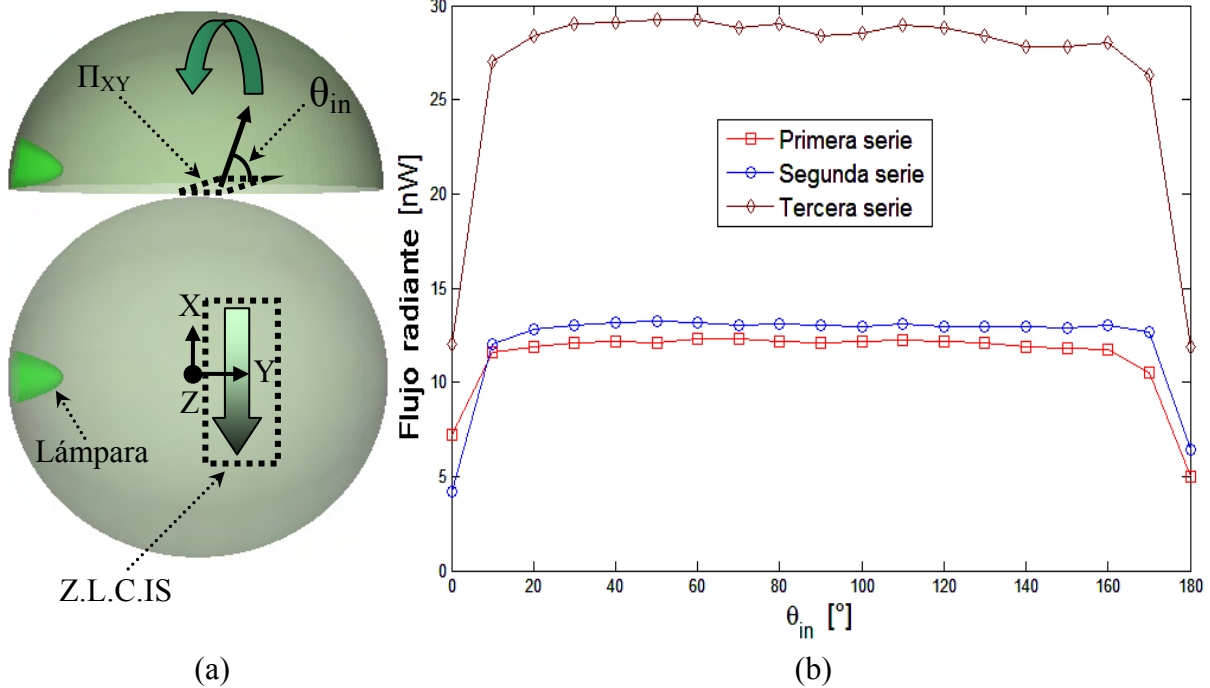


Figura. 4.5 (a) Diagrama para describir los barridos azimutales sobre el Π_{XZ} respecto al plano XY. (b) Gráficas del flujo radiante capturado como función del ángulo de inclinación θ_{in} .

para las dos primeras series. El resultado de las 2 primeras series demuestra una luminancia constante alrededor de la superficie interior de la bóveda. Las variaciones observadas desde 0° a 170° , en la tercera serie, se deben a pequeñas variaciones de la distancia establecida entre la lámpara y la superficie de la esfera, sin embargo puede decirse que muestran también una luminancia promedio de 28.39 nW con variación de $\pm 6\%$. Cabe mencionar que las mediciones fueron realizadas bajo las mismas condiciones a excepción de la intensidad, por que en cada serie existía una intensidad de iluminación diferente la cual se establecía con la distancia de la fuente a la superficie interior de la esfera. Por otra parte, siguiendo el mismo protocolo, se realizaron los barridos azimutales en el plano YZ, tomando como referencia el plano XY (Fig. 4.6a). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 4.6b, en dichas graficas encontramos una intensidad constante desde 10° hasta 80° (Fig. 4.6). Ahora bien, el aumento que presenta la intensidad después de los 80° se origina cuando el detector se expone a las primeras reflexiones provenientes de la fuente de luz. La instalación de baffles dentro de la bóveda reduciría este efecto y

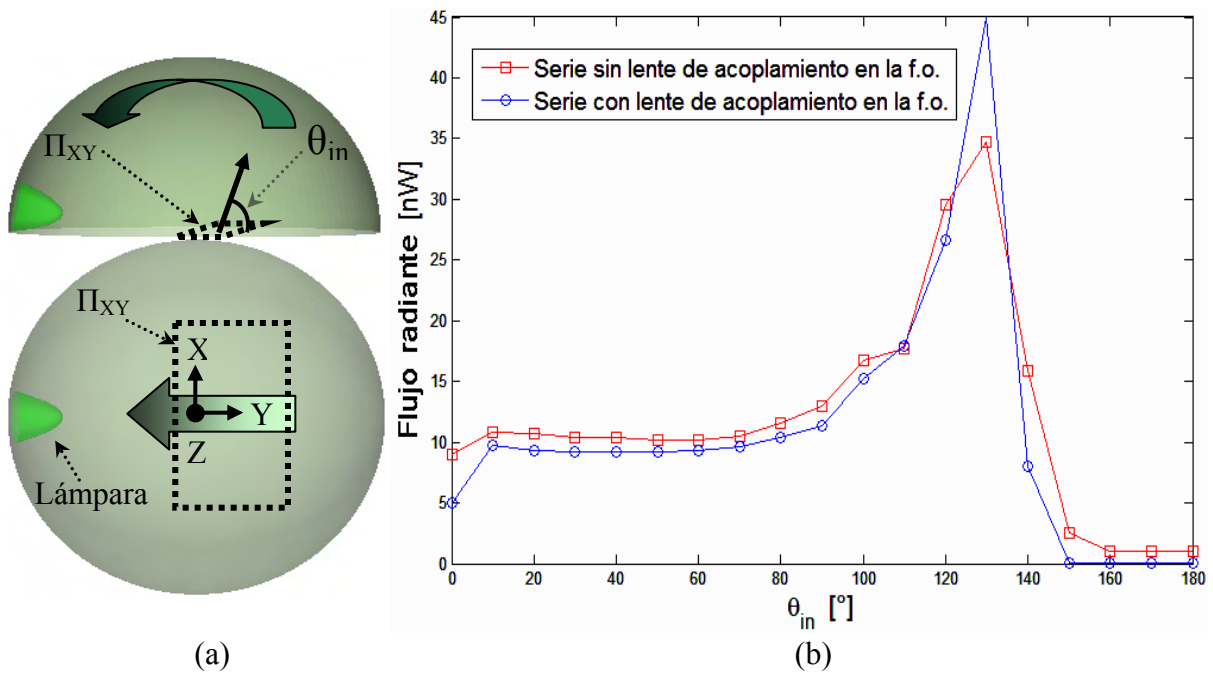


Figura. 4.6 (a) Diagrama para describir los barridos azimutales sobre el Π_{YZ} respecto al plano XY. (b) Gráficas del flujo radiante capturado como función del ángulo de inclinación θ_{in} .

habrá de ser considerado para elaborar caracterizaciones más exactas en el futuro.

Al analizar las figuras 4.5 y 4.6 observamos que las variaciones máximas registradas son del orden de $\pm 6\%$ en su intervalo 10° - 170° sobre el π_{XZ} y 10° - 80° sobre el π_{YZ} , los resultados del comportamiento de la bóveda permiten deducir que el flujo radiante detectado por nuestro fotodetector es casi completamente isotrópico

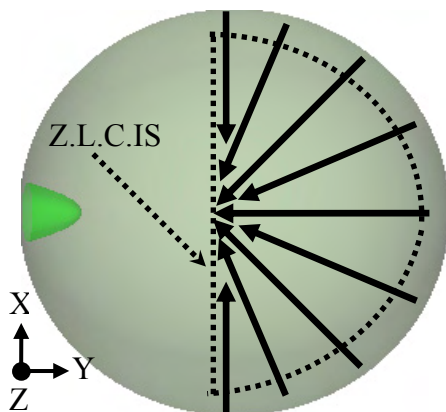


Figura 4.7. Dirección de los barridos azimutales donde se observa una luminancia constante hacia el interior de la bóveda. Cada una de las flechas también represente el perfil de cada plano.

en un ángulo sólido de 2π y π respectivamente. Con lo anterior podemos inferir que la luminancia de la superficie interna presentará el mismo comportamiento de una esfera integradora en la región Z.L.C.IS. Sin embargo para corroborar en su totalidad la isotropía de la luminancia, se efectuaron una serie de barridos azimutales sobre el plano XY en diferentes direcciones indicadas en la Fig. 4.7.

Las diferentes rutas revelaron tener una luminancia constante y el mismo porcentaje de variación como en la Fig. 4.6b, lo que indica la existencia de una buena isotropía de la luminancia al interior de la bóveda y que la FRD es útil para caracterizar los sistemas FOL, CL y FO en la zona de luminancia cuasi-isotrópica.

Finalizada la evaluación de la bóveda se procedió a caracterizar cada uno de los sistemas colectores (Fig. 4.2). Los experimentos se enfocaron a determinar su eficiencia, su ganancia y su razón de concentración. Las pruebas aplicadas a cada SCL consistieron de igual forma en realizar un barrido azimutal dentro de un plano paralelo a XZ, rotándolo sobre el eje Y dentro de la zona de luminancia cuasi-isotrópica (Fig. 4.8a). Cada sistema se montó en la base rotatoria instalada dentro de la bóveda procurando siempre que las condiciones fueran las mismas para cada uno de los SCL. Al efectuar el barrido para cada SCL se obtenía el flujo radiante capturado en función de θ_{in} . El proceso establecido permite observar la cantidad de radiación difusa colectada o concentrada por los sistemas bajo una luminancia isotrópica, y brindan una medida proporcional de la eficiencia de los sistemas permitiendo elaborar una comparación directa entre los SCL's.

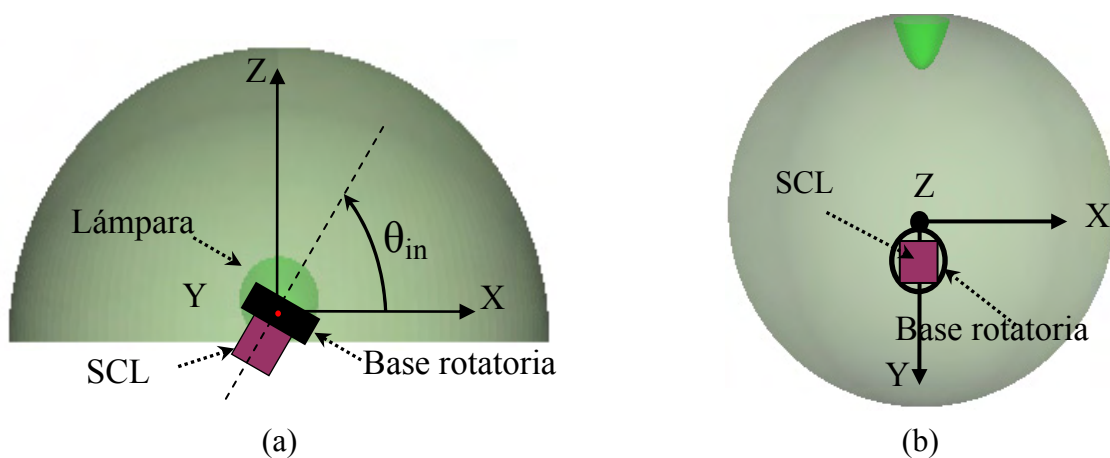


Figura. 4.8 Arreglo experimental de caracterización de las SCLL: (a) Vista transversal de la configuración del arreglo experimental para caracterizar los SCL's, (b) vista superior de la configuración

Tipo de SCL	Flujo Radiante [nW]
FO	20
LFO	20
CL1 (50x50x18 mm)	16
CL2 (50x50x48 mm)	13
CL3 (50x50x100 mm)	9

Tabla 4.1 Luminancia detectada en cada SCL

El flujo radiante registrado de los barridos de 0 a 180° para cada SCL es mostrado en la tabla 4.1. Las incertidumbres registradas en los valores a lo largo del barrido son de $\pm 2\%$. El SCL más eficiente fue la FO junto con el arreglo LFO. Sin embargo, aumentando la reflectancia del interior de cada CL esperaríamos tener la misma eficiencia que en caso de la FO. Ahora bien, una característica de un sistema colector de radiación directa con seguimiento solar, es la dependencia de su eficiencia con el ángulo de incidencia de la radiación. En un ambiente realista la radiación incidente en la abertura de entrada de un SCL es variable a lo largo del día y, además su distribución angular no es uniforme. Los sistemas con seguimiento solar cumplen su función al seguir la radiación directa del sol, de tal forma que el eje óptico del sistema apunte hacia el sol obteniendo así la mayor cantidad de radiación. La idea de superar esta dependencia de la radiación directa y del seguimiento solar, se enfocó en emplear el concepto de CL que permitiría obtener un desempeño superior al FO y al LFO bajo condiciones de radiación difusa y radiación directa. Para corroborar y cuantificar el desempeño de las CL's se realizó la siguiente prueba. Se colocó una superficie obstructora de dimensiones fijas en el interior de la bóveda a una distancia fija del SCL Fig. 4.9. La superficie obstructora se rotó alrededor del SCL trazando una trayectoria semicircular permaneciendo a una distancia equidistante a lo largo de su trayectoria, la acción anterior permite medir la

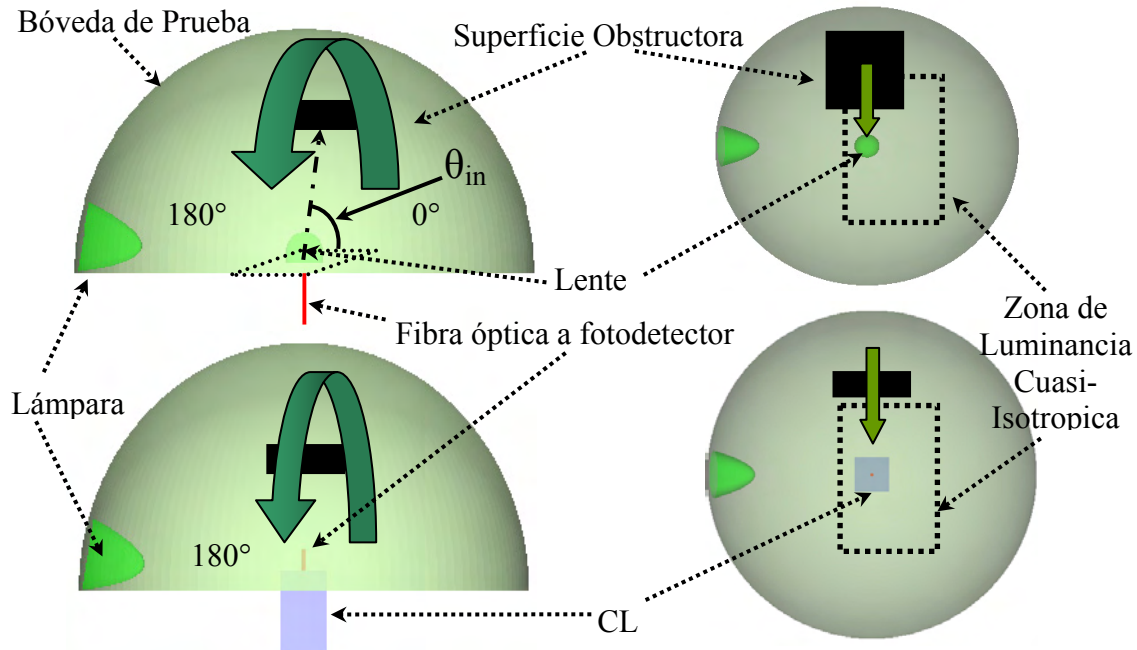


Figura 4.9 Diagrama de la configuración y dirección de los barridos, arriba se muestra para el sistema FOL y abajo para el sistema de CL. Obsérvese que FO recupera la luz del interior de la CL.

cantidad de luz capturada por cada SCL, el ángulo de aceptación del sistema y la eficiencia relativa de cada SCL. Además la prueba recreará en el laboratorio un fenómeno comúnmente presente en el entorno de los sistemas, que es cuando las nubes o sombras bloquean el SCL. Las dimensiones de las superficies obstructoras fueron de 6x6 cm y de 12x12 cm, mientras que las distancias a las cuales se

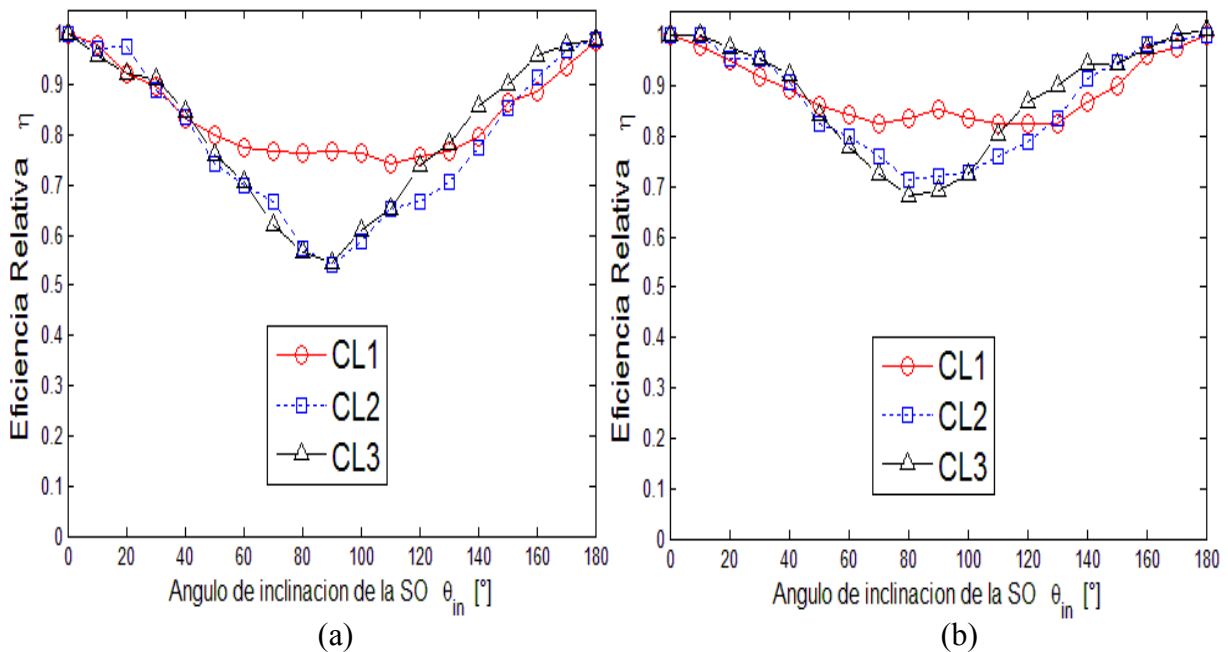


Figura 4.10 Gráfica de la eficiencia relativa de la CL's en función del ángulo de inclinación de una Superficie Obstructora de 12x12 cm a una distancia de: (a) 8 cm y (b) 12 cm

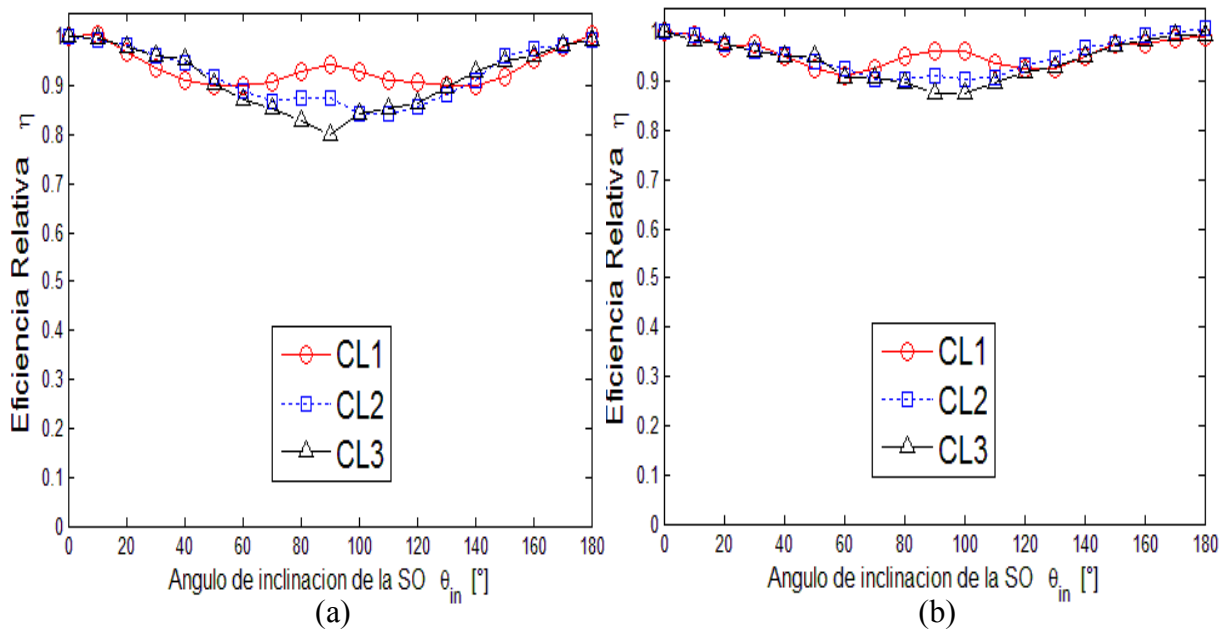


Figura 4.11 Gráfica de la eficiencia relativa de la CL's en función del ángulo de inclinación de una Superficie Obstructora de 6x6 cm a una distancia de: (a) 8 cm y (b).12cm

colocaron fueron de 8 y 12 cm.

Los resultados obtenidos de los barridos con una superficie obstructora 12x12 cm para las cavidades CL1, CL2 y CL3 se muestran en la figura 4.10. En las figura 4.10 podemos notar que la CL1 mantiene la eficiencia más alta con un valor entre 1 y 0.8, a diferencia de las eficiencias relativas de la CL2 y CL3, las cuales llegan a valores mínimos de 0.55 cuando el ángulo de aceptación empieza a ser cubierto por la superficie obstructora. Por otra parte las figuras 4.11 muestran los resultados de los

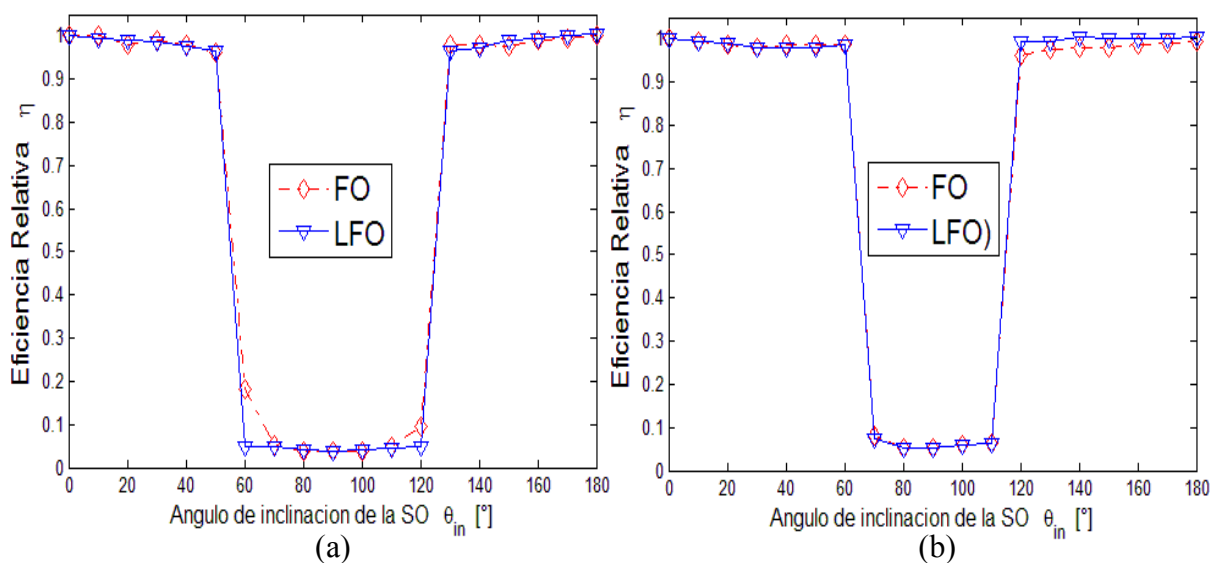


Figura 4.12 Gráfica de la eficiencia relativa del sistema FO y LFO en función del ángulo de inclinación de una Superficie Obstructora de 12x12 cm a una distancia de: (a) 8 cm y (b).12cm

barridos para una superficie obstructora de 6x6 cm. Notaremos que la CL1 presenta un comportamiento similar alcanzando eficiencias mayores a 0.9 en comparación con las cavidades CL2 y CL3. Ahora bien, en las figuras 4.12 se grafican los valores obtenidos para el sistema FO y FOL con una superficie obstructora 12x12 cm, mientras que para una superficie obstructora de 6x6 cm se tienen las gráficas de la figura 14.13. Debo mencionar que la eficiencia relativa mostrada en cada gráfica está referida al valor del flujo radiante detectado en el interior de la bóveda (Tabla 4.1). En las figuras 14.12 y 14.13 observamos que la eficiencia relativa de los sistemas FO y LFO prácticamente es nula, cuando la superficie obstructora se encuentra bloqueando su cono de aceptación impidiendo la colección de luz. Por lo tanto si existe una superficie obstructora muy grande, sería casi nula la colección de luz para los sistemas FO y LFO, ya que se bloquea su ángulo de aceptación más prontamente. Si observamos las gráficas 4.10 y 4.11 apreciaremos que la eficiencia relativa de las Cl' Hz nunca es nula, y que tampoco ésta disminuye drásticamente. Además la CL1 mantiene un valor que va desde 0.8 hasta 1, a diferencia de la FO y

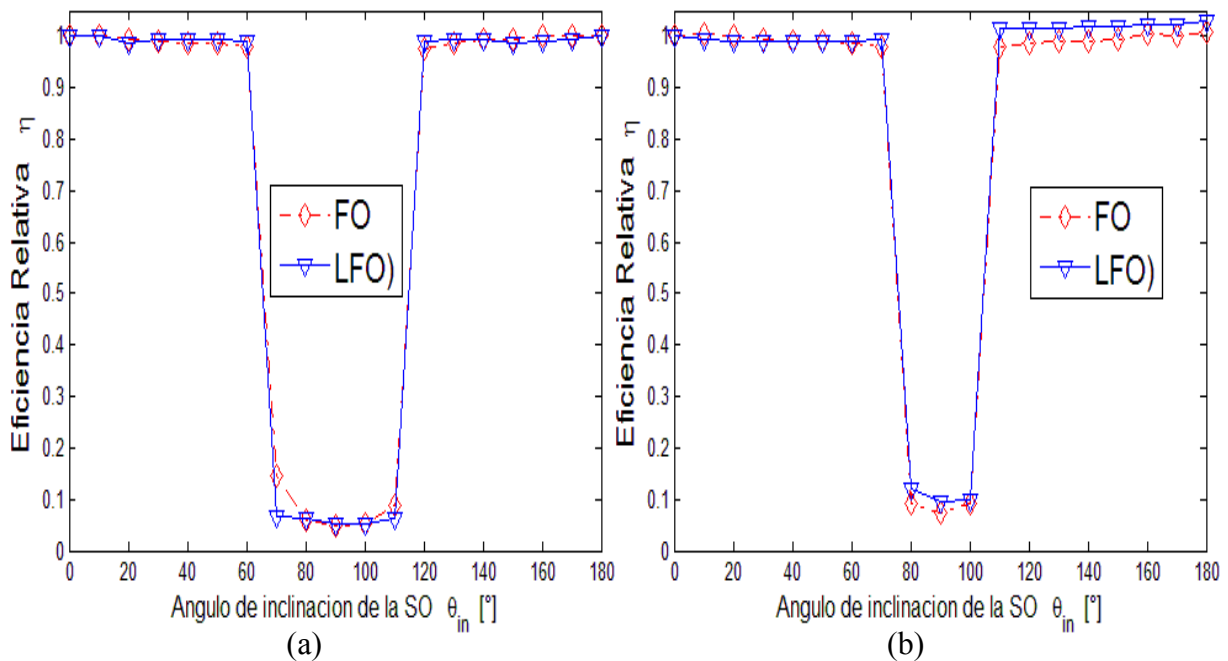


Figura 4.13 Gráfica de la eficiencia relativa del sistema FO y LFO en función del ángulo de inclinación de una Superficie Obstructora 6x6 cm a una distancia de: (a) 8 cm y (b) 12cm.

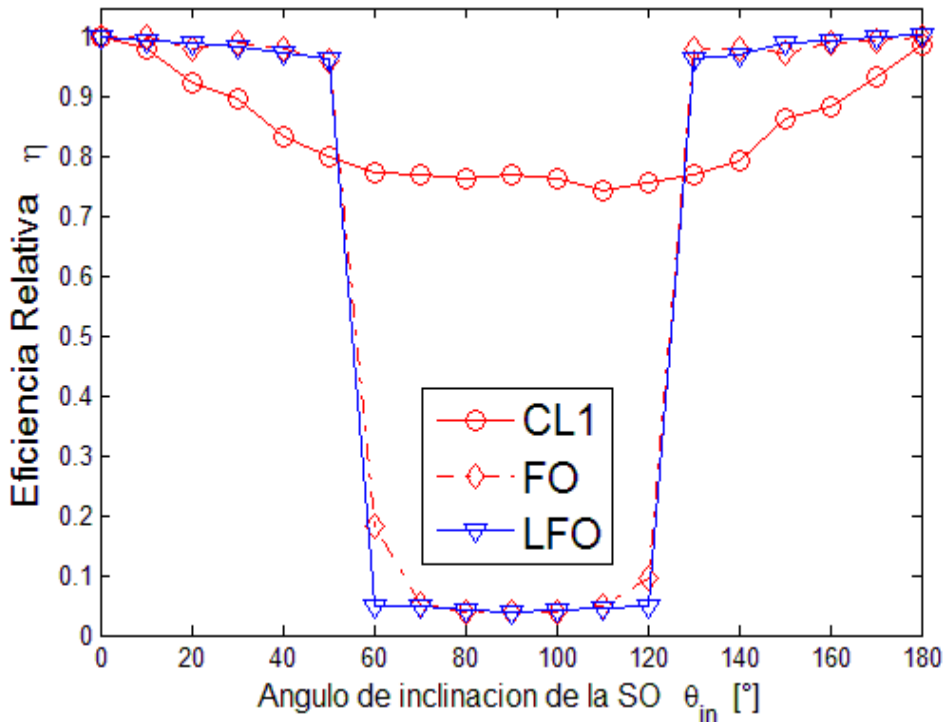


Figura 4.14 Gráfica comparativa de la eficiencia relativa del sistema FO, LFO y CL1 en función del ángulo de inclinación de una SO 12x12 cm a una distancia de 8 cm.

el arreglo LFO. Esto significa que las cavidades lambertianas mantienen un flujo radiante colectado a pesar de las superficies obstructoras. Lo anterior se comprueba al comparar el peor caso de la CL3 (Fig. 4.10a) con el comportamiento de la FO y el arreglo LFO (Fig. 4.12a) bajo las mismas condiciones. En la figura 4.14 se muestra una comparación de la respuesta de la CL1, FO y LFO a una obstrucción, donde se observa que la CL1 sigue colectando luz a pesar de estar presente la SO, en cambio la FO y LFO dejan de colectar luz en un intervalo de 60°-120°, que es el intervalo en el que se encuentra bloqueado el ángulo de aceptación del sistema. La cantidad de flujo radiante colectado por la CL1 es 4 veces mayor que en el sistema FO y LFO en el intervalo de 60°-120°. Aunque para valores situados antes y después de este intervalo los sistemas FO y LFO superan en eficiencia relativa a la CL1, por alrededor de un 30% del valor del flujo radiante del interior de la esfera obtenido por el sistema LFO y FO (tabla 4.1). A pesar de esta circunstancia, si realizamos la integral sobre cada una de las curvas

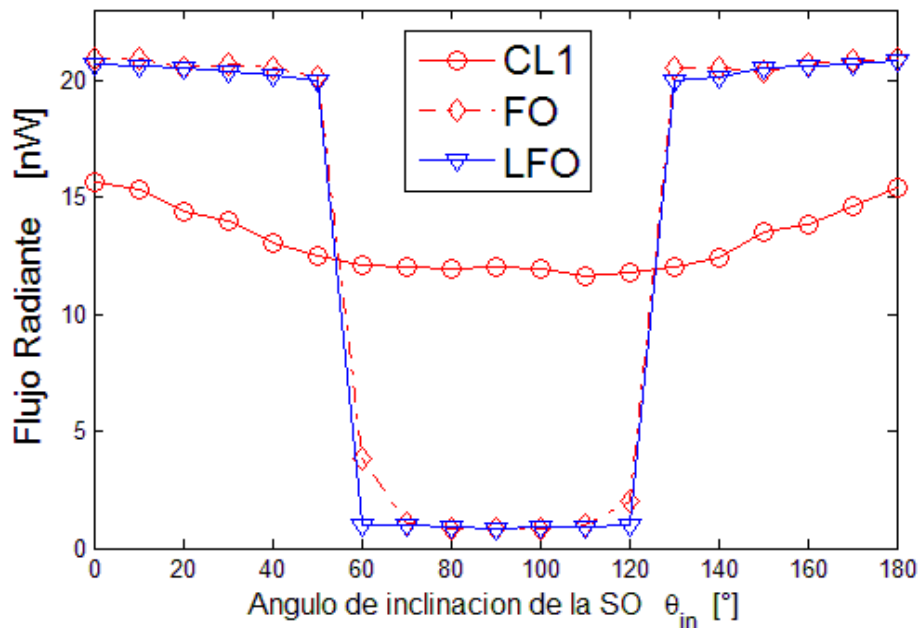


Figura 4.15 Gráfica del flujo radiante de los sistemas FO, LFO y CL1 en función del ángulo de inclinación de una SO 12x12 cm a una distancia de 8 cm.

que describen el flujo radiante capturado en función del ángulo (Fig. 4.15), tendremos que la CL1 presenta un flujo radiante por grado de **2,343 nW/°** mientras que la FO presenta un flujo radiante de **2,368 nW/°**. Si realizamos la conversión de grados a estereorradianes observamos la integral significará la luminancia detectada en un ángulo de 2π , por lo tanto la CL1 tendrá una luminancia de **134.24.μW/sr** y la FO de **135.67 μW/sr**. Lo anterior expresa que la CL1 tiene un desempeño muy similar al de la FO y significa que la CL1 colecta luz difusa a diferencia de la FO que necesita la radiación directa.

Así podemos concluir que las Cavidades Lambertianas permiten colectar luz difusa y directa en un ángulo sólido muy cercano a 2π . Lo cual es una ventaja con respecto a sistemas de concentración de luz basados en lentes y superficies reflectoras. Aunque la magnitud del flujo radiante capturado por las Cavidades Lambertianas es menor, su eficiencia de colectar la radiación difusa y directa proveniente de todas direcciones logra que el flujo radiante total sea comparable a la del sistema FO o del sistema FOL. Finalmente los resultados obtenidos comprobaron la utilidad que da una CL en condiciones de radiación difusa o

indirecta, particularmente aumentando el flujo de radiación en una cierta área. Ahora bien, esta ventaja que presenta la CL al coleccionar la radiación en un ángulo sólido de 2π la hace atractiva como sistema complementario a sistemas de radiación directa con la finalidad de aumentar sus eficiencias.

En el siguiente capítulo estudiaremos la implementación práctica realizada a un sistema colector de luz y observaremos la utilidad de las cavidades lambertianas para mejorar el desempeño de los sistemas.

Capítulo 5

Adaptación de una Cavidad Lambertiana a un Colector de Luz

En el capítulo anterior analizamos los experimentos realizados con diferentes sistemas colectores de Luz. Se concluyó que la Cavidad Lambertiana (CL) presenta una mejor capacidad de coleccionar la radiación difusa y ofrece también la cualidad de coleccionar la radiación directa. Igualmente se apreció que la CL posee un ángulo de aceptación mucho mayor que los sistemas de concentración de radiación directa, como son las lentes. Esta perspectiva planteó la idea de formar, con la CL, un sistema colector de luz combinado con un sistema de concentración de radiación directa. La finalidad de adaptar una CL a un sistema colector de luz es aumentar la eficiencia y el ángulo de aceptación, para así obtener una mayor cantidad de flujo coleccionado no importando las condiciones ambientales del entorno. De manera que en este capítulo se presentará una serie de adaptaciones de la CL a un Sistema Colector de Luz (SCL) con la finalidad de que el sistema colecciona luz de todas direcciones y aumente la cantidad de flujo radiante coleccionado.

El prototipo experimental que se obtenga de la combinación de un SCL y la CL permitirá crear un nuevo diseño de SCL que puede ser implementado en sistemas concentradores para iluminación de interiores. A la vez se mostrará la posibilidad de implementar el prototipo a sistemas de iluminación como son los *Lightpipe*.

5 Implementación de una Cavity Lambertiana a un Sistema Colector de Luz actual

La eficiencia de una CL en un ambiente expuesto a radiación difusa es alta en comparación de los SCL más vendidos en el mercado, como es el arreglo del Lente-Fibra Óptica (LFO). A pesar que una CL no tiene la capacidad de concentrar la radiación directa como un arreglo LFO, la CL puede coleccionar una cantidad de flujo radiante proveniente de un ángulo de aceptación mucho mayor que el del sistema LFO. Lo anterior hace surgir la idea de combinar las características de un SCL con la de una CL, dando como resultado un SCL de una buena eficiencia tanto para radiación difusa como para radiación directa. Con el fin de probar ésta idea fueron implementados una serie de prototipos utilizando lentes, cavidades y superficies lambertianas. A cada uno de estos prototipos fabricados le llamamos Sistema Colector de Luz Lambertiano (SCLL).

Cada uno de los SCLL's propuestos, pueden o no estar conformados por una lente de Fresnel, una CL, un reflector primario y un Reflector Lambertiano Secundario (RLS). En la figura 5.1 se observan cada una de las partes que forman a un SCLL. Las dimensiones específicas de cada uno de los prototipos fabricados

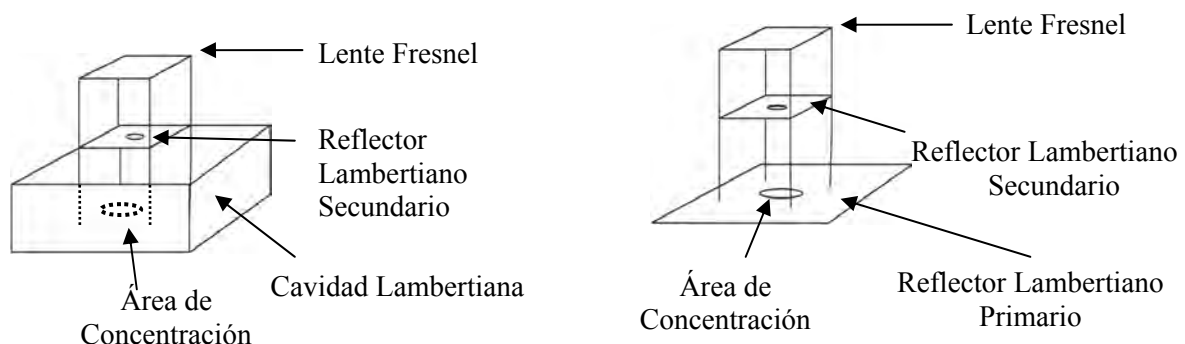


Figura 5.1 Descripción de los SCLL.

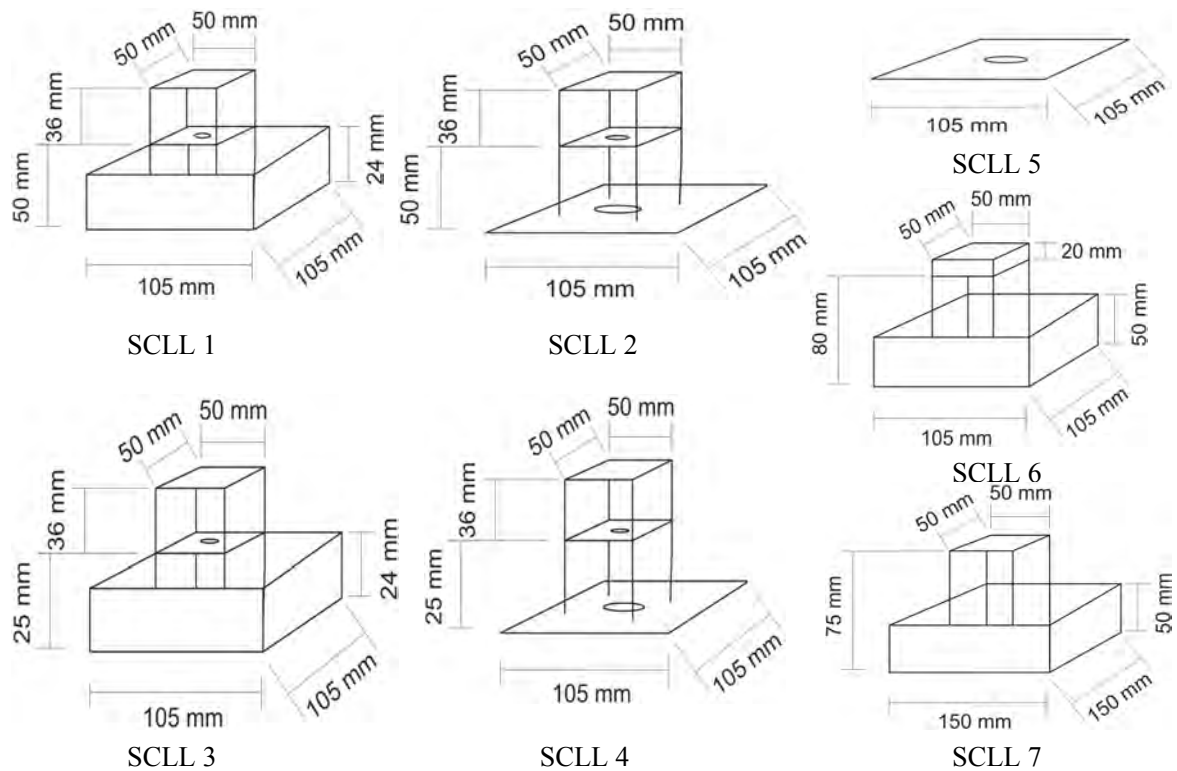


Figura 5.2 Sistemas Colectores de Luz Lambertianos propuestos para coleccionar radiación directa y radiación difusa. Solo de la SCLL1-SCLL4 poseen una lente de Fresnel en la parte superior.

se muestran en la figura 5.2. El RLS es uno de los elementos del SCLL que se introduce como una parte esencial del SCLL. El RLS tiene la función de incrementar la capacidad de coleccionar luz, ya que este refleja hacia el área de concentración una porción de la cantidad de luz coleccionada por la CL. Cada una de sus superficies de la CL reflejará una porción de la luz incidente en ella hacia el RLS y consecuentemente la luz se reflejará en el área de concentración aumentando el

flujo radiante en esta zona.

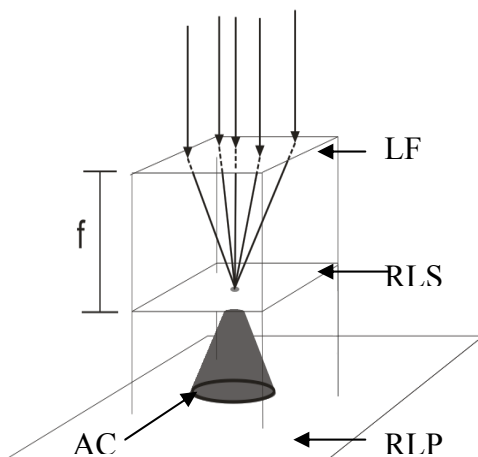


Figura 5.3 Trazo de rayos en un SCLL.

Una de las características del RLS es que tiene una abertura de 5 mm de diámetro en su centro, ésta abertura permite el paso de la luz concentrada por la LF en el plano superior del RLS. (Fig.5.3). La luz concentrada atraviesa el RLS y se proyecta sobre el área de

concentración. En el área de concentración se coloca el fotodetector para medir el flujo radiante colectado por el SCLL. Si deseáramos implementar un SCLL a un sistema de iluminación natural, se colocaría un manojo de fibras ópticas en el área de concentración en lugar del fotodetector.

Ahora bien, el SCLL también puede representar un sistema colector de luz a escala que está acoplado a un tubo de aluminio en el área de concentración. Como el cono de radiación producido por la lente incide directamente en el área de concentración, la luz viajará desde la entrada del tubo hasta la salida del mismo. A la salida del tubo tendremos que el flujo radiante, es directamente proporcional al producto de la reflectancia del tubo y del flujo radiante de entrada. Por lo tanto al conocer la reflectividad del interior del tubo, es posible inferir el flujo radiante colectado por el SCLL. El realizar los experimentos de caracterización de los SCLL acoplados a un tubo permitirá evaluar la eficiencia y el flujo colectado para cada uno de los SCLL propuestos.

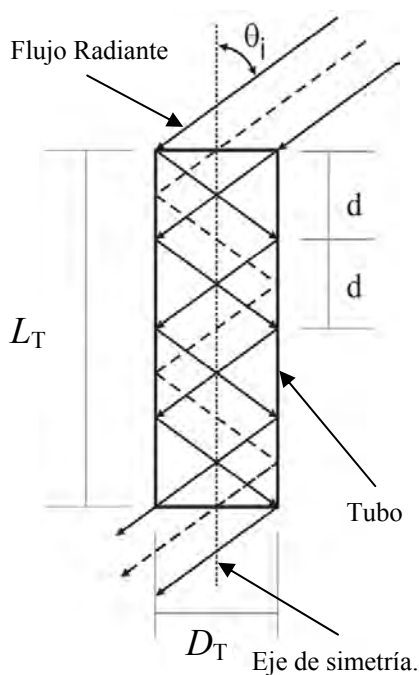


Figura 5.4 Esquema de un *Lightpipe*.
D es el diámetro del tubo, L_T su longitud y θ_i el ángulo de incidencia.

Conocer el modelo matemático de la transmitancia en un *Lightpipe* permitirá observar cuales son las variables importantes a considerar en su diseño. Comencemos por utilizar un corte transversal de un tubo (Fig. 5.4), que representa el *Lightpipe*. Los rayos trazados en la figura representan la trayectoria del flujo radiante incidente. Si somos estrictos, el Vector de Pointing (\vec{S})^[30] será la representación de la Irradiancia incidente en la boca del tubo, y podemos representar su magnitud como I . La dirección del

vector estará definida por el ángulo de incidencia (θ_i) que es formado con el eje de simetría del tubo. Al observar la Fig. 5.4 deducimos que la cantidad de flujo radiado transmitido a la salida del tubo está en función de θ_i , de la longitud del tubo L_T , el diámetro D_T y de la reflectancia de la superficie interior del tubo (R). Ahora bien, si se toma en cuenta que el número de reflexiones en el interior del tubo está relacionado con el flujo a la salida del tubo, se obtiene el modelo siguiente:

$$I_{out} = I_{in} \cos \theta_i R^{\frac{L_T \tan \theta_i}{D}}, \quad (5.1)$$

donde $\frac{L_T \tan \theta_i}{D}$ es el número de reflexiones en el interior del tubo para un rayo desde la entrada hasta la salida. De manera que la transmitancia del *Lightpipe* estará definida por la razón de la irradiancia de salida y la irradiancia de

entrada: $T = \frac{I_{out}}{I_{in}}$.

La Fig. 5.5 muestra para diferentes longitudes de tubo, la variación de la

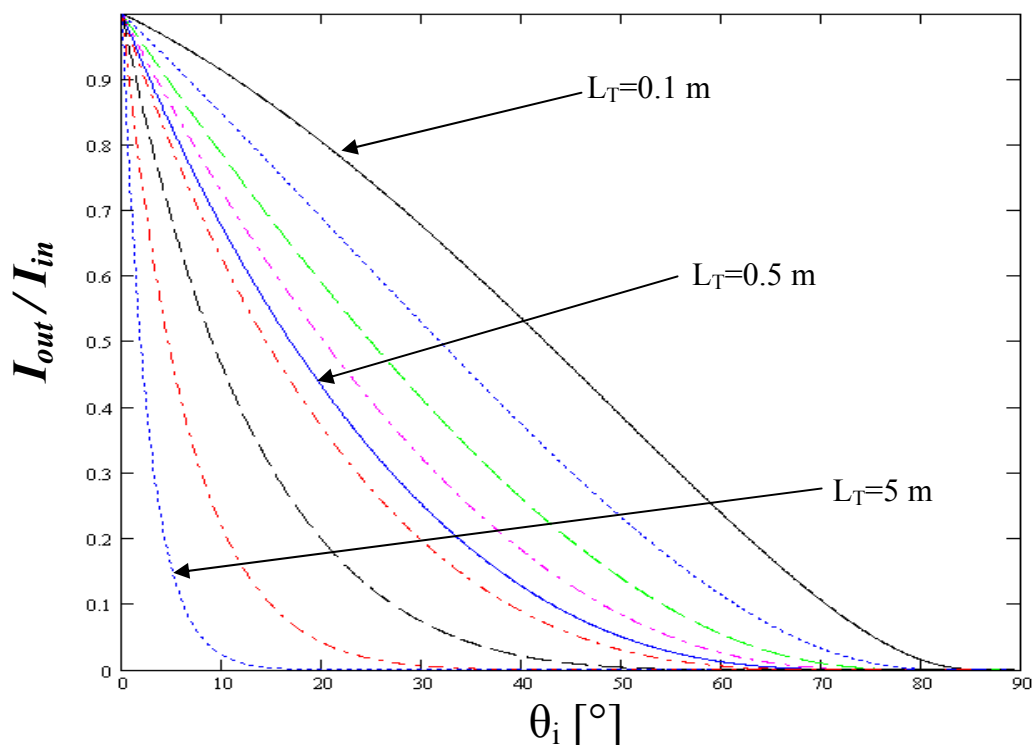


Figura 5.5 Curvas de la transmitancia de un tubo (Ec. 5.1) donde los valores para $D=12.5$ mm, $R=0.9$, y una L_T de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1, 2 y 5 m. Cada línea en la gráfica sigue el orden de derecha a izquierda para cada valor de L considerado.

transmitancia como función del ángulo de incidencia, con una reflectancia de 0.95. Si graficamos ahora las curvas de transmitancia para una $R=0.8$ (Fig. 5.6) considerando las mismas longitudes y el mismo diámetro del tubo. Al comparar las curvas obtenidas en la Fig. 5.6 con la Fig. 5.5, observaremos que la transmitancia tiene una mayor magnitud en un intervalo angular más amplio cuando la reflectancia interior del tubo es mayor. Por ejemplo, cuando $L_T=0.1$ m y $R=0.8$, la transmitancia se aproxima a cero en un $\theta_i \approx 65^\circ$. Ahora bien, para el mismo L_T y $R=0.9$ se tiene que la transmitancia se aproxima a cero a un $\theta_i \approx 85^\circ$. Lo anterior significa que si tenemos las mismas condiciones y únicamente se varía la reflectancia, obtendremos una mayor transmitancia del *Lightpipe*, donde ésta transmitancia se verá reflejada en una mayor magnitud de la irradiancia a la salida del tubo.

Por lo tanto podemos concluir que la transmitancia está en función de θ_i y que depende fuertemente del valor de la reflectancia. Mientras que los valores de L_T , D_T

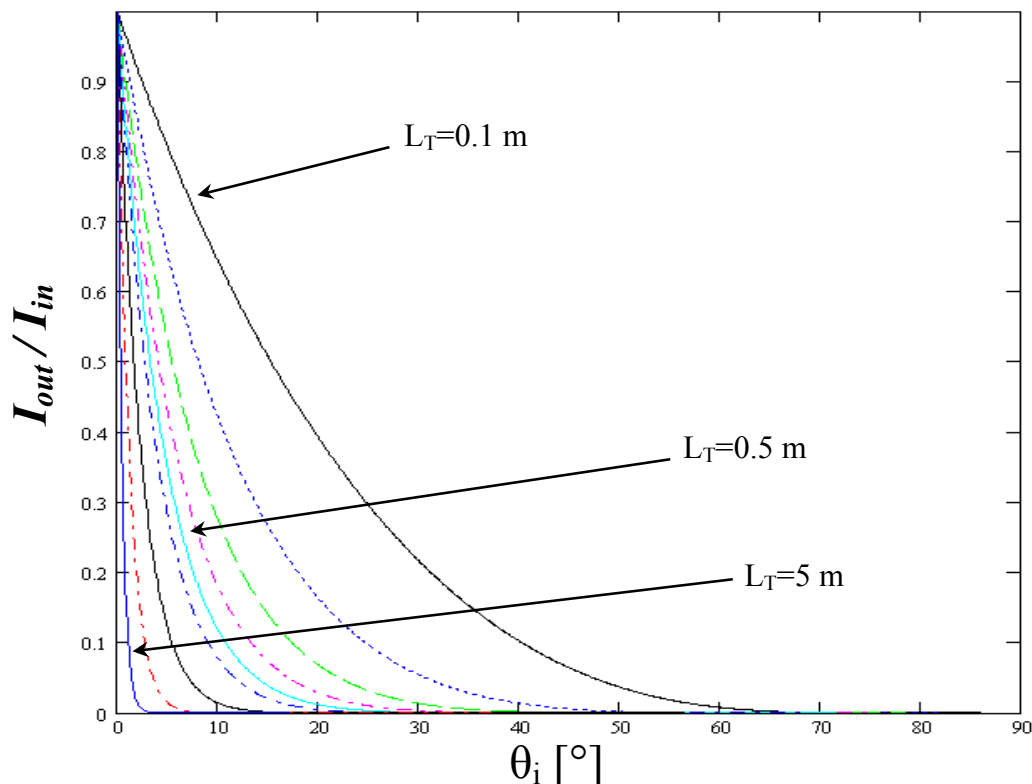


Figura 5.6 Curvas de la transmitancia de un tubo (Ec. 5.1) donde los valores para $D=12.5$ mm, $R=0.8$, y una L_T de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1, 2 y 5 m. Cada línea en la gráfica sigue el orden de derecha a izquierda para cada valor de L considerado.

son importantes para obtener en conjunto con la reflectancia interior del tubo, un sistema que proporcione la mayor transferencia de energía luminosa a la salida del tubo. El utilizar materiales de alta reflectancia será un aspecto a tomar en cuenta para elevar la transmitancia de *Lightpipe*. En la actualidad existen materiales como la Plata (Ag) que posee una alta reflectancia de 0.97, aunque bien puede representar un costo elevado puede incrementar la cantidad de flujo radiante a la salida del mismo. Sin embargo existen materiales más económicos que pueden implementarse para fabricar el interior de los *Lightpipe*, el caso más común es el Aluminio (Al) que posee una reflectancia de 0.86 a 0.96.^[7-42].

La reflectancia que ofrece el aluminio y su bajo costo, influyo para emplearlo como guía óptica en las pruebas experimentales. Los tubos empleados fueron pulidos y comparados con las curvas de transmitancia obtenidas de la Fig. 5.6, de donde se infirió que el valor de la reflectancia del interior de los tubos era $R \approx 0.8$. El bajo valor alcanzado de la reflectancia se debe a que los tubos de aluminio fueron pulidos de forma manual, no obstante, son útiles para caracterizar los SCLL.

5.1 Pruebas Experimentales de los Prototipos

Una vez considerados los aspectos de la sección anterior procedí a realizar los experimentos de caracterización para cada SCLL (Fig. 5.1), donde tomamos en cuenta que los SCLL1, SCLL2, SCLL3 y SCLL4 emplean una lente de Fresnel de 50 mm de diámetro y un foco de 36 mm. Es importante mencionar que el SCLL5 consiste solamente de un reflector primario, donde se soporta el tubo solamente. Las dimensiones y las configuraciones de los 7 prototipos se especifican en la Fig. 5.1. El proceso de caracterización consistió en realizar un barrido en ángulo de una

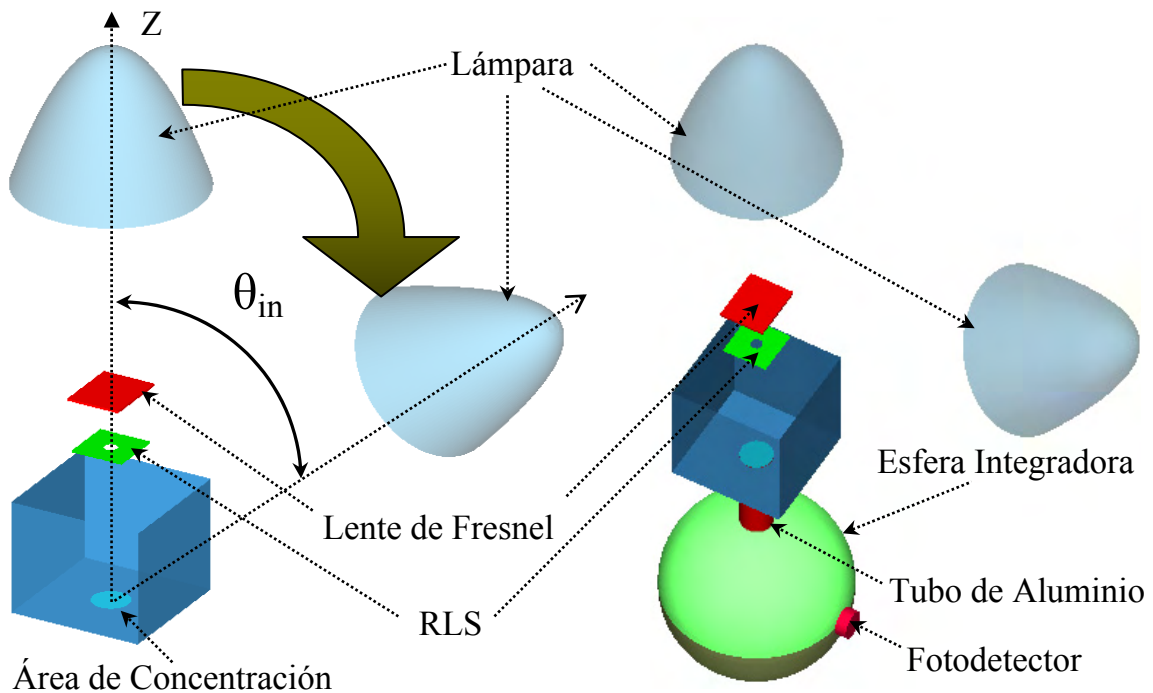


Fig. 5.7 Sistema de caracterización para los SCLL.

fuelle de radiación directa (Fig.5.7). La finalidad es observar la eficiencia y la cantidad de flujo radiante colectado de cada SCLL y así hacer una comparación entre ellos. Cada una de las pruebas se llevaron acabo en un cuarto oscuro, con el propósito de evitar contribuciones de fuentes de iluminación externas. Fue utilizada una lámpara incandescente de halógeno de 100W como fuente de radiación directa que incide en el SCLL. A la lámpara le fue agregado un tubo en la boca, con el objetivo de evitar el esparcimiento de la luz de la lámpara y las reflexiones de ésta en el entorno. Ésta acción permite obtener un haz de luz blanca colimado con un ángulo de divergencia reducido. Las mediciones se realizaron con un fotodetector (Newport, 818-SL) a una longitud de onda de 555 nm.

En el sistema de caracterización mostrado en la Fig. 5.7, se observara que hay una LF la cual es la parte concentradora y una CL que es la parte colectora del SCLL. Mientras que la LF concentra la luz incidente sobre ella, la CL realiza la tarea de colectar la luz en un ángulo sólido de 2π . Parte del flujo colectado por la CL incide en el RLS y éste a su vez refleja la luz al área de concentración. En esta

área los flujos provenientes de la CL, RLS y la lente de Fresnel se unen para formar un flujo total. El flujo total es el flujo radiante colectado y concentrado que puede acoplarse a fibras ópticas, guías de luz, celdas fotovoltaicas y tuberías de luz (*Light Pipes*). El flujo radiante cuantificado en el área de concentración es la magnitud física con la cual caracterizaremos la eficiencia del diseño del SCLL.

Los tubos empleados para la caracterización tienen diferentes largos y diámetros, lo que permite evaluar sistemas con diferentes ángulos de aceptación. Los diámetros empleados fueron de 1.25 cm y de 3.75 cm mientras que los largos fueron de 40 cm, 30 cm y 1 m. Al efectuar las primeras pruebas se observó, que el ángulo de inclinación produce una distribución en el espacio de la intensidad, a la salida del tubo. Además de ello el diámetro del tubo dificultaba cuantificar la potencia óptica a la salida pues el flujo radiante no incidía completamente en el fotodetector. Por lo que surgió la necesidad de utilizar una esfera integradora para cuantificar la luz capturada en función del ángulo de incidencia del flujo radiante. La esfera integradora permite medir adecuadamente la potencia óptica capturada no importando el lugar de incidencia del flujo luminoso ni su distribución de intensidad (Cap 2), obteniendo así una correcta cuantificación de la potencia óptica. Dado el alto costo que representa una esfera integradora (\$3,000-10,000 dls), me di a la tarea de fabricar una esfera integradora de 25 cm de diámetro. La superficie de la esfera fue fabricada con papel con un espesor de 1.5 mm y en su interior tiene un recubrimiento de pintura blanca (Vinimex de Comex) que proporciona una reflectancia aproximada a 0.9. El fabricar esta herramienta de trabajo permitió adecuarla a las necesidades de los experimentos, ya que era posible adaptarle a la esfera cualquier puerto de entrada o salida.

La figura 5.8 muestra una foto del sistema implementado. Una vez establecido el sistema de caracterización se desarrollaron los experimentos con el siguiente protocolo:

- Primero se evaluaba cada uno de los SCLL's en función del ángulo de incidencia del flujo luminoso.
- El segundo paso consistía en normalizar cada una de las medidas adquiridas, con el valor registrado a un ángulo de incidencia de 0° .
- Como tercer paso se grafican las normalizaciones y se comparan los sistemas entre sí.

En primera instancia presentaré las gráficas de las mediciones de cada SCLL para un tubo de 35 mm de diámetro, con longitudes de 10 y 30 cm. La abertura en el RLS tiene un diámetro de 5 mm para cada caso. En cada una de las gráficas se muestra una tabla en donde se encuentran los valores empleados para normalizar a

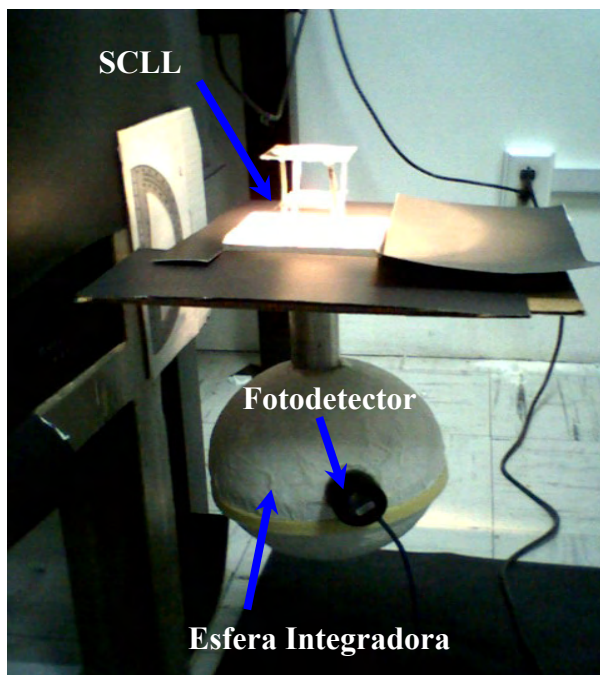


Fig. 5.8 Sistema de caracterización SCLL.

cada una de ellas. Cada uno de los valores de la tabla, son los que corresponden a la incidencia normal de la luz sobre el sistema. El SCLL5 es el tubo solo con su base, el flujo radiante que capture el SCLL5 será nuestra referencia para comparar los sistemas SCLL. Observemos que cada columna de la tabla consta de 3 tipos de SCLL, el subíndice del SCLL muestra el largo del tubo utilizado.

Las figuras 5.9 y 5.10 muestran la eficiencia relativa de cada SCLL en función del ángulo de incidencia de la luz. Realizar la comparación entre la Fig. 5.9 y la Fig.5.10 es posible, porque los SCLL's son los mismos en ambos y solo varía la longitud del tubo de 10 cm a 30 cm respectivamente. Al comparar las gráficas observamos que el ángulo de aceptación y la eficiencia relativa del sistema se ven afectados cuando varía la longitud del tubo. Es notable que el SCLL1 y SCLL 2 presentan una eficiencia relativa mucho más que la del SCLL5 a partir de los 20 °. Sin embargo podría surgir la pregunta siguiente: ¿Qué sucede con el flujo radiante capturado?. El flujo radiante capturado es prácticamente el mismo, por ejemplo en la Fig. 5.9 el SCLL1 a 25° captura un flujo radiante de 5.9 μW mientras que el SCLL5 captura 6.3 μW . Sin embargo a partir de 50 ° el SCLL1 da desde 1 a 3 veces más de flujo radiante capturado, el cual representa una diferencia del 7%, esto significa que el SCLL1 mejora la función de coleccionar flujo radiante a ángulos mayores. Cabe

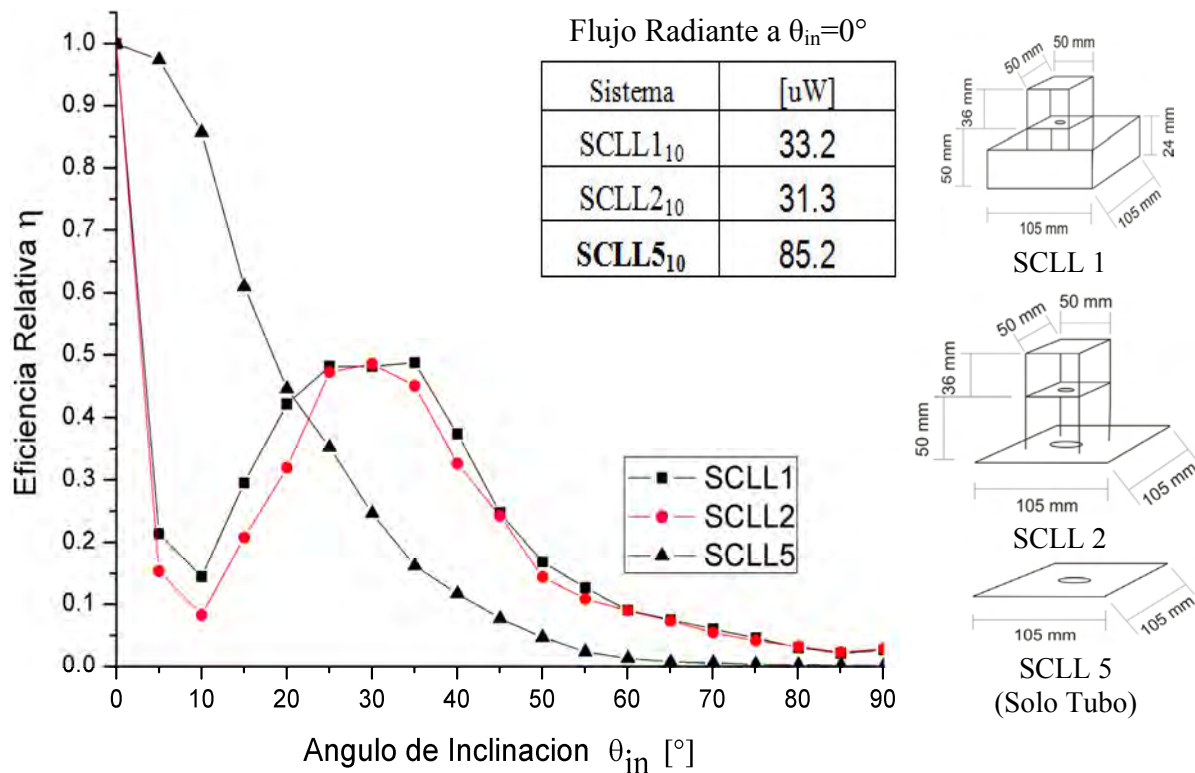


Figura 5.9 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL1, SCLL2 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tiene una longitud de 10 cm.

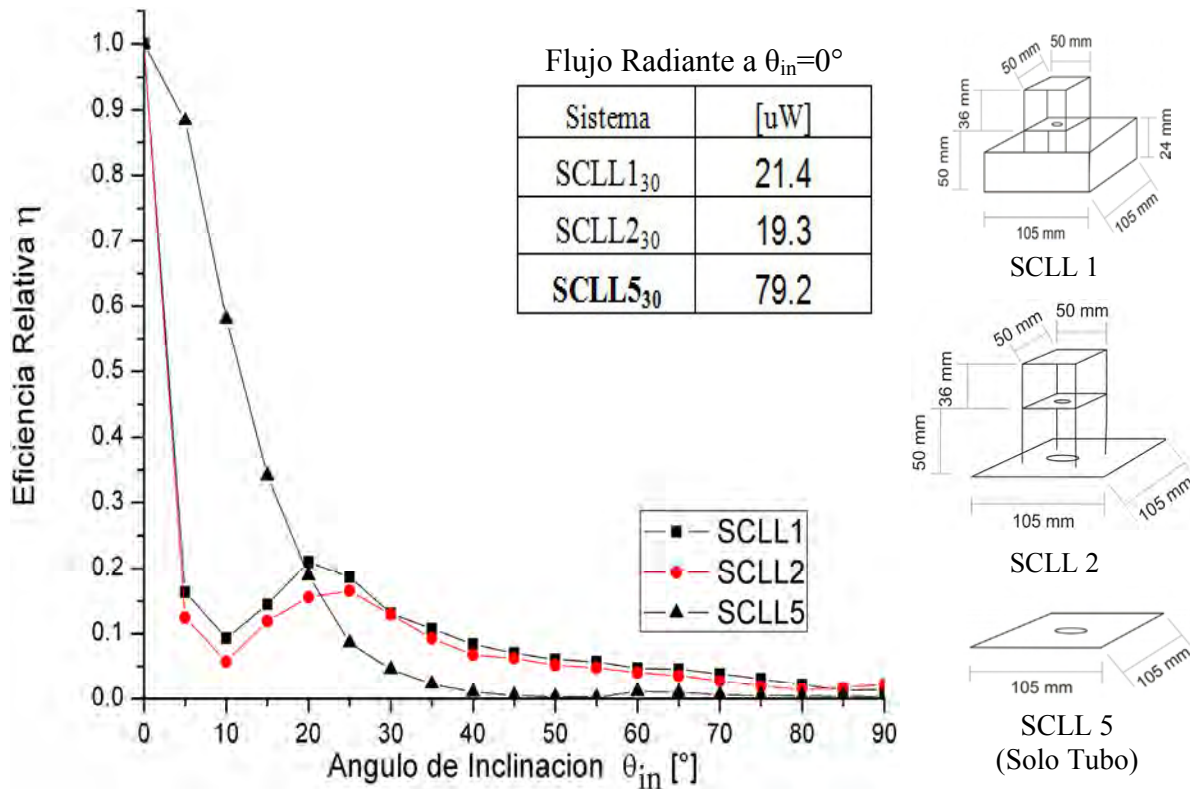


Figura 5.10 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL1, SCLL2 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tiene una longitud de 30 cm.

mencionar que se está caracterizando con una fuente directa, lo cual sugiere que si existiera radiación difusa la SCLL1 superaría en amplitud y en un rango angular más amplio la capacidad de colección del SCLL5.

En cada una de las pruebas se midió el flujo radiante capturado por el SCLL5, esta acción tenía la finalidad de establecer una referencia comparativa y observar que existían las mismas condiciones de iluminación. Observemos ahora en la Fig. 5.11 y 5.12 que existe un aumento en la eficiencia relativa de los sistemas SCLL3, SCLL4 conforme aumenta el ángulo de incidencia de la luz, mientras que la eficiencia relativa del SCLL5 va decayendo. A diferencia del caso anterior la distancia entre la superficie inferior de la CL y el RLS (Reflector Lambertiano Secundario) es la mitad. El acercamiento del RLS permite mejorar la cantidad de flujo radiante para el caso de una longitud de 10 cm hasta en un 30%. Este dato puede observarse al comparar los valores del flujo radiante capturado por el

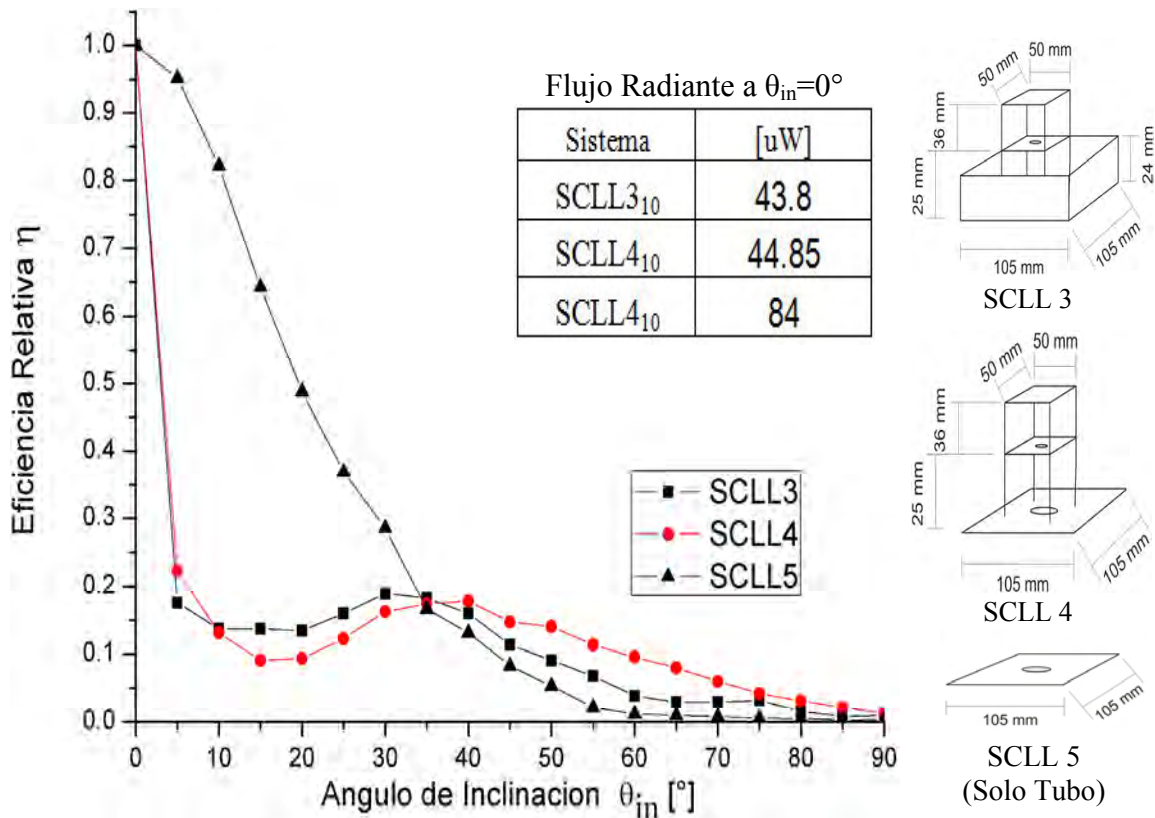


Figura 5.11 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL3, SCLL4 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tiene una longitud de 10 cm.

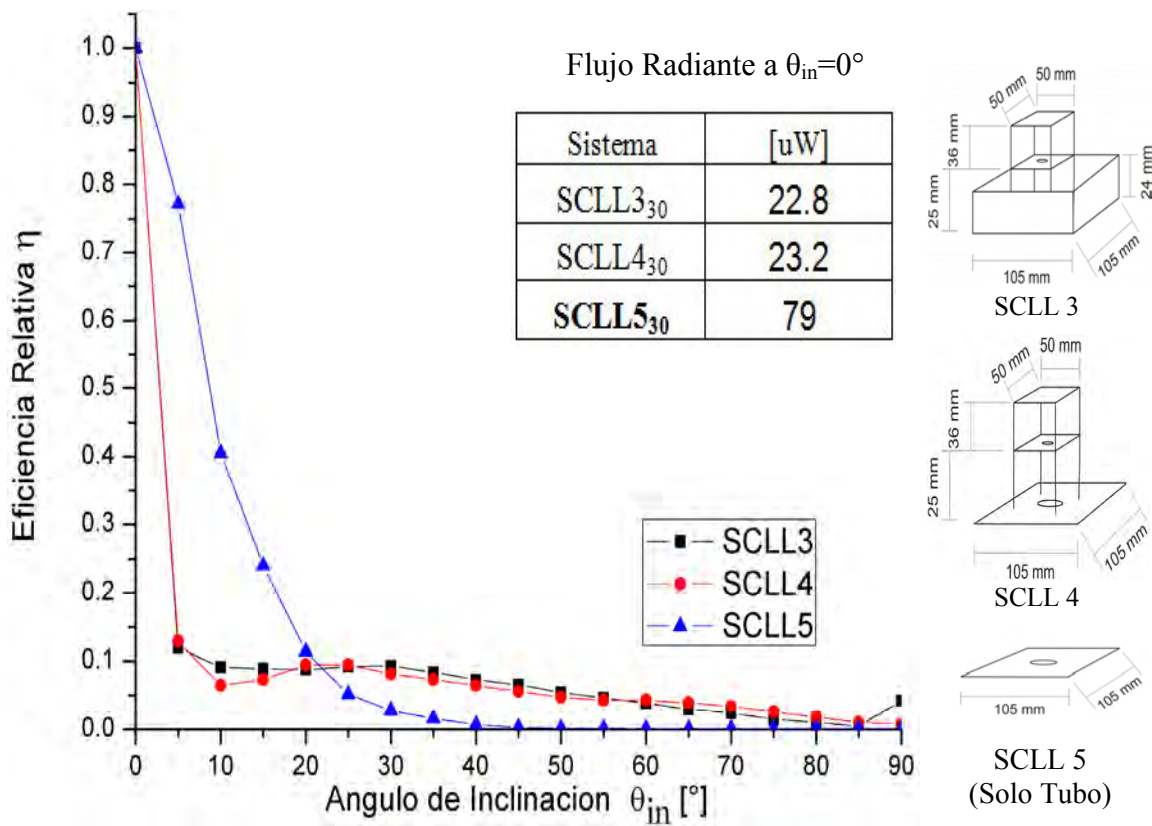


Figura 5.12 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL3, SCLL4 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tiene una longitud de 30 cm.

SCLL1₁₀ y SCLL1₃₀ los cuales se pueden observar en las tablas de las figuras 5.9 y 5.11. Parte de la baja eficiencia del SCLL5 para ángulos mayores, se debe a que no posee ningún sistema de CL ni RLS, en cambio los demás sistemas pese a que no poseen una buena eficiencia para ángulos de incidencia pequeños, estos sistemas incrementan su eficiencia relativa y el flujo radiante capturado para ángulos mayores en los que el SCLL5 esta por debajo de ellos. Ciertamente la baja eficiencia del SCLL4, SCLL3, SCLL2, SCLL1 se debe a que el RLS obstruye el ángulo de aceptación del tubo.

Aunque bien podría considerarse como una desventaja la posición del RLS, el RLS permite el aumento de la captura de flujo radiante a ángulos que están fuera del alcance del tubo solo (SCLL5). La observación anterior permite inferir que los sistemas con CL incrementan la captación de luz para ángulos grandes (mayores que 20°), lo cual sugiere que incrementan el ángulo de aceptación de los sistemas. La utilidad de estas CL's ofrece una novedosa forma de ampliar los ángulos de aceptación de los sistemas comerciales incrementando el flujo radiante capturado e inherentemente su eficiencia a lo largo del día.

Ahora bien para verificar el comportamiento de estos sistemas se realizo un barrido a una mayor intensidad luminosa, seleccionando a SCLL3 y al SCLL5. El ángulo de intersección en el que el sistema tiene un incremento de la eficiencia permaneció igual. Este ángulo indica que la CL en cada configuración ofrecerá a partir del ángulo de intersección una mayor cantidad de flujo radiante capturado. Éste ángulo se encontrará en la intersección del SCLL que este caracterizándose con el SCLL5. Un ejemplo de este ángulo de intersección lo encontramos en la Figura 5.13, aquí el ángulo es señalado donde la línea de la eficiencia relativa del SCLL3 corta a 35° la del SCLL5.

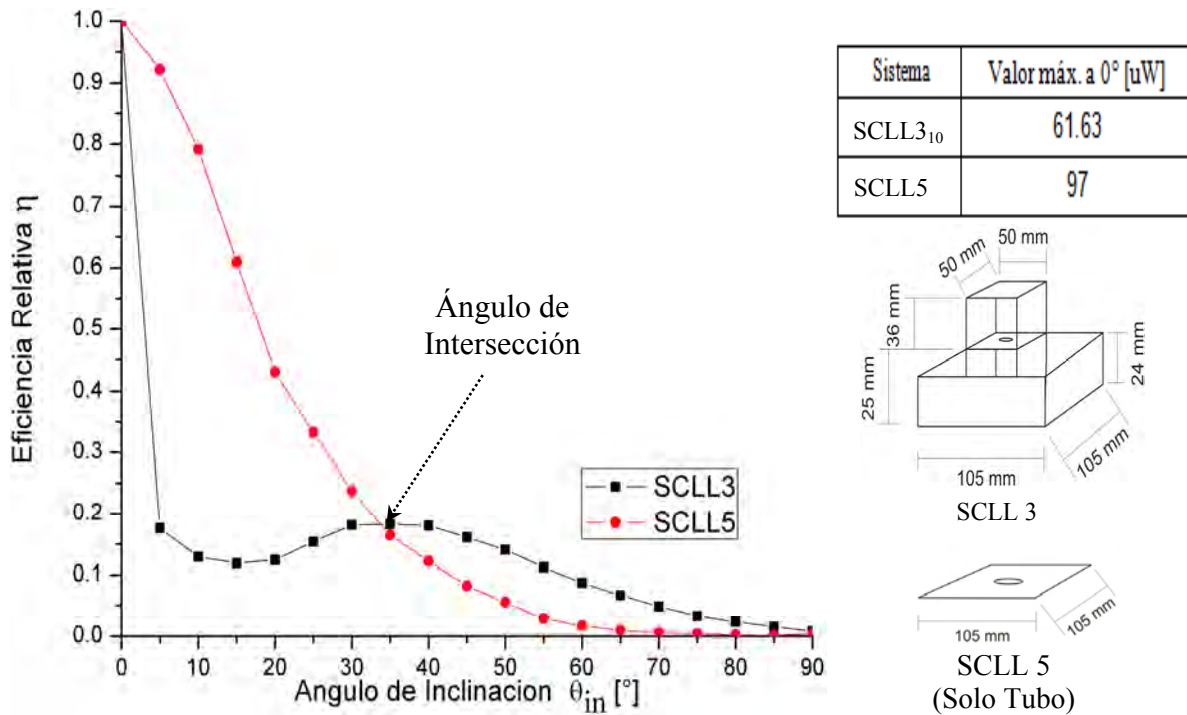


Figura 5.13 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL3 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tiene una longitud de 10 cm.

Con la finalidad de observar exclusivamente la contribución de las cavidades lambertianas y el SRL, se midió el flujo capturado por los sistemas SCLL6 y SCLL7, los cuales son sistemas que no tienen abertura ni lente de concentración. Los resultados de las pruebas aplicadas a estos SCLL's pueden observarse en la figura 5.14. Las gráficas demuestran una mayor eficiencia relativa a partir de los 10°, y debe de notarse que al implementar una CL como reflector secundario, se incrementa la cantidad de flujo radiante colectado. Ésta característica de usar como reflector secundario una CL deberá tomarse en cuenta para el diseño de un nuevo prototipo con la finalidad de mejorar el diseño del SCLL. Finalmente los valores registrados para la normalización de la Fig. 5.14 se encuentran en la Tabla.5.1.

Figura 5.14	[uW]
SCLL6 ₁₀	4.2
SCLL7 ₁₀	1.9
SCLL6 ₃₀	5.05
SCLL7 ₃₀	2.04

Tabla 5.1 Valor de potencia óptica a incidencia normal sobre el SCLL.

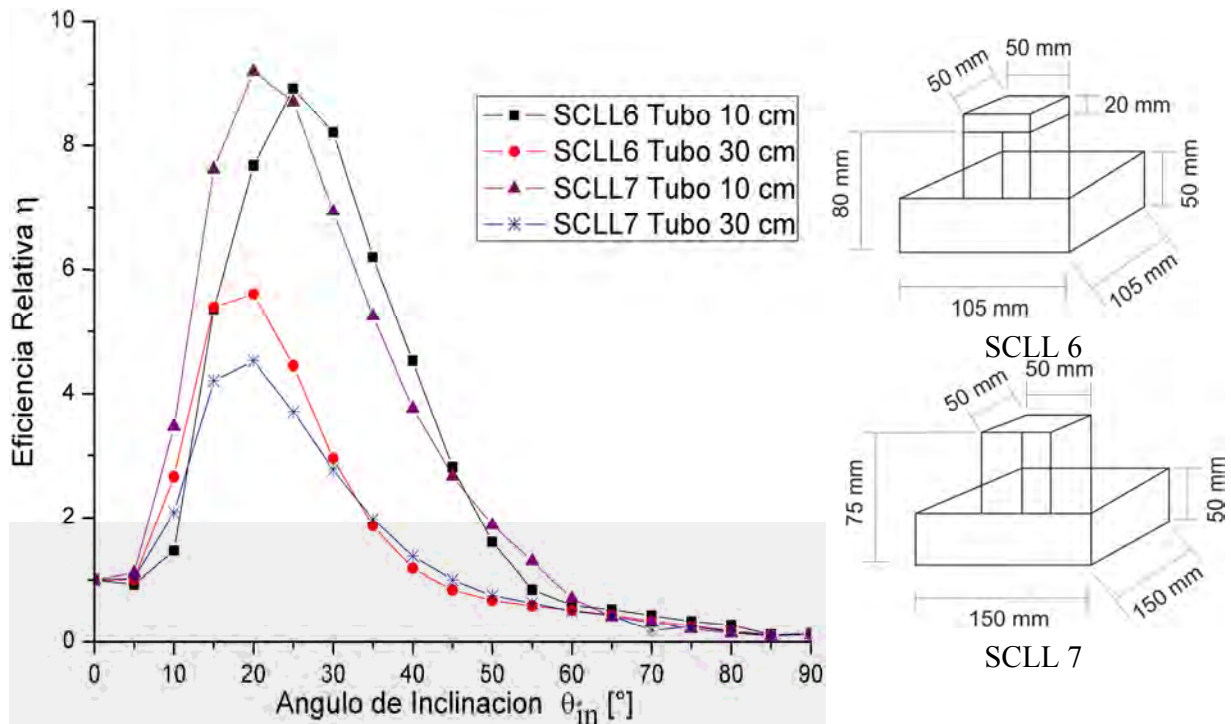


Figura 5.14 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL6 y SCLL7. El diámetro del tubo es de 3.5 cm y tienen longitudes de 10 cm y 30 cm.

La gráfica de la Fig. 5.14 muestra la eficiencia relativa de cada uno de los SCLL y que esta varía dependiendo de la configuración del RLS. El SCLL6 colecta más cantidad de flujo radiante que el SCLL7 el cual posee una mayor área de colección. Con ello llegué a la conclusión de que no necesariamente el tener una mayor área en el sistema colector, daría como resultado un incremento de la energía colectada. Si no que existe un compromiso entre las dimensiones de la CL y el RLS así como a la distancia que se coloca. Encontré que el tamaño de la base de la CL debe tener una relación de 1:3 con respecto al diámetro del tubo, para el caso de la altura de las paredes de la CL se debe tener una relación 1:2. La relación de las longitudes de sus lados del RSL es de 1:1.2 respecto al diámetro del tubo, y para la distancia de separación entre la boca del tubo y el RLS entre un rango de 1:2 y 1:3 con respecto al diámetro del tubo. Por otra parte es notable también una mayor transmisión de luz para longitudes del tubo más cortas, donde el ángulo de aceptación depende de la longitud y radio del conducto. Lo anterior se mostró con el modelo matemático de

un tubo de luz en la (Ec. 5.1). Por lo tanto, el aplicar el diámetro correcto para una longitud determinada permitirá incrementar la eficiencia de los sistemas en los Light pipe.

Al finalizar los experimentos con el tubo de 37.5 mm de diámetro, procedí a realizar los experimentos para el tubo de 12.5 mm de diámetro cuya longitud es de 40 cm. El protocolo para realizar las mediciones fue el mismo. Los resultados obtenidos para los sistemas SCLL6 y SCLL7 se encuentran en las figuras 5.15 y 5.16, para ambos casos se uso un Reflector Lambertiano Secundario (RLS) de 2.5 x 2.5 cm.

Se observa que al disminuir el tamaño del segundo reflector cambia el ángulo de aceptación, la cantidad de flujo colectado, y el intervalo de operación del colector de

Figura 5.15	[uW]	Figura 5.16	[uW]
SCLL6 ₄₀ sin SRL	9	SCLL7 ₃₀ con SRL	0.0865
SCLL6 ₄₀ con SRL	0.104	SCLL5₃₀	7.9
SCLL5₄₀	8.2		

Tabla 5.2 Valor de potencia óptica a incidencia normal sobre el SCLL.

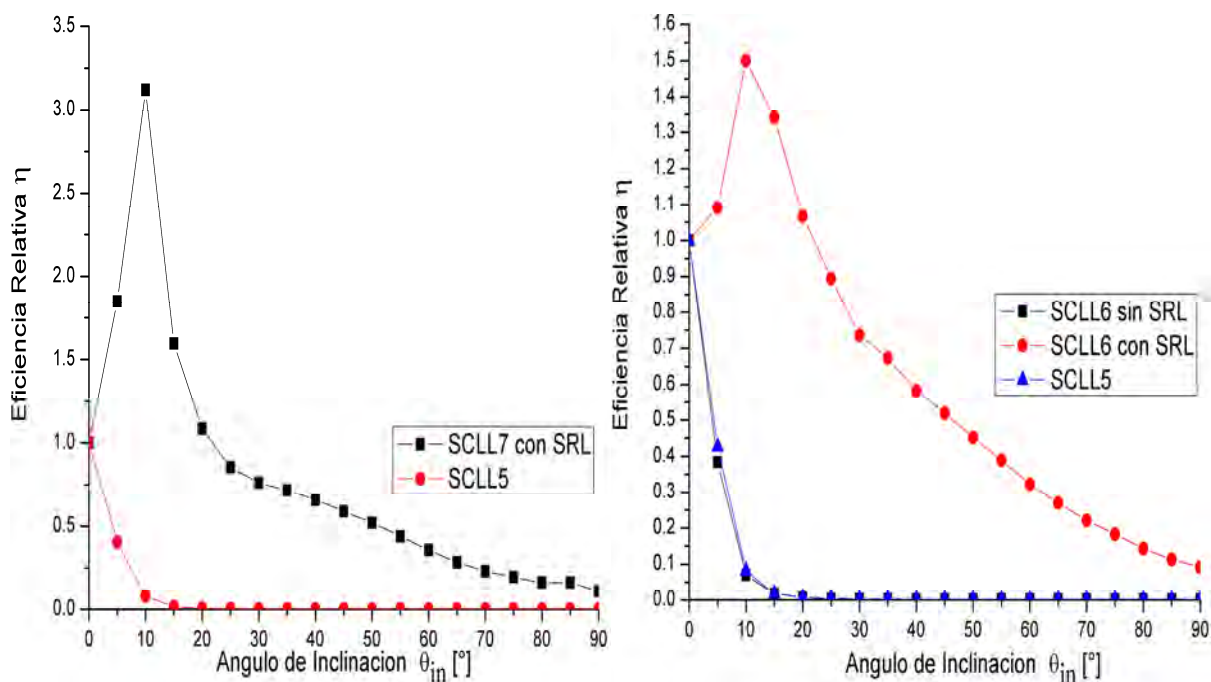


Figura 5.15 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL6 y SCLL5. El diámetro del tubo es de 1.25 cm y tienen longitudes de 40 cm.

luz a lo largo de un día. Lo cual significa que incidirá la luz desde un ángulo mucho menor que en los anteriores experimentos. En la Fig. 5.16 se observa la gráfica del flujo radiante capturado como función de su ángulo de incidencia, donde el valor de normalización se encuentra en la Tabla 5.2. Es notorio que a partir de los 15° y 20° respectivamente, el sistema SCLL6 y SCLL7 empiezan a contribuir a la captura de luz superando al SCLL5 que es únicamente el tubo. Aunque ciertamente el flujo radiante más significativo se encuentra en el intervalo de 0-20°. De las graficas de la Fig. 5.16 podemos inferir que el RLS al disminuir sus dimensiones, aumenta significativamente la eficiencia del SCLL, y la CL del sistema empieza a contribuir desde ángulos menores. Esto quiere decir que la relación del diámetro del tubo y el tamaño del RLS debe ser prácticamente 1:1 y una altura 1:5 minima respecto al diámetro del tubo. Finalmente en las gráficas de la Fig. 5.16 observamos que la cantidad de luz capturada por el SCLL6 y SCLL7 puede ser 4 veces más que la del SCLL5. Con este último resultado podemos concluir que una CL y un RLS puede incrementar la cantidad de flujo radiante capturado en un SCL, o bien aumentar el

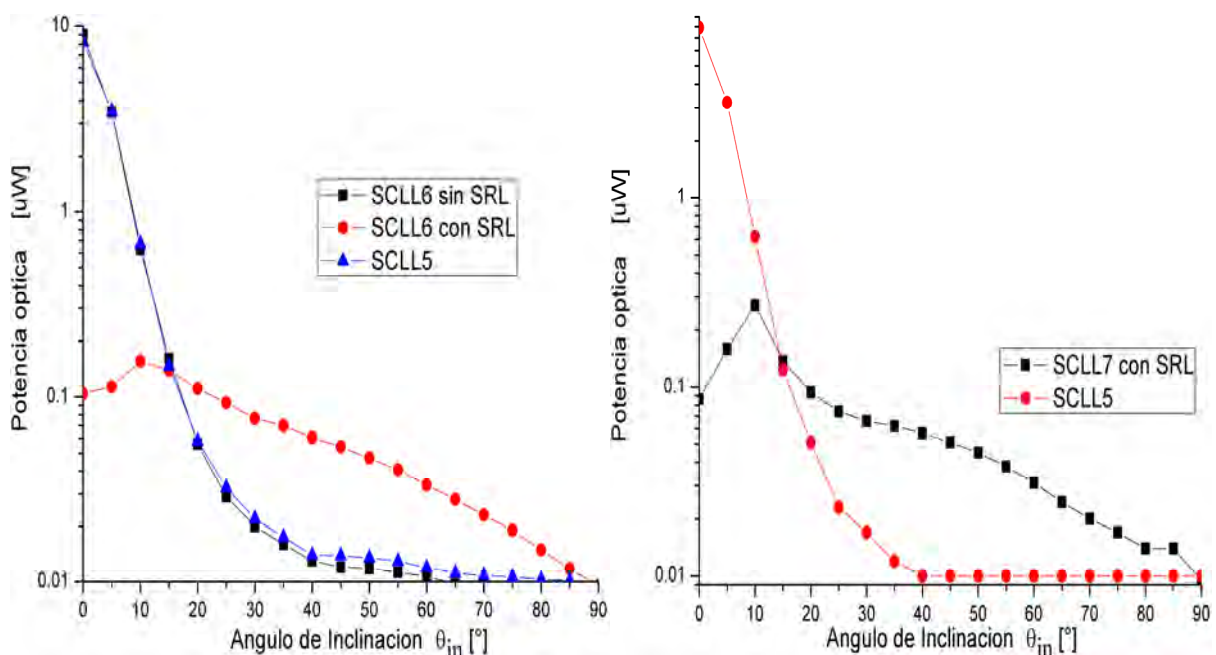


Figura 5.16 Gráfica de la potencia óptica capturada por los sistemas SCLL6 y SCLL7. El diámetro del tubo es de 1.25 cm y tienen longitudes de 40 cm.

flujo que incide en una *Lightpipe*. Sea de notar que la escala vertical de las gráficas de la figura 5.16 es logarítmica, la razón es que se desea comparar la contribución de flujo radiante que es colectado por esta clase de sistemas propuestos como lo vería el ojo humano. Al observar las gráficas es posible cuantificar y comparar la cantidad de flujo radiante capturado por cada SCLL. Aunque alguno podría argumentar que es poca la cantidad de energía radiante capturada, no sería así para nuestro ojo, ya que el ojo tiene una respuesta a la luz de tipo logarítmico, lo cual significa que la percepción de la intensidad de la luz por medio de nuestros ojos es subjetivo. Un ejemplo claro es cuando uno se encuentra expuesto directamente a la luz del sol por un par de minutos y posterior a ello entra a una habitación con muy poca iluminación, al momento la persona tendrá una capacidad de visión limitada y seguramente le parecerá muy oscuro e imposible para leer. Sin embargo después de un periodo de tiempo los iris de los ojos se dilatan y permiten el paso de la luz, y lo que antes parecería casi completa oscuridad ahora es más que suficiente para leer. Esta característica permitirá que sea útil para el ojo humano el flujo radiante capturado por nuestros sistemas SCLL. Además habrá que hacer hincapié que la caracterización se llevo a cabo con radiación directa, por lo que el flujo radiante y las eficiencias de los SCLL incrementaran cuando se expongan a radiación difusa, como se discutió en el capítulo anterior. En el siguiente capítulo abordaremos las expectativas de esta línea de investigación así como la propuesta de un diseño prototipo final.

Capítulo 6

Conclusiones

Los resultados obtenidos de los experimentos realizados en los capítulos 4 y 5, muestran las ventajas del uso de las Superficies Lambertianas (SLs) especialmente la denominada Cavidad Lambertiana. Se comprobó que al utilizar un arreglo de SLs uno puede obtener un incremento de eficiencia en los sistemas colectores de luz, especialmente en condiciones adversas como podrían ser días nublados o bien de obstrucciones que se encontrasen en su entorno. Los experimentos del capítulo 4 demostraron que en condiciones de radiación difusa las superficies lambertianas poseen una capacidad de coleccionar luz en un ángulo sólido muy cercano a 2π , a comparación de los sistemas concentradores típicos que poseen ángulos de aceptación típicamente menores a $\theta_{\max}=24.62^\circ$ (Ec. 3.4-3.7, para $f=3$ cm y $D=2.5$ cm).

Al notar el comportamiento de las SLs surgió la idea de implementar una CL junto con un RLS y una LF, lo que me permitió fabricar los sistemas que llamamos SCLL (Cap. 5), en esta clase de sistemas observamos nuevamente algunas de las cualidades de las SLs, como la capacidad de coleccionar la luz proveniente de ángulos grandes del cual el porcentaje de luz difusa es significativo a partir de ángulos de incidencia mayores a 40° para SCLL1 y SCLL2, mientras que para el SCLL4 y SCLL5 a partir de 50° . En cada uno de estos sistemas se observó la posibilidad de capturar el flujo radiante en un ángulo sólido de 2π , y que el flujo radiante capturado puede ser reflejado o dirigido hacia una zona o región en particular en este caso era el área de concentración. Los conocimientos adquiridos a través de la observación

y experimentación, permiten asentar un nuevo concepto en el diseño de sistemas colectores de luz, el cual se basa en cavidades lambertianas o bien en el arreglo de superficies blancas. Las nuevas ideas para el diseño consisten en tomar consideraciones que pueden incrementar la cantidad de flujo radiante capturado. La primera consiste en desarrollar un reflector lambertiano secundario el cual permita el paso del flujo al área de concentración en el transcurso del día. La necesidad es debida a la etapa de concentración, la cual es efectuada por una lente de Fresnel, como la lente genera la imagen del sol en su plano focal y este recorre la bóveda celeste, la imagen en el plano focal irá desplazándose a lo largo del día en una trayectoria de tipo elíptico. Una soluciones que proponemos es el realizar ranuras de tipo elíptico y de un tamaño 8:1 en relación con el diámetro del área de concentración (Fig 6.1). Otra de las posibilidades para mejorar la captura de la luz si se fuera a implementar en un *Pipelight* , es que el segundo reflector sea movable con la finalidad de que en las horas de alrededor del medio día, se permita la transmisión completa del flujo radiante del sol sin obstrucción alguna, esto significaría que el segundo reflector se pudiera desplazarse a un lugar donde no se obstruya el área de concentración, y que una vez pasado este momento se volviese a colocar en su lugar. Lo anterior es posible al implementar algún sistema

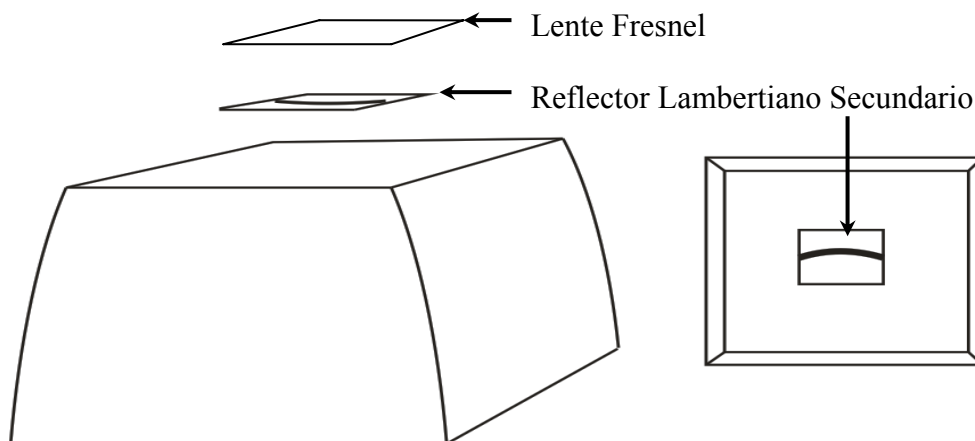


Figura 6.1 Esquema de un prototipo de SCLL, vista lateral a la izquierda y vista superior a la derecha.

mecánico sencillo. El objetivo final sería el empalmar el comportamiento de los sistemas. Por ejemplo, el comportamiento del sólo tubo observaba mayor ganancia en ángulos pequeños (Fig 5.10 SCLL5), mientras que los sistemas SCLL mostraban una capacidad de concentración mayor para ángulos mayores (Fig 5.10 SCLL1 y SCLL2). Al desplazar el reflector lambertiano secundario se obtendría la curva del tubo solo, el reflector secundario se colocaría de nueva cuenta para ángulos de la incidencia del flujo radiante mayores en los cuales no es apto el solo tubo. De manera que al ser movable el reflector secundario puede tenerse una mejor capacidad de colección de flujo radiante, esto lo podemos observar en la Fig. 6.2 donde se toma de ejemplo la Fig. 5.10. Primeramente observamos el comportamiento sólo tubo por la línea mas gruesa cuando no esta colocado el segundo reflector y posterior a colocar el segundo reflector se obtendría la captación correspondiente al SCLL. Por otra parte el uso de recubrimientos de más alta

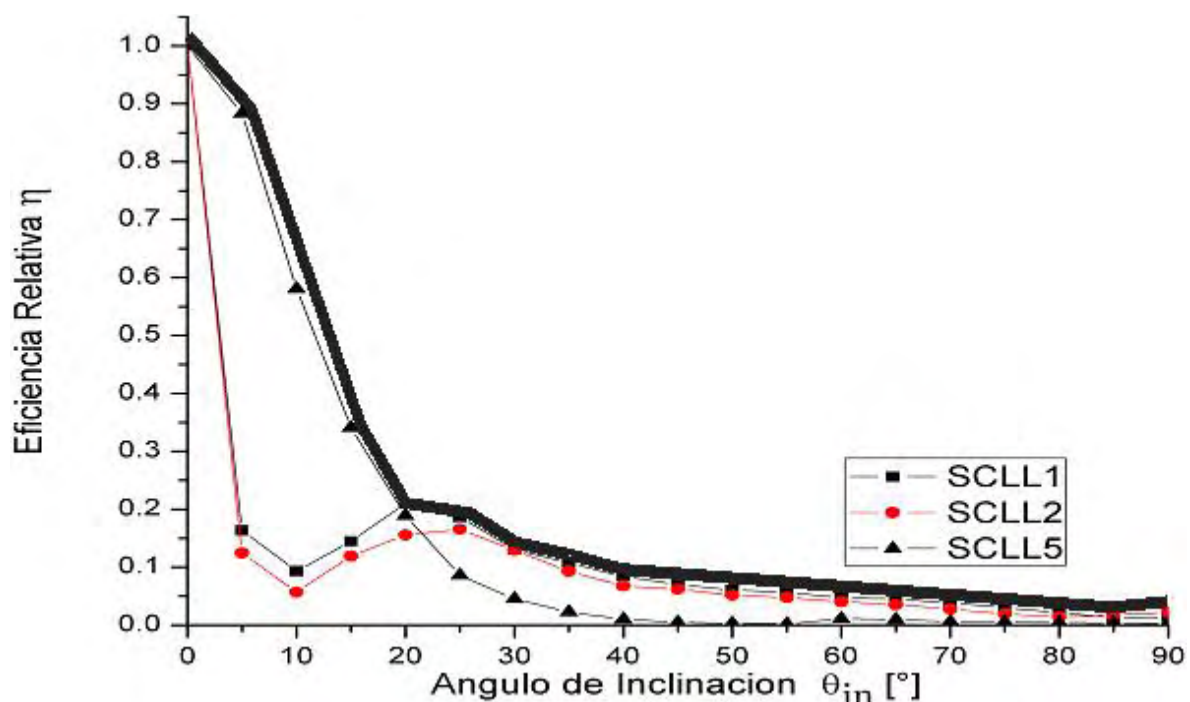


Figura 6.2 Gráfica de la eficiencia relativa para los sistemas SCLL1, SCLL2 y SCLL5. La línea más gruesa representa el empalme de los sistemas cuando se implemente un RLS móvil.

reflectancia como lo es el Sulfato de Bario, con este tipo de recubrimientos se llegan

a obtener una reflectancias de hasta 0.996. Otra de las ideas para mejorar el sistema consiste en que las paredes de las cavidades lambertianas tuvieran radios de curvatura grandes, más no infinitos como fue el caso de las SCLLs. La razón se encuentra en que al tener un curvatura es posible redirigir una mayor porción de luz hacia el área de concentración. Sin embargo esta nueva idea requerirá de un estudio mas exhaustivo de los prototipos. Por otra parte si consideramos el efecto que tienen las cavidades lambertianas, el cual consiste en mantener un flujo radiante colectado constante bajo condiciones de radiación difusa, los SCLLs pueden ser implementados a los sistemas de iluminación comerciales como el SP2 de Parans. Cuya eficiencias caen por debajo del 0.07 y que con estos sistemas complementarios la capacidad de colección podría llegar a incrementarse en un 50%, no obstante habrá que caracterizar su implementación.

6.1 Perspectivas de la línea de Investigación

Al finalizar esta etapa de experimentación con las SCLLs, surgen muchas posibilidades con las cuales podrían trazarse varios líneas de investigación. Ciertamente uno podría especializarse en la forma en que estas cavidades deben de ser diseñadas, y al diseñarse probar su eficiencia y compararlas. Especialmente al diseñar el segundo reflector y la forma que este debe de tener así como el tipo de abertura que debe tener. Por otra parte existe también la línea en al que se exploraría el uso de CPCs múltiples en un arreglo de flor, los cuales podrían servir para concentrar la luz en una nueva forma. La propuesta sería que parte interna que mira directo al sol sea reflectante y la parte posterior de su superficie fuera blanca. Será interesante conocer cuales son las expectativas con esta clase de sistemas que se proponen, o las cuales habrán de implementarse y caracterizarse.

Referencias

- [1] Stine W.B., y Diver, B.D. "Acompendium of solar Dish/Stirling Technology", *Sandia National Laboratories*, 1994, Report SAND93-7026 UC-236
- [2] PAT US6113255A1
- [3] PAT US006113255A
- [4] Griffin R.N, "Thin film solar reflectors", *Solar Energy Mater.* (1980) vol 3. pp 277–283.
- [5] Chen Y.T, Lim B.H, Lim C.S, Chong K.K, Tan B.K "High precision (1 part in 104) reflectivity measurement for the study of reflective materials used in solar collectors" *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2003) pp 305–314
- [6] Winston Ronald, Miñano C. Juan, Benitez Pablo "NONIMAGING OPTICS". *Elsiever Academic Press*, 2005. USA. ISBN:0-12-759751-4
- [7] Ibañez M, Rosell Polo J.R, Rosell Urrutia J.I, "Energías Renovables, Tecnología Solar" *Ed. Ediciones Mudi Prensa*. España. (2004). ISBN: 84-8476-199-1
- [8] www.solartube.com
- [9] www.skydome.com.au
- [10] Editorial. "Reporting solar cell efficiencies in Solar Energy Materials and Solar Cells" . *Solar Energy Materials & Solar Cells*. (2008) vol 92. pp371–373.
- [11] Tanaka M, "Development of HIT Solar Cells with More than 21% Conversion Efficiency and Commercialization of Highest Performance HIT Modules, " *Proceedings of the Third WCPEC*", Osaka Japan, (2003), pp. 955-958.
- [12] Mulligan W.P, "Manufacture of Solar Cells with 21% Efficiency," *Proceedings of the 19th EUPVSEC*, Paris, France, (2004), pp. 387-390.
- [13] King R.R., Law D.C., Edmondson K.M., Fetzer C.M., Kinsey G.S., Yoon H., Sherif R.A., and Karam N.H. "40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells"(2007) *Appl. Phys. Lett.* 90, 183516.
- [14] Willeke. G., "HIGH CONCENTRATION PHOTOVOLTAICS - STATE-OF-THE-ART AND NOVEL CONCEPTS" *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. Osaka. Japan. (Mayo 11-18,2003)
- [15] Xiao-Fan Li, Yue-Rui Chen, Jian Miao, Peng Zhou, Yu-Xiang Zheng, and Liang-Yao Chen. "High solar absorption of a multilayered thin film Structure". *Optics Express*. (19 February 2007) Vol. 15, No.4

- [16] Seraphin B.O., “Solar Energy Conversion: Solid-State Physics Aspects”, *Topics in Applied Physics* (Springer, 1979) Vol. 31.
- [17] www.solfocus.com
- [18] Joshi A.S, Tiwari A, Tiwari G.N, Dincer I, Reddy B.V, “Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system” *International Journal of Thermal Sciences* (4 May 2008)
- [19] Gordon Jeffrey “How innovative optics are serving the photovoltaic revolution” *SPIE Newsroom* . 10.1117/2.1200602.0132
- [20] www.isuzuglass.com
- [21] WO 2006/049560A1
- [22] www.parans.com
- [23]. Winston Ronald. “Principles of solar concentrators of a novel design” *Solar Energy* 1974. p.p 89-94 Vol. 16.
- [24]. Rabl A., Dickinson W.C, Chermiinnoff P.N, *Handbook in Solar Energy Technology*, Ed. Marcel Dekker. New York, USA (1980).
- [25]. Walsh, William Tudor John
“The elementary principle of lighting & photometry”. Ed.Methuen. London. (1923)
- [26]. Walsh,William Tudor John.“Photometry”. 2^a ed., Ed. Constable & Co. Great Britain, (1953).
- [27]. Chalmers M, Griffiths R. Peter “*Handbook of Vibrational Spectroscopy*”
Ed John Wiley , Chichester, (2002)
- [28]. Brown E.A., “Modern Optics”,Ed Reinhold Pub Corp cap.3.pp.111-120,
2^a ed., New York, (1966).
- [29]. Begunov B.N, Zakaznov N.P
“Teoría de sistemas ópticos”
Ed . Mir. Moscú, (1976)
- [30]. Hetch, Zajac. “Óptica” Ed. Addison Wesley. Mexico. (1998)
- [31]. Malacara Hernández, Daniel. “Óptica básica” UNAM, Facultad de Ciencias
Mexico, (1967)
- [32]. Winston Roland, Gordon M Jeffrey, “Planar concentrators near the étendue limit” *Opticas Letters* vol 30, No 19. (October 1, 2005) / Vol. 30, No. 19 / 0146-9592/05/192617-3 Optical Society of America

- [33]. Morimoto Masato, Maruyama Toshiro, "Static solar concentrator with vertical flat plate photovoltaic cells and switchable white/transparent bottom plate" *Solar Energy Materials & Solar Cells* 87 (2005) pp299–309
- [34]. Green Building Council, www.usgbc.org
- [35]. "Australian Commercial Building Sector", Greenhouse Gas Emissions Australian Green House Office (1990-2010)
- [36]. Edwards L, Torcellini P, (2002), "A Literature Review of the effects of Natural Lighting on Building Occupants", *NREL 2 Journal of Property Management*, (January 2000)
- [37]. US 6,384,320 B1
- [38]. US 2008/0163864 A1
- [39]. Pucara Mila, Despic Aleksandar, "The effect of diffuse/indirect light on the energy gain of solar thermal collectors". *Renewable Energy* Ed Elsevier (2005) 1749–1758. vol 30
- [40]. Soteris A. Kalogirou. "Design And Construction Of A One-Axis Sun-Tracking System". *Solar Energy*. Ed Elsiver , No. 6, pp. 465-469, 1996. vol 57
- [41]. Snail K.A, Hanssen L.M, "Integrating sphere designs with isotropic throughput," *Appl. Opt.* 28, (1793–1799) 119892.
- [42]. Brogren Maria, Helgesson Anna, Karlsson Bj.orn, Nilsson Johan, "Optical properties, durability, and system aspects of a new aluminium-polymer-laminated steel reflector for solar concentrators". *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2004) pp387-412. vol 82.