



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO**

**COLECTOR DE LUZ SOLAR INDIRECTA PARA
ILUMINACIÓN DE INTERIORES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA-INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A:

CARLOS A. GARCÍA CADENA

TUTOR

**DR. CELIA SÁNCHEZ PÉREZ
CCADET**

DICIEMBRE 2013



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dra. Tetyana Baydyk

SECRETARIO: Dr. Augusto García Valenzuela

VOCAL: Dra. Celia Sánchez Pérez

1er. SUPLENTE: Dr. Salvador Cuevas Cardona

2do. SUPLENTE: M. I. Alvarez Castillo Jesús

Lugar donde se desarrolló la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)
UNAM.

GRUPO DE SENSORES ÓPTICOS Y ELÉCTRICOS.

Contenido

Índice.....	5
Resumen.....	7
Abstract.....	11
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	17
Lista de acrónimos.....	18

Capítulo I

1 Introducción.....	21
1.1 Antecedentes.....	21
1.2 Sistemas de captación de luz solar para iluminación de interiores recientemente propuestos.....	23
1.2.1 Sistema anidólico de iluminación natural.....	24
1.2.2 Iluminación solar de fuente remota.....	25
1.2.3 Aperturas anidólicas orientadas al zenit.....	27
1.3 Motivación.....	29
1.4 Hipótesis.....	30
1.5 Objetivos.....	30

Capítulo II

2 Diseño del sistema colector de luz solar indirecta.....	33
2.1 Introducción.....	33
2.2 Diseño del prototipo.....	34
2.3 Antecedentes teóricos.....	35
2.3.1 Principios de fotometría.....	35
2.3.2 Sobre óptica anidólica.....	40
2.4 Transferencia de flujo radiante entre dos superficies difusas.....	41
2.4.1 Consideración de la fuente de luz externa.....	43
2.5 Metodología.....	46

Capítulo III

3 Simulaciones numéricas.....	48
3.1 Introducción.....	48
3.2 Selección de la fuente de luz.....	49
3.3 Posición de las fuentes de iluminación.....	51
3.4 Simulación numérica del sistema básico en Zemax.....	53
3.5 Simulación numérica de sistemas con reflectores secundarios.....	56
3.6 Estimación de la eficiencia del sistema propuesto.....	61
3.6.1 Elemento de mayor contribución a la colección de luz.....	62
3.6.2 Cálculo del área efectiva de colección.....	63
3.6.3 Eficiencia para distintas configuraciones.....	64
3.7 Discusión de resultados.....	67

Capítulo IV

4 Caracterización del prototipo en condiciones controladas de laboratorio y condiciones de luz natural.....	70
4.1 Introducción.....	70
4.2 Fabricación del prototipo.....	71
4.3 Caracterización del prototipo en laboratorio.....	73
4.4 Caracterización del prototipo en condiciones de luz natural.....	77
4.4.1 Pruebas experimentales en condiciones de luz natural: Configuración 1	80
4.4.2 Pruebas experimentales en condiciones de luz natural: Configuración 2.....	81
4.5 Discusión de resultados.....	83

Capítulo V

5 Conclusiones.....	86
Trabajo futuro.....	90
Referencias.....	91
Anexos.....	94

Resumen

Este trabajo de tesis fue realizado en el grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM. Se presenta un prototipo de colector de luz indirecta para iluminación de interiores, que podría ser instalado en fachadas de edificios ya existentes.

Según la literatura el uso de luz natural para iluminar el interior de edificios tiene repercusiones benéficas para la salud de los ocupantes además de disminuir el consumo de fuentes de luz artificial, reduciendo gastos y emisión de contaminantes. Sin embargo el aumento desmesurado de población en las principales ciudades del mundo ha obligado a un crecimiento vertical de los edificios, lo que provoca una disminución en la disponibilidad de luz natural.

Existen en el mercado una amplia variedad de sistemas colectores de luz solar para iluminar interiores, la mayoría de sistemas de colección de luz solar para iluminar interiores propuestos requieren de una planeación previa a la construcción de los edificios o requieren de modificaciones importantes a la estructura de estos, otros, hacen uso de elementos ópticos o sistemas de guiado del movimiento del sol que encarecen el costo y aumentan la complejidad de construcción de estos.

En la actualidad existen pocos trabajos referentes al uso de superficies difusas como colectores de luz solar. Es por esto que este trabajo plantea el estudio de este tipo de superficies que, dadas sus características, se cree que es posible aumentar la capacidad de colección de luz indirecta y difusa, sin importar el

ángulo de incidencia de los rayos de luz, ampliando de esta manera, las horas útiles de funcionamiento del sistema a lo largo de un día.

En este trabajo se propone un prototipo de colector de luz solar indirecta y difusa, formado por reflectores difusos. Se propone un modelo matemático que describe el intercambio de energía entre las superficies del sistema. Se realizaron simulaciones numéricas para estimar la respuesta y eficiencia de este sistema a iluminación proveniente de distintos ángulos y se caracterizó de manera experimental la respuesta del sistema en condiciones controladas de laboratorio así como en condiciones de luz natural. Se muestra en las simulaciones numéricas que los reflectores difusos tienen una mayor colección de flujo radiante proveniente de varios ángulos si se compara con un sistema formado por elementos especulares y se estima una eficiencia de colección de alrededor del 30%. Se corrobora de manera experimental que los reflectores difusos colectan una mayor cantidad de flujo radiante en días nublados con porcentajes de colección superiores al 100% comparándolo, igualmente, con un sistema formado por reflectores especulares. Se prueba que este sistema es una opción viable de bajo costo de colector de luz solar pasivo para iluminación de interiores con el cual se podría aprovechar la luz disponible en las fachadas e introducir luz al interior de los edificios ya existentes.

En este trabajo se incluyen 5 capítulos cuyo contenido se introduce a continuación.

En el capítulo I se hace una introducción a lo que se plantea en este proyecto, se explican los antecedentes y el estado del arte de la captación de luz solar para iluminación de interiores y se expone la motivación, hipótesis así como los objetivos de este trabajo.

En el capítulo II se propone un modelo que podría describir el intercambio de energía entre las superficies colectoras, se presenta también el diseño del colector de luz solar indirecta propuesto, así como algunos de los conceptos teóricos utilizados a lo largo de la investigación. Se plantea la metodología a seguir y propone un sistema básico.

En el capítulo III se presenta el proceso de simulación numérica llevada a cabo en el programa de traza de rayos Zemax © para encontrar la respuesta del sistema propuesto a distintas fuentes de luz.

En el capítulo IV se presentan los resultados encontrados experimentalmente de la respuesta del sistema en condiciones de laboratorio así como de mediciones en condiciones de luz natural.

En el capítulo V se hace un análisis general de los resultados encontrados de manera numérica así como de manera experimental y se concluye con las posibilidades de desarrollo de este sistema para un trabajo a futuro.

Se incluye como anexo al final de esta tesis los trabajos extendidos presentados en un congreso nacional (CIICA 2013-SOMIXXVIII) así como en un congreso internacional (2013 ISES Solar World Congress).

Abstract

This thesis work was carried out in the Electrical and Optical Sensors group of the Center of Applied Sciences and Technological Development (CCADET) at UNAM. A prototype of indirect and diffuse light collector for interior lighting, which could be installed on the facades of existing buildings, is presented.

According to the literature, the use of natural light to illuminate the interior of buildings has beneficial effects on health of the occupants in addition to reducing the consumption of artificial light sources, reducing costs and pollutant emissions. However, the excessive increase of population in major cities around the world has forced a vertical growth of buildings, causing a decrease in the availability of natural light.

There are available on the market a wide variety of sunlight collection systems for interior lighting, most of this collection systems require planning prior to the construction or require major changes to the structure of the buildings, others make use of optical elements or sun guiding systems that increase the cost and the complexity of these type of systems.

At present there are few studies on the use of diffuse surfaces as collectors of sunlight. That is why this work proposes the study of such surfaces, we believed that it was possible to increase the capacity of collection of indirect and diffused light, regardless of the angle of incidence of the rays, thus increasing system operating hours during a day.

In this work we propose a prototype of indirect and diffused sunlight collector, with the use of diffuse reflectors. A numerical simulation was performed to estimate the response of the system to a multiple angle illumination and also the efficiency of light collection of the system. The system response under controlled laboratory conditions and in daylight conditions was characterized experimentally. Illustrated in numerical simulations, diffuse reflectors have a larger collection of radiant flux from various angles as compared to a system consisting of specular elements and a collection efficiency of about 30% was estimated. It was confirmed experimentally that the diffuse reflectors collect a larger amount of radiant flux on cloudy days with percentages greater than 100% collection compared, also, with a system consisting of specular reflectors. We prove that this system is a viable option for low-cost passive sunlight collector system for interior lighting for existing buildings, taking advantage of the available light in the facades.

Índice de figuras

Figura 1.1 Sombras de edificios para distintas horas del día.

Figura 1.2 Representación esquemática de un sistema anidólico y sus elementos principales.

Figura 1.3 Elementos principales del sistema de iluminación solar de fuente remota.

Figura 1.4 Corte transversal de una apertura cenital mostrando los recubrimientos y la orientación necesaria para el mejor funcionamiento el cual depende de la latitud del sitio donde se desee instalar.

Figura 2.1 Descripción esquemática de los conceptos de las unidades fotópicas.

Figura 2.2 a) Simulación de una superficie especular reflejando un rayo de luz incidente b) simulación de una superficie homogéneamente difusa un rayo de luz incidente en múltiples ángulos.

Figura 2.3 Diagrama de flujo del proceso de diseño y modificación del sistema propuesto en este trabajo.

Figura 2.4 Modelo digital del prototipo de colección de luz solar de múltiples direcciones, diseñado en AutoCAD.

Figura 3.1 a) Distribución de la dirección de rayos usada para probar homogeneidad de la fuente de luz utilizada en las simulaciones numéricas. b) Distribución de los sensores a lo largo del área de un RDT usados para probar homogeneidad de la fuente.

Figura 3.2 Representación esquemática de la posición de los puntos de luz utilizados como fuente de iluminación.

Figura 3.3 Representación gráfica de los sistemas que fueron utilizados para la simulación numérica. a) muestra el sistema formado por reflectores difusos y el área de colección correspondiente. b) muestra el sistema formado por reflectores especulares y el área de colección correspondiente. c) muestra el sensor colocado en la correspondiente área de colección.

Figura 3.4 Medición en mW de la luz capturada por solo el sensor colocado en el AC comparado con el sistema básico y la referencia (sistema básico con elementos especulares).

Figura 3.5 Medición del número total de incidencia de rayos en el sensor colocado en el AC comparado con las incidencias medidas por el sistema básico y la referencia (sistema básico formado por elementos especulares).

Figura 3.6 Representación esquemática del sistema complejo formado por RDT-RDP y varios RDS. a) muestra los RDS con inclinación de 0° con respecto del RDP. b) muestra el RDS con inclinación de θ con respecto del RDP.

Figura 3.7 Respuesta del sistema básico agregando RDS a distintas fuentes de iluminación.

Figura 3.8 Resultado de las simulaciones de la respuesta del sistema en distintas configuraciones a iluminación en distintos ángulos.

Figura 3.9 Simulación de la contribución a la colección de flujo luminoso de cada uno de los elementos del sistema propuesto.

Figura 3.10 Esquema de la modificación de la altura del RDT para el cálculo del AEC para determinación de la eficiencia de colección del sistema.

Figura 3.11 Respuesta del sistema básico al probar distintas alturas del RDT.

Figura 3.12 Aumento del área de colección del sistema aumentando RDS así como AC por cada RDS. Se muestra también la distancia f del AC al RDT.

Figura 4.1 Espectro de emisión del foco utilizado para alumbrar el sistema, mostrando el máximo localizado cerca de 575 nm.

Figura 4.2 A la izquierda, vista de perfil del sistema instalado en la base de madera, a la derecha, vista frontal del sistema básico instalado en la base de madera.

Figura 4.3 Esquema del montaje experimental, para las pruebas con luz artificial del prototipo.

Figura 4.4 Respuesta del sistema en condiciones controladas y alumbrado con luz artificial de un prototipo formado por RDT-RDP-RDS y hasta 4 RDS.

Figura 4.5 Respuesta del sistema en condiciones controladas y alumbrando el prototipo de manera indirecta. Se agregan hasta 4 RDS y se modifica la distancia d y el ángulo θ entre cada elemento. a) muestra el sistema con un ángulo $\theta=15^\circ$ y varias d . b) muestra el sistema con un ángulo $\theta=30^\circ$ y varias d . c) muestra el sistema con un ángulo $\theta=45^\circ$ y varias d .

Figura 4.6 Vista del prototipo en una configuración específica, montado en la base de madera. Vista de la fachada con orientación norte del laboratorio del GSOE.

Figura 4.7 Sistema de referencia donde se muestra el RET como colector principal, el cual tiene las mismas dimensiones que el RDT y colocado de la misma manera que el sistema difuso.

Figura 4.8 Respuesta del sistema colector de luz en condiciones de luz natural instalado en la fachada del CCADET en un periodo de 6 horas. Sistema: RDT+RDP+RDS1; $\theta=30^\circ$
 $d=3\text{cm}$.

Figura 4.9 Porcentaje de colección de potencia óptica del sistema formado por reflectores difusos cuando $\theta=30^\circ$ y $d=3\text{cm}$ comparando con el sistema formado por elementos especulares.

Figura 4.10 Respuesta del sistema colector de luz en condiciones de luz natural instalado en la fachada del CCADET en un periodo de 6 horas. Sistema: RDT+RDP+RDS1; $\theta=40^\circ$
 $d=0\text{cm}$.

Figura 4.11 Porcentaje de colección de potencia óptica del sistema formado por reflectores difusos cuando $\theta=40^\circ$ y $d=0\text{cm}$ comparando con el sistema formado por elementos especulares.

Figura 4.12 Propuesta de sistema con múltiples áreas de colección y manojos de fibras ópticas como método para introducir la luz a los interiores.

Índice de tablas

Tabla 3.1 Potencia medida y número de hits del promedio del flujo medido por los 12 sensores colocados.

Tabla 3.2 Porcentaje de mejora de la luz colectada por sistemas en distintas configuraciones para cada una de las fuentes de iluminación.

Tabla 3.3 Porcentaje de mejora al agregar más de un RDS.

Tabla 3.4 Eficiencia de sistemas en las configuraciones que tuvieron una mejor respuesta a luz proveniente de distintas direcciones.

Tabla 3.5 Eficiencia de colección del sistema escalado a distintas distancias f.

Lista de acrónimos

A	Área.
AC	Área de colección.
CAD	Diseño asistido por computadora.
cd	Candela.
CIE	Commission Internationale de L'Eclairage.
d	Distancia del RDP al RDS.
E	Iluminancia.
f	Distancia del AC del RDT.
F1, F2, F3, F4, F5	Fuente de iluminación 1, 2, 3, 4, 5.
F	Flujo radiante.
I	Intensidad luminosa.
lm	Lúmenes.
lx	Luxes.
m	Metros.
nm	nanómetros.
K	Grados Kelvin.
r	Radio.
RDP	Reflector difuso primario.
RDS	Reflector difuso secundario.
RDT	Reflector difuso trasero.
REP	Reflector especular primario.

RET	Reflector especular trasero.
sr	Steradian.
STL	Lenguaje de Triangulación Estándar.
W	Watts.

Capítulo I

1 Introducción

1.1 Antecedentes

El uso de luz natural en interiores ha demostrado tener un impacto positivo en el bienestar de ocupantes de edificios no habitacionales, además de reducir el consumo de energía eléctrica. Algunos estudios muestran que el ser humano al estar en contacto con luz natural en sus actividades cotidianas tiene un efecto psicológico positivo, aumentando en algunos casos la productividad, mejorando el humor, reduciendo el estrés y la tensión ocular [1]. Por otro lado el uso de sistemas de aprovechamiento de luz natural para iluminar interiores ha logrado reducir el consumo de energía eléctrica consumida por edificios no habitacionales [2] hecho deseable si se desea reducir gastos; así como el efecto ambiental negativo causado por el exceso de consumo energético no renovable [3].

Uno de los principales problemas que afecta la disponibilidad de luz natural, es la urbanización en ciudades con alta densidad de población. El Distrito Federal cuenta con una densidad de población de 5920.5 habitantes por km², comparable solo con el Estado de México (679 habitantes por Km²) [4], lo que lo ubica como una de las ciudades más conflictivas respecto a la planeación urbana. Esto ha provocado un crecimiento desmesurado en las construcciones, tanto habitacionales como empresariales a lo largo de la ciudad, obligando al crecimiento vertical de edificaciones lo que provoca la disminución de la disponibilidad de luz considerablemente para algunos edificios o ciertas orientaciones de estos.

Otro factor que resulta importante en el estudio de este tipo de sistemas es la latitud y orientación del edificio, que combinado con lo antes mencionado, tiene una repercusión en la luz disponible en las fachadas de edificios. Se ha visto que, en algunas condiciones, la contribución de luz natural disponible en las fachadas de edificios tiene una mayor contribución a causa de reflexiones en objetos cercanos (otros edificios, árboles entre otros) o del suelo más que de la luz proveniente de la bóveda celeste [5]. La figura 1.1 muestra un ejemplo de simulación de la proyección de sombras para un día completo para una latitud específica, donde se observa como existen sitios en una ciudad de alta densidad de población donde se restringe el acceso a luz natural dependiendo de la posición en la que se encuentren respecto a otros edificios, lo que normalmente resulta en una disminución en la disponibilidad de luz en ciertas orientaciones.

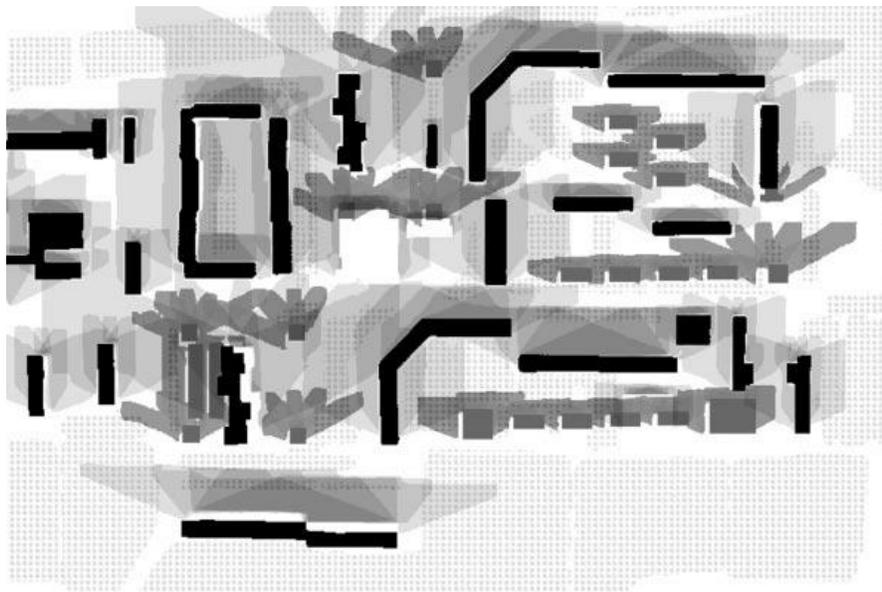


Figura 1.1. Sombras de edificios para distintas horas del día [6].

En estas condiciones (de ciudades con alta densidad de población), algunos edificios quedan rezagados a obtener luz natural a través de reflexiones en otros edificios, del suelo, o de obstáculos en el horizonte.

Dada la poca planeación con respecto al aprovechamiento de luz natural en los edificios en ciudades como la Ciudad de México, existen áreas en los edificios no habitacionales ya existentes donde a pesar que hay una gran cantidad de luz disponible en las fachadas, esta no alcanza a llegar a pasillos, zonas de escaleras o cuartos internos, esto obliga a tener la luminaria encendida por largos e ininterrumpidos lapsos de tiempo. Es por esto y por las razones planteadas al inicio de este capítulo, que es deseable contar con sistemas que introduzcan la luz disponible en las fachadas a los edificios con sistemas que, preferiblemente, no requieran de hacer modificaciones estructurales en estos.

1.2 Sistemas de captación de luz solar para iluminación de interiores recientemente propuestos.

Existe en la actualidad una gran cantidad de sistemas de colección de luz para iluminación de interiores. La selección del más adecuado para ser instalado en un edificio está en función de muchos factores, siendo algunos de los más importantes:

- La latitud donde será instalado el sistema.
- La capacidad de modificar de manera importante una región del edificio donde será instalado como, por ejemplo, abrir agujeros de grandes dimensiones.
- La capacidad de planear la localización del sistema antes de construir un edificio.

Además de estas características, otro punto importante a considerar es el costo del sistema debido a que la complejidad de éste o de sus componentes suele encarecer el costo total de producción e instalación del sistema en un recinto.

A continuación se describen algunos de los sistemas de actualidad que resultan de interés para este estudio, por su forma de colección de luz así como su transporte al interior de edificios.

1.2.1 Sistema anidólico de iluminación natural

Este tipo de sistemas utiliza óptica no formadora de imagen para coleccionar y redistribuir el componente difuso de la luz natural de manera eficiente [3]. Los sistemas anidólicos usan como elemento principal un ducto, que suele ser de materiales altamente reflejantes como aluminio anodizado con una entrada parabólica apuntando al zenit. La entrada de este ducto tiene una forma parabólica, para poder concentrar la luz capturada a lo largo del ducto que tiene una forma rectangular. Posteriormente la luz al interior del ducto rectangular es esparcida por superficies difusas las cuales reparten homogéneamente la luz al interior de un cuarto como se muestra en la Figura 1.2.

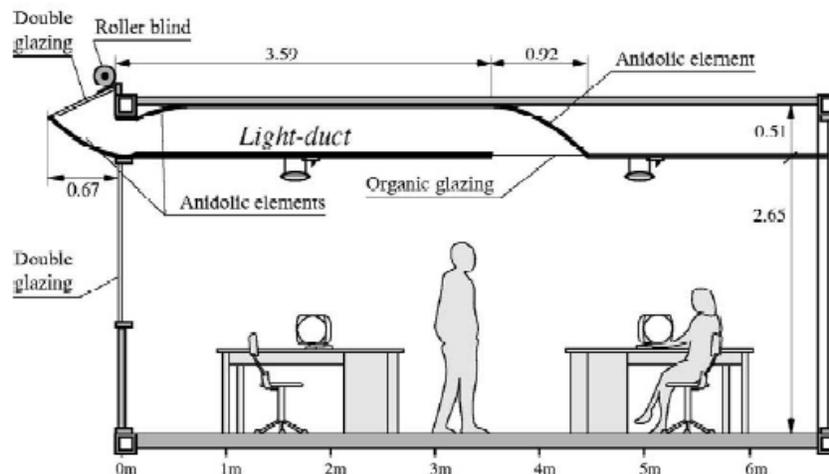


Figura 1.2. Representación esquemática de un sistema anidólico y sus elementos principales.

Este sistema pasivo de colección de luz solar, ha demostrado ser más efectivo en épocas del año donde el sol tiene un ángulo de elevación cercano al zenit. Se ha reportado que este sistema tiene eficiencias de alrededor del 32% a 4 m de distancia de la apertura de entrada de luz en climas tropicales [7]. Esta eficiencia es estimada mediante simulaciones donde suponen una distribución de luz como la de un día nublado, y toman el máximo de luz disponible, por unidad de área, en la región de entrada del sistema y se compara cuánta luz alcanza a llegar al final del sistema es decir, en el difusor de luz al interior del edificio. Estudios recientes han mostrado que el uso de materiales con calidad óptica como el MiroSilver® en todo el sistema colector aumenta la eficiencia de transporte y captación de luz [8].

El uso de sistemas anidólicos para iluminación de interiores ha demostrado ser una forma eficiente de introducción de luz natural a recintos, sin embargo estos requieren de planeación previa a la construcción de donde quiere ser instalado o modificaciones importantes debido a las dimensiones que estos suelen tener además de que requieren del uso de materiales costosos.

1.2.2 Iluminación solar de fuente remota

Este sistema utiliza un espejo como colector, el cual redirige la luz a un panel cortado con láser (*laser-cut panel*) con una apertura de aproximadamente 1.5m, que tiene como función colimar la luz hacia un arreglo de lentes los cuales enfocan la luz a la entrada de una fibra óptica. Posteriormente la luz es transportada a través de la fibra al interior de los edificios y redistribuirla de distintas maneras. La Figura 1.3 muestra los componentes del sistema de iluminación remota.

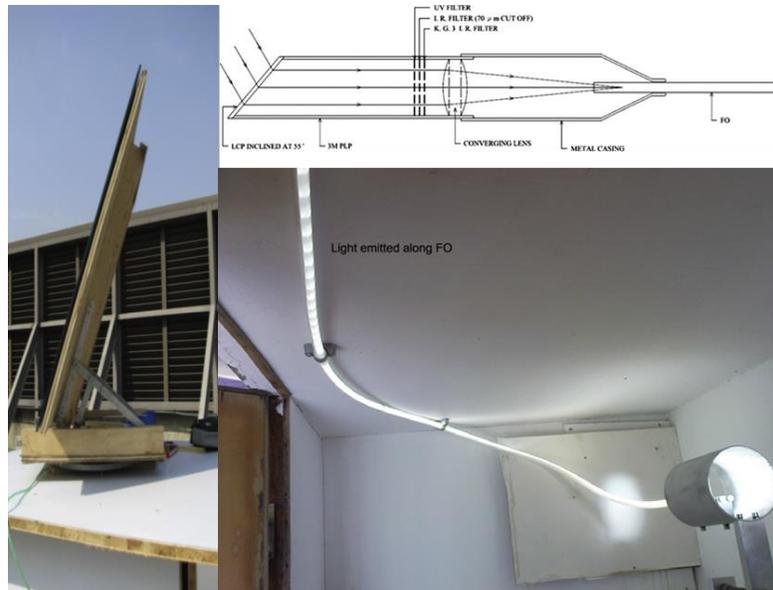


Figura 1.3. Elementos principales del sistema de iluminación solar de fuente remota.

Los estudios de este sistema reportan una eficiencia de alrededor de 14.8% en un día soleado apuntando directamente al sol [9]. La estimación de la eficiencia de este sistema es similar a lo realizado en el trabajo mencionado en el punto 1.2.1, la diferencia es que en este caso, miden de manera experimental la luz disponible al mismo tiempo que el sistema está siendo usado para introducir luz al edificio y comparan cuánta luz había en distintos momentos del día, por unidad de área, contra lo que logra introducir el sistema al edificio. Este sistema logra introducir luz con el uso de fibra óptica hasta 6 metros dentro de un edificio. Según lo reportado por este artículo, se planea que este sistema tenga seguimiento del movimiento del sol ya que es dependiente de la intensidad de luz capturada por el sistema.

Este sistema a pesar de que no requiere de una modificación de la estructura de donde sea instalado, requiere de elementos más complejos como; paneles cortados con láser, óptica formadora de imagen (lentes ópticos) y un sistema de seguimiento solar lo que aumenta la complejidad y costo de este tipo de sistemas.

1.2.3 Aperturas anidólicas orientadas al zenit

Estos sistemas buscan aprovechar la luz proveniente del zenit y suelen tener un ángulo de aceptación de alrededor de 50° y transporta la luz colectada a través de un ducto de luz de alta reflectancia [10] como se muestra en la Figura 1.4. La luz capturada en el extremo del sistema, el cual se encuentra a la intemperie, es transportada a lo largo del sistema, formado por superficies especulares y redistribuidas en el extremo contrario con superficies difusas para que la luz introducida al recinto tenga una distribución uniforme.

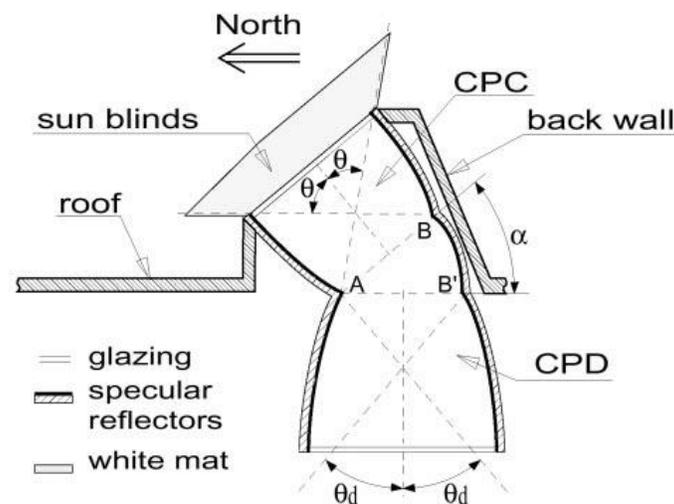


Figura 1.4. Corte transversal de una apertura cenital mostrando los recubrimientos y la orientación necesaria para el mejor funcionamiento el cual depende de la latitud del sitio donde se desee instalar.

De manera similar a los sistemas anidólicos este tipo de sistemas requiere de una planeación previa a la construcción del edificio donde requiere ser instalado. Este sistema aprovecha el componente de cielo más cercano al zenit en la bóveda celeste y a pesar de que no requiere un sistema de guía del movimiento del sol, este es dependiente de las condiciones climáticas así como de la orientación de donde es instalado. Existe también una variación de este tipo de sistemas que son más comerciales llamados tubos solares, los

cuales a través de una apertura en el techo de los edificios y con el uso de una cúpula, normalmente de acrílico, se busca redirigir la luz incidente, en ángulos mayores a 40° con respecto del zenit, al interior del tubo conductor. La geometría de este tipo de sistemas comerciales suele ser menos compleja que las aperturas anidólicas al zenit, lo que los hace más baratos, no necesariamente requiere de planeación previa a la construcción del edificio además de tampoco requerir un cálculo tan estricto de la inclinación de la entrada del sistema debido a la latitud del sitio donde sea instalado [11].

Los sistemas colectores de luz de actualidad comentados en este capítulo muestran un sector de los trabajos actuales respecto a la colección de luz para iluminar interiores, otro enfoque de colección de luz es referente al aprovechamiento de luz disponible en las ventanas o fachadas de los edificios, pero su redistribución no alcanza más que a algunos metros del interior de donde se encuentra la apertura.

Se puede ver que algunos de los sistemas mostrados requieren de planeación previa a la construcción de los edificios, además de solo tener la capacidad de introducir la luz que colectan a regiones cercanas al sitio donde son instaladas y en el caso de edificios de múltiples pisos no alcanzarían a iluminar los pisos más lejanos al sistema. Otros sistemas propuestos requieren de técnicas de seguimiento del sol ya que dependen de la direccionalidad de la luz, esto suele encarecerlos además de que todos los anteriores podrían significar un arduo trabajo de mantenimiento a la larga.

Con este trabajo proponemos un sistema de colección de luz pasivo con el uso de reflectores difusos de bajo costo y de fácil reproducción que pueda coleccionar luz directa e indirecta disponible en las fachadas para su posterior transporte

al interior de edificios ya existentes a zonas donde exista poca disponibilidad de luz natural sin tener que modificar de manera importante la estructura de estos y que se adapte a la estructura de los edificios.

1.3 Motivación

Uno de los principales problemas a resolver respecto a la iluminación de interiores en ciudades altamente pobladas, como lo es la Ciudad de México, es la disponibilidad de luz en las fachadas así como su introducción a sitios en los edificios donde la luz no puede llegar de manera directa. Esto suele tener repercusiones en el consumo de corriente eléctrica así como en el bienestar de los ocupantes de edificios en condiciones de poca disponibilidad de luz natural. Es por esto que en este trabajo se propone un sistema que ayude a solventar este problema de iluminación de manera sencilla y barata.

Si bien existen muchos trabajos previos que hablan de distintas estrategias para introducir luz natural al interior de edificios, existe muy poca información respecto al uso de superficies reflectoras difusas como captadores de luz y dado que la mayor cantidad de luz disponible en las fachadas es no direccional o difusa, en el caso de días nublados, es por esto que exploramos el uso de sistemas colectores con superficies difusas.

Este trabajo realiza un estudio del uso de superficies reflectoras difusas para mejorar la captación de luz difusa así como indirecta para su posterior introducción a interiores y ampliar el tiempo de efectividad de este tipo de colectores y producir un efecto de homogeneidad en distintas condiciones climáticas.

De esta manera se podría diseñar un sistema de poca complejidad de instalación y mantenimiento, a diferencia de los sistemas especulares y aprovechar las fachadas de los edificios para capturar e introducir luz desde estos puntos incluso segmentándolo por cada piso dependiendo de la estructura del edificio.

1.4 Hipótesis

Una superficie difusa es aquella que redistribuye la luz incidente, sin importar la distribución direccional de esta, de manera tal que la luz reflejada desde cada punto de la superficie, en una dirección dada, es proporcional al coseno del ángulo en la dirección formada con respecto a la normal de la superficie. Esto quiere decir que una superficie uniformemente difusa reflejaría una fracción definida de acuerdo a la ley de emisión del coseno. Esto haría parecer que una superficie de este tipo es igualmente brillante en todas direcciones. Con lo anterior se plantea la posibilidad de aumentar el ángulo de aceptación de un captador de luz solar indirecta con el uso de superficies difusas, además poder tener una respuesta más homogénea a distintos tipos de iluminación, sin importar el ángulo de incidencia de los rayos de luz. Lo que se traduciría en una colección pasiva con una buena eficiencia durante gran parte del día.

1.5 Objetivos

Llevar a cabo el análisis numérico y experimental de la respuesta de superficies difusas como colectores de luz directa e indirecta y proponer un prototipo de colector solar para iluminación de interiores.

Este trabajo tiene como objetivos particulares:

- Encontrar con simulaciones numéricas una configuración de sistema colector de luz solar con superficies difusas que tenga una buena eficiencia de colección a luz proveniente de distintos ángulos.
- Probar de manera experimental, en condiciones controladas de laboratorio las configuraciones que en las simulaciones demuestren tener una buena colección de la luz proveniente de distintos puntos de iluminación y diseñar un prototipo básico.
- Probar de manera experimental, en condiciones de luz solar natural el prototipo en las configuraciones que las pruebas anteriores demostraran una respuesta aceptable.
- Proponer un prototipo de colector de luz solar indirecta que tenga una buena eficiencia y comparable con respecto a otros sistemas propuestos.

Capítulo II

2 Diseño del Sistema colector de luz solar indirecta

2.1 Introducción

Uno de los principales problemas que se observan en ciudades de alta densidad de población, es la baja disponibilidad de luz en las fachadas debido a las obstrucciones existentes en el entorno, además de los factores climáticos locales. Lo que hace que algunos de los sistemas existentes en el mercado resulten poco viables ya que estos dependen fuertemente de los rayos de luz directos y, en el caso de los que buscan aprovechar luz indirecta o difusa, requieren de un cambio sustancial en la estructura de edificios ya existentes. Es por esto que en este trabajo se propone un sistema que busca encontrar una manera alterna de aprovechar luz proveniente de; múltiples reflexiones, luz difusa y directa proveniente de la bóveda celeste, sin la necesidad de realizar cambios en la estructura de las fachadas donde sean instalados. Se pensó que un sistema que tuviera un ángulo de aceptación mayor al de los sistemas comerciales de colección de luz actuales sería capaz de coleccionar más luz sin importar el ángulo de incidencia y reduciendo el efecto de la direccionalidad de la iluminación de la luz natural a lo largo de un día.

Se presenta en este capítulo la propuesta de sistema de colección difuso de luz solar indirecta así como de un modelo matemático que describe el comportamiento de este.

2.2 Diseño del prototipo básico

Como se mencionó en el Capítulo I la cantidad de luz colectada por sistemas pasivos está en función del área total de colección (entre otros factores) por lo que basándose en la teoría de reflectores difusos, se propone un prototipo de colector de luz indirecta formado, en el caso básico, por un reflector difuso trasero (RDT) y un reflector difuso primario (RDP) como se muestra en la Figura 2.1a, los cuales serán los principales captadores de luz y reflejarán la luz en todas direcciones para recolectarla en un punto específico. La luz proveniente de las reflexiones obtenidas del sistema antes mencionando será recolectada en un área de colección (AC) situada en el centro del RDP. Dado que los sistemas de colección de luz solar dependen del área total de colección, se pensó que se podría aprovechar más espacio agregando reflectores secundarios. Se proponen, como sistemas complejos, sistemas que constarán de reflectores difusos secundarios (RDS) colocados a distintas distancias (d) del RDP y con ángulos de inclinación (θ) con respecto del RDP como se muestra en la Figura 2.1b.

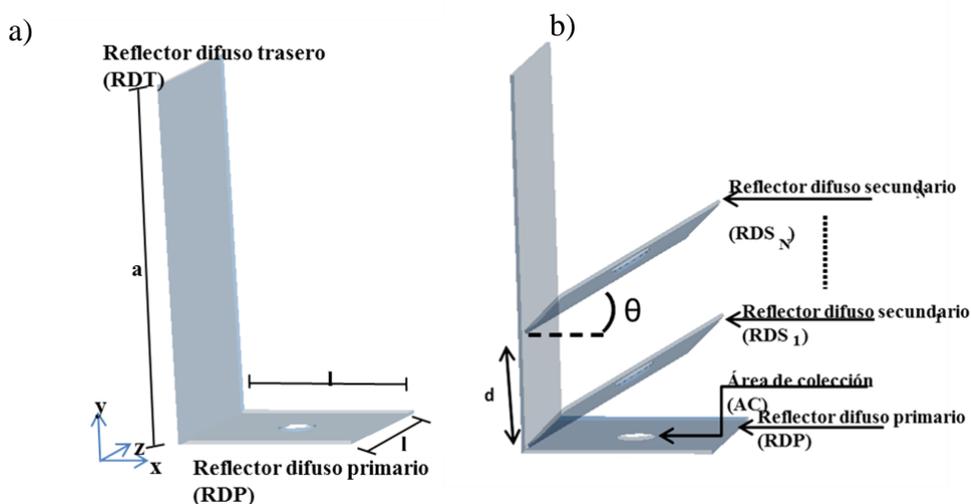


Figura 2.1. Modelo digital del prototipo de colección de luz solar de múltiples direcciones, diseñado en AutoCAD.

La figura 2.1 muestra el modelo en 3D del sistema con dimensiones del RDT con altura a de 0.27m y l de 0.1m, las dimensiones del RDP son de l de 0.1m por 0.1m.

La respuesta del sistema colector de luz, en sus distintas configuraciones, fue comparada en las simulaciones con un sistema referencia compuesto por un reflector especular trasero (RET) y un reflector especular primario (REP) de las mismas dimensiones que el sistema difuso pero formado por superficies de propiedades de reflexión similares a las de un espejo.

2.3 Antecedentes teóricos.

A continuación se describen algunos de los parámetros y principios utilizados a lo largo de este trabajo que será necesario conocer para entender de una mejor manera los resultados y los análisis realizados.

2.3.1 Principios de fotometría

De acuerdo al CIE (Commission Internationale de L'Eclairage), el brillo de una fuente de luz es relativa a la respuesta visual del observador y a la composición espectral que la forma y no depende únicamente de la radiación que emite [12]. Esto crea la necesidad de establecer estándares basados en un grupo representativos de observadores. A continuación algunas de las definiciones acotadas por la CIE respecto al estudio de la luz por comparación.

Cuando un elemento de área es iluminado por una fuente externa de luz, se puede calcular el flujo luminoso (P), es decir la cantidad de fotones (Q) por segundo, que emana desde un elemento de área diferencial dA como se muestra en la Figura 2.2a. El flujo luminoso está dado por:

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad [W] \quad (2.1)$$

Intensidad luminosa (I_v): Hace referencia a la unidad básica de luz visible en una dirección y para un punto específico. Este es el cociente entre el flujo luminoso emitido o recibido dentro de un ángulo sólido con vértice en el punto dado y que contiene la dirección dada y está representado por:

$$I_v = \frac{dP}{d\Omega} \quad \left[\frac{W}{sr} \right] \quad (2.2)$$

Irradiancia (I): Es el cociente entre el flujo luminoso recibido por elemento de área en una superficie. Está dada por:

$$I = \frac{dP}{dA} \quad [W/m^2] \quad (2.3)$$

Radiancia (I_r): Hace referencia a la irradiancia por unidad de ángulo sólido ($d\omega$) vista desde una dirección en particular de observación (\vec{v}) y está dada por:

$$I_r = \frac{I}{d\omega} \quad [W/m^2 \text{ sr}], \quad (4)$$

donde:

I_r representa el flujo luminoso emitido por la superficie de radiación, expresada por unidad de área de la superficie iluminada proyectada en el ángulo sólido¹ $d\omega$ en la dirección de observación como se muestra en la Figura 2.2a.

¹ Referente a la relación del área (A) de la superficie esférica interceptada por un flujo radiante, al cuadrado del radio (r) de una esfera unitaria y se encuentra limitada por una superficie cónica. Está definido por $\Omega = A/r^2$ [13].

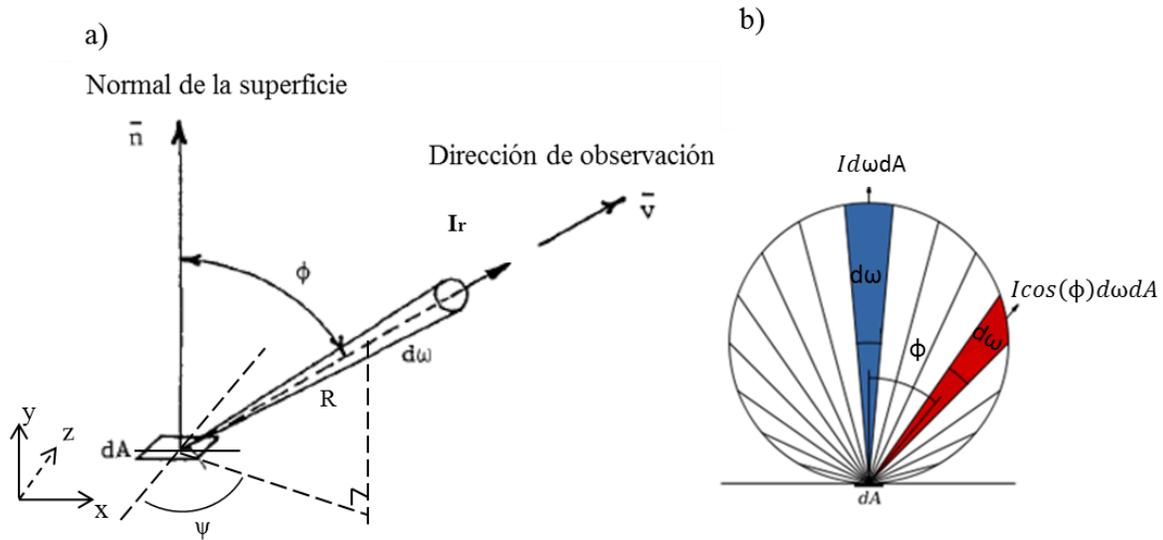


Figura 2.2 Geometría de la radiación reflejada a) por una superficie y b) por una superficie difusa Lambertiana.

Cuando la reflexión ocurre en una superficie reflectora difusa ideal, el flujo radiante en cualquier dirección depende del coseno del ángulo ϕ , formado por la dirección del observador y la normal a la superficie iluminada como se muestre en la Figura 2.2b. Estas superficies son conocidas como:

Superficies Lambertianas: Superficies que obedecen a la ley de Lambert conocida como la Ley de emisión del Coseno de Lambert [14]. En este caso el flujo luminoso que emana de la superficie difusa (P_d) está dado por:

$$P_d = I_{rd} dA d\omega \cos\phi, \quad (2.5)$$

donde I_{rd} es el flujo radiante por unidad de área y ángulo sólido, es decir la radiancia difusa.

Esto quiere decir que cada rayo incidente (sin importar el ángulo) en las superficies reflectoras dividirá su potencia en un número finito de rayos con intensidad igual en todas las direcciones, como se muestra en la Figura 2.3a, a diferencia de un reflector especular donde un rayo incidente refleja,

idealmente, con la misma potencia en el mismo ángulo de incidencia como se muestra en la Figura 2.3b.

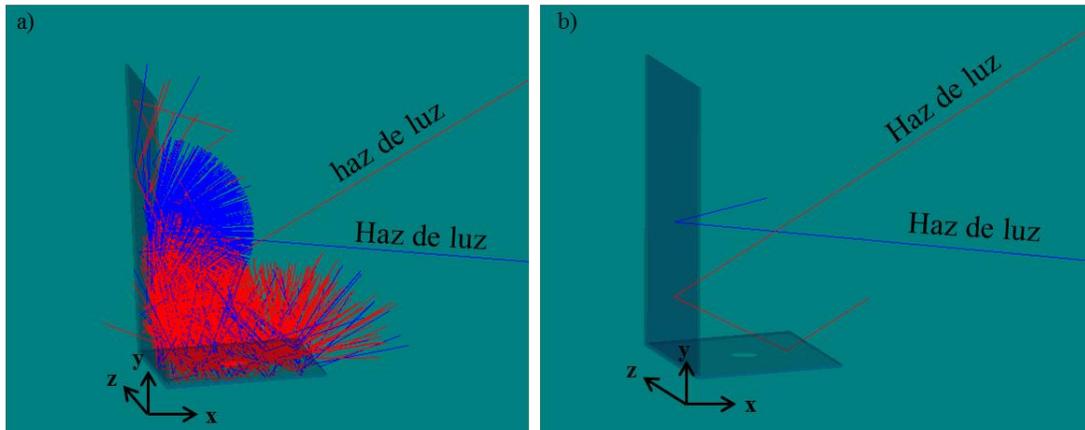


Figura 2.3. a) Simulación de una superficie especular reflejando un rayo de luz incidente b) simulación de una superficie homogéneamente difusa un rayo de luz incidente en múltiples ángulos.

En esta ley de Lambert, la máxima emisión de flujo luminoso se da en la dirección normal a la superficie $\phi = 0^\circ$ y disminuye hasta hacerse cero cuando $\phi = 90^\circ$. De esta manera se puede calcular la radiancia I_{rd} en la superficie reflectora difusa como:

$$I_{rd} = \frac{dP_d}{dA d\omega \cos\phi} \quad (2.6)$$

En la geometría descrita en la Fig. 2.1a se puede observar que el flujo luminoso emitido por la superficie reflectora difusa en la dirección del observador depende del ángulo sólido en el plano xyz $d\omega = \text{Sen}\phi d\psi d\phi$ que depende de la dirección con respecto del ángulo ϕ y del ángulo ψ formado entre la normal a la superficie y la dirección del observador con respecto al plano x - z . Se puede calcular la potencia total emitida por la superficie

lambertiana cuando es iluminada por una fuente exterior de la siguiente manera:

$$\int \frac{d^2P}{dA} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{rd} \cos \phi \sin \phi d\phi d\psi . \quad (2.7)$$

Dado que la irradiancia no es una función de ϕ ni de ψ , la solución de esta doble integral conduce a que la potencia total irradiada (F_i) por una superficie lambertiana iluminada es constante,

$$F_i = \int \frac{d^2P}{dA} = I_{rd}\pi \quad (2.8)$$

Lo obtenido en la Ecuación 2.8 es fundamental para el modelado de la interacción entre superficies por flujo radiante, ya que con este término se calcula el total de flujo radiante de una superficie dada una fuente de iluminación externa. Las definiciones mencionadas anteriormente serán de utilidad para la comprensión de este trabajo de tesis ya que serán utilizadas para describir lo que se realizó a lo largo de este.

La Figura 2.4 muestra de manera gráfica los parámetros considerados en las definiciones anteriores.

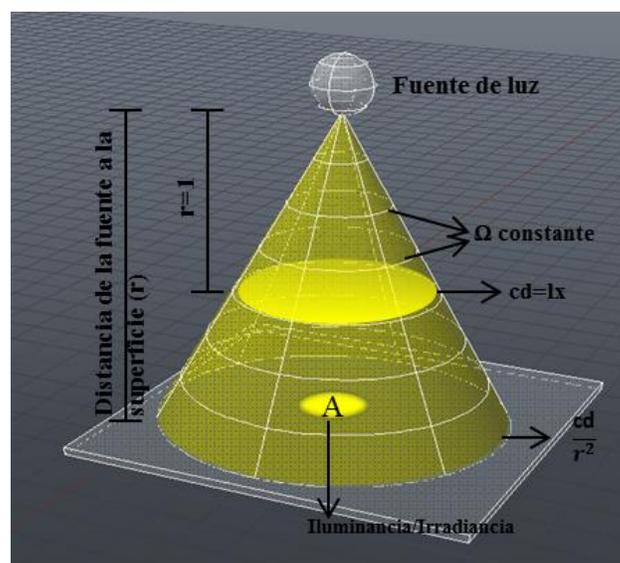


Figura 2.4. Descripción esquemática de los conceptos de las unidades fotópicas.

La transferencia de flujo radiante en un entorno formado por varios reflectores puede ser modelado por la teoría de radiosidad propuesta por C.M. Goral[15] que se basa en los conceptos de la teoría de transferencia de calor radiativo [16, 17, 18, 19]. La suposición más importante para este método, al modelar la transferencia entre los reflectores, es que estos son superficies difusas ideales. Las fuentes de iluminación y las propiedades de reflectividad de las superficies pueden ser arbitrarias o definidas. A continuación se hace una propuesta de un modelo matemático que podría ser usado para describir la transferencia de flujo radiante entre superficies difusas.

2.3.2 Sobre óptica anidólica

Uno de los principales problemas que se observan al momento de captar luz proveniente de la bóveda celeste, así como de múltiples reflexiones en el entorno, es la direccionalidad de ésta. Esto significa que el movimiento de la tierra provoca que la luz natural sea cambiante y provenga de distintas direcciones, lo cual se percibe al momento de intentar captar luz a lo largo de un periodo de tiempo grande. Es por esto que la eficiencia de colección de los sistemas pasivos; es decir que no incorporan rastreo de la trayectoria solar; de captación depende, por un lado, del ángulo de aceptación que tengan y, por otro, de la efectividad al dirigir los rayos de luz captados hacia un punto donde posteriormente puedan ser transportados hacia el interior de un recinto [21].

Este trabajo utiliza la *teoría de óptica no formadora de imagen* (sistemas anidólicos) que, básicamente, indica que existen ciertas aplicaciones que no requieren que la luz captada forme una imagen [22].

2.4 Transferencia de flujo radiante entre dos superficies difusas

En este trabajo se presenta un sistema de colección de luz, donde el sistema básico consta de un reflector difuso trasero y un reflector difuso primario. Estos reflectores obedecen a la teoría de reflexión difusa propuesta por Lambert, donde se tiene de manera ideal, que la luz reflejada por este tipo de superficies es de intensidad constante sin importar el ángulo en el que sea observado. Dado que en este trabajo se propone el uso de más de un reflector difuso es necesario contar con un modelo que describala transferencia de flujo luminoso entre todos los reflectores. Este modelo propuesto está basado en el “método de radiosidad”, utilizado en computación gráfica para lo obtención de modelos reales de iluminación considerando sombras e iluminación difusa

Mediante el método general de transferencia de energía radiante planteado por F. Grum [20] es posible describir el intercambio de flujo radiante entre dos superficies, para el caso en el que el espacio entre estas sea isotrópico, homogéneo y que no existen pérdidas.

Dadas las consideraciones anteriores se puede decir que la radiancia, definida por la Ecuación (2.4), que es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido (en la dirección del rayo), por unidad de área proyectada (perpendicular al rayo) tiene el mismo valor en cualquier punto a lo largo de la trayectoria del rayo. Como se muestra en la Figura 2.5. Por lo que se puede decir que la Irradiancia (I_{ri}) está dada por:

$$I_{ri} = I_{rj} = I_{rd} \quad (2.9)$$

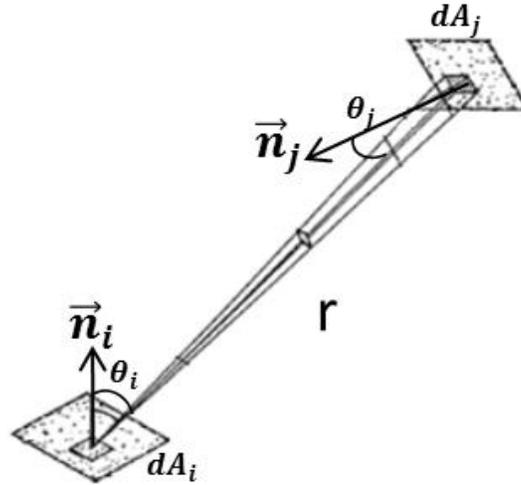


Figura 2.5 Geometría del cálculo del factor forma

Dado que se trata, en todos los casos de superficies uniformemente difusas, se tiene que estas emiten en un ángulo sólido dado por un área diferencial dA_i que intercambia flujo luminoso con un área diferencial dA_j , el flujo radiante transmitido a dA_j por dA_i está dado por:

$$d\Phi_{ij} = I_{rd} dA_i dA_j \left(\frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{r^2} \right), \quad (2.10)$$

de donde se puede ver que dA_j y dA_i son las áreas de j e i respectivamente. ϕ_i y ϕ_j son los ángulos entre la superficie normal de i y j con respecto a la línea con distancia entre dA_i y dA_j r. Por lo tanto al integrar la Ecuación 2.10 se obtiene el flujo radiante total (en términos de potencia) recibido por la superficie j a partir de la superficie i y se obtiene de:

$$\Phi_{ij} = \int_{A_i} \int_{A_j} I_{rd} \left(\frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{r^2} \right) dA_i dA_j \quad (2.11)$$

De la Ecuación 2.8 se tiene que $I_{rd} = F_i/\pi$, sustituido en la Ecuación 2.11 se tiene que:

$$\Phi_{ij} = \frac{F_i}{\pi} \int_{A_i} \int_{A_j} \left(\frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{r^2} \right) dA_i dA_j \quad (2.12)$$

Además se tiene que el total de flujo radiante que sale de la superficie i es $\Phi_i = F_i A_i$. De donde A_i es el área total i. Por lo tanto la fracción de flujo radiante incidente en j es:

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int \int \left(\frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{r^2} \right) dA_i dA_j \quad (2.13)$$

Este término es denominado en algunos textos como el factor de forma el cual describe el intercambio radiativo entre dos áreas finitas. Dado que se trata de reflexiones difusas ideales, el factor forma que se presenta es geométrico y depende únicamente de la forma, tamaño, posición y orientación de las superficies reflectoras.

Este término será de uso para la siguiente subsección donde se incluye una fuente de luz externa al modelo propuesto.

2.4.1 Consideración de la fuente de luz externa.

Para realizar el cálculo de la energía de la luz en cualquier superficie se consideró la radiación proveniente de todas direcciones en el espacio. Para lo cual será necesario definir un “recinto” hipotético. Este “recinto” se define por las superficies que delimitan el sistema como se muestra en la Figura 2.6a.

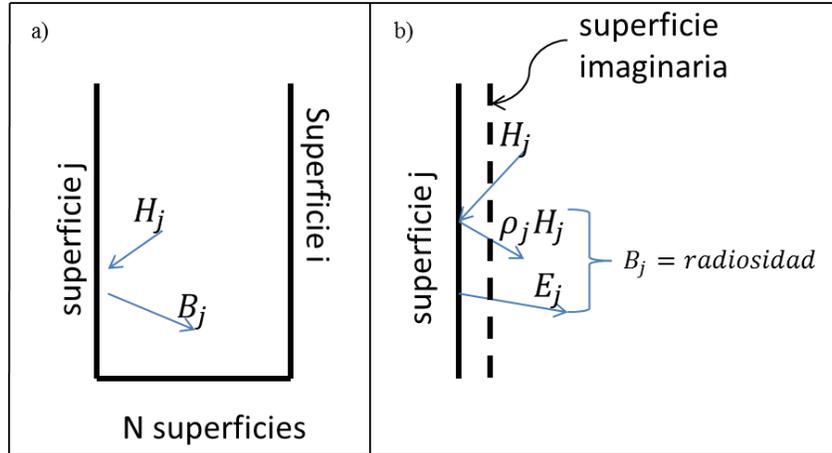


Figura 2.6 a) Recinto propuesto de N superficies. H_j y B_j representan el flujo incidente y reflejado por la j ésima superficie. b) propiedades características de la superficie j.

La luz que llega a la superficie j está expresada por H_j , que es la suma de la luz proveniente del resto de las superficies. La luz reflejada por j está expresada por B_j .

Considerando la superficie j de la Figura 2.6b, en la cual existe una superficie imaginaria, representada por la línea discontinua frente a la superficie j. La radiosidad B_j es la integral hemisférica de la energía reflejada la superficie j. Al ser observada, esta superficie estaría emitiendo un flujo B_j , desde la superficie imaginaria. Este flujo está formado por:

$$B_j = E_j + \rho_j H_j, \quad (2.14)$$

de donde,

B_j es la radiosidad de la superficie j y es la proporción tasa a la que la energía abandona la superficie en términos de energía [W/m^2].

E_j es la tasa de emisión de energía directa de la superficie j [W/m^2].

ρ_j es el coeficiente de reflexión de la superficie j y representa la fracción de luz incidente que es reflejada de vuelta al hemisferio.

H_j es la energía radiante incidente que llega a la superficie j [W/m^2].

Debido a la naturaleza de los reflectores se observa el mismo flujo B_j sin importar el ángulo de observación.

El flujo H_j de la superficie j mostrado en la Figura 2.6a será la suma del flujo de las otras superficies. La fracción de flujo que llega y el que es reflejado por la superficie j , B_j , está especificado por el factor de forma F_{jj} . Dado que todas las superficies contribuyen a la irradiación de la superficie j , el flujo incidente se puede encontrar sumando la contribución de todas las superficies:

$$H_j = \sum_{i=1}^N B_i F_{ij}, \quad (2.15)$$

de donde:

B es la radiación de la superficie i [W/m^2].

F es el factor forma y representa la fracción de flujo radiante proveniente de i e incidente en la superficie j . Combinando las Eq. 2.14 y 2.15 se tiene:

$$b_j = e_j + \rho_j \sum_{i=1}^N b_i F_{ij} \quad \text{Para } j = 1, N \quad (2.16)$$

La Ecuación 2.16 incluye un conjunto de N ecuaciones lineares con N valores de B_j desconocidos y con valores E_j , ρ_j y F_{ij} conocidos. La emisión en términos de E_j , representa la fuente de iluminación del sistema.

La solución de la potencia radiada por superficies difusas se resuelve a partir de las Ecuaciones 2.13 y 2.16, donde es posible encontrar soluciones

analíticas para ciertas configuraciones de reflectores [15], sin embargo el análisis de geometrías complejas usualmente es resuelto por métodos numéricos [16]. En este trabajo se plantea el uso de distintas configuraciones para el sistema de captación, por lo que se tendría que resolver este modelo matemático dadas distintas características geométricas del sistema, por lo que se propone el uso de un software de traza de rayos Zemax para aproximar de manera numérica el intercambio de flujo radiante entre múltiples superficies reflectoras.

2.5 Metodología

Este proceso de creación de un prototipo requirió de varios pasos de creación, desde varias propuestas de diseño hasta la caracterización de un primer prototipo. El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.7 muestra los pasos seguidos para la elaboración de este prototipo.

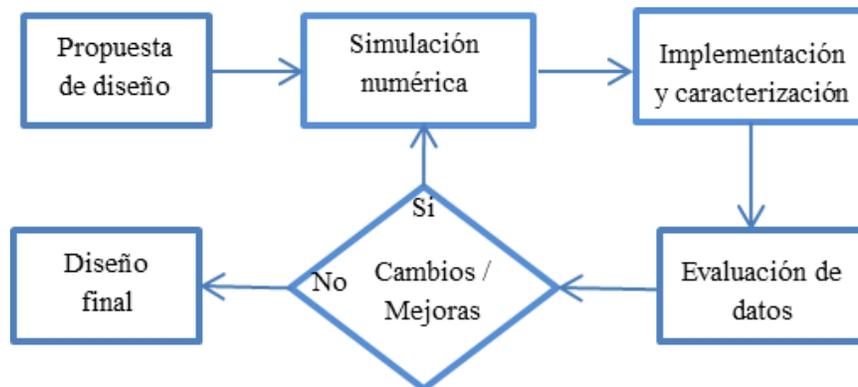


Figura 2.7. Diagrama de flujo del proceso de diseño y modificación del sistema propuesto en este trabajo.

Esta metodología ayudó a definir posibles mejoras en el sistema propuesto inicialmente, lo que propició modificaciones constantes hasta llegar a un

sistema que tuviera un buen desempeño. En la fase de propuesta de diseño se planteó un posible sistema basándose en los fundamentos teóricos. Se creó un modelo digital, del sistema propuesto, en un programa computacional basado en CAD (Diseño Asistido por Computadora por sus siglas en inglés) el cual se exportó como un archivo STL (Lenguaje de Triangulación Estándar por sus siglas en inglés) para simular la respuesta del sistema en Zemax (programa computacional de trazado y rastreo de rayos en sistemas ópticos). Estas simulaciones numéricas tuvieron como fin encontrar un sistema que tuviera la mejor respuesta a fuentes de luz en distintos ángulos, teniendo como variables:

- El área total de colección
- La distancia y ángulos entre reflectores
- La posición de la fuente de luz

Una vez obtenidos y analizados los resultados numéricos se propusieron mejoras al sistema, con lo que se armaron los primeros prototipos a escala.

Cada que el análisis de resultados lo indicaba se realizaron mejoras y se llevaron a cabo nuevas simulaciones hasta llegar a una propuesta satisfactoria.

Una vez alcanzada la propuesta final se realizaron estudios de la eficiencia del sistema. Esto permitió hacer una comparación con los sistemas propuestos en la actualidad y se proponen posibles mejoras al sistema final.

Capítulo III

3 Simulaciones numéricas

3.1 Introducción

En este capítulo presentamos las simulaciones realizadas en Zemax con el fin de probar numéricamente la cantidad de flujo luminoso colectado por el sistema propuesto así como la eficiencia del mismo, esto para encontrar la configuración en la que el sistema funcione de la mejor manera y mostrar que los reflectores difusos pueden tener una mayor colección de flujo luminoso comparándolo con un sistema formado por elementos especulares además de tener una respuesta más homogénea a rayos incidentes sin importar el ángulo de procedencia de estos.

Inicialmente analizamos la fuente de iluminación a utilizar para reproducir las condiciones de luz que podrían existir en días nublados. Estas condiciones se explicarán más adelante.

Posteriormente se modelaron varias propuestas de sistema colector de luz indirecta en un programa de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) y se importó este al programa computacional Zemax para realizar las simulaciones correspondientes.

Finalmente se estimó la eficiencia determinando el área efectiva de colección del sistema propuesto y se comparó la cantidad de luz incidente en el área efectiva contra el flujo incidente en el detector.

3.2 Selección de la fuente de luz

Estas simulaciones tienen como fin demostrar la respuesta del sistema con luz proveniente de distintos ángulos por lo que, basándonos en un trabajo previo [23], donde se plantea que es posible simular de manera muy cercana a la realidad luz proveniente de la bóveda celeste, diseñamos un esquema, en el que, con menos puntos luminosos, ponemos a prueba el sistema propuesto. En [23] se plantea que es posible realizar simulaciones de la respuesta de sistemas de iluminación para interiores y verificar si se cumple con los estándares del CIE (Comisión Internacional de la Iluminación por sus siglas en francés). Estos estudios muestran que es posible emular distintos tipos de iluminación natural, usando 145 puntos de emisión de luz para simular 15 tipos distintos de cielo dependiendo de la distribución luminosa y potencia. Debido a que este estudio se encuentra en fase de creación de un prototipo y por simplicidad, únicamente se simulará la luz con la que se ilumina el sistema solamente con 5 fuentes luminosas colocadas a distintos ángulos del sistema propuesto y de esta manera probar la respuesta del sistema a luz proveniente de distintas direcciones.

Para cada una de estas cinco fuentes de iluminación se definió que la distribución de intensidad fuera uniforme mientras que la dirección de cada uno de los rayos de salida $I(\gamma)$ estuvo definida por la función:

$$I(\gamma) \approx I_o(\cos\gamma)^{Cn}, \quad (3.1)$$

de donde I_o es la intensidad máxima del rayo de salida, γ es el ángulo de salida y Cn es el factor que modifica el ángulo de salida de los rayos, el cual puede tomar valores enteros mayores que 0. Entre más grande sea el valor Cn la distribución angular de la fuente será más estrecha. Para estas simulaciones se

usó un factor C_n igual a 1. Un ejemplo de la distribución de rayos generada por esta configuración se muestra en la Figura 3.1a.

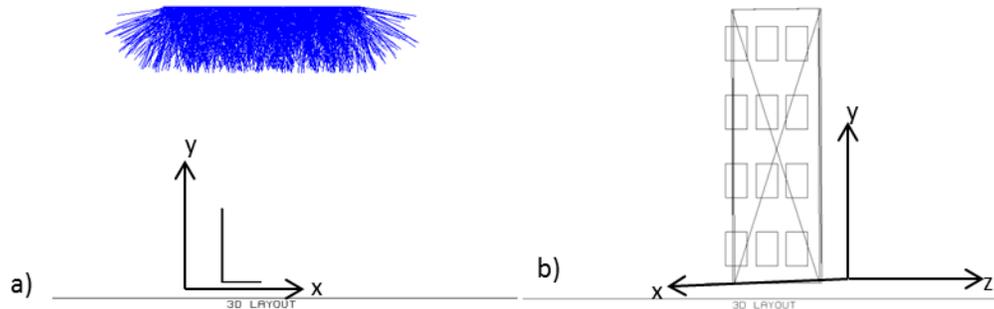


Figura 3.1. a) Distribución de la dirección de rayos usada para probar homogeneidad de la fuente de luz utilizada en las simulaciones numéricas. b) Distribución de los sensores a lo largo del área de un RDT usados para probar homogeneidad de la fuente.

De esta manera obtuvimos una fuente de luz con la misma intensidad luminosa sin importar el ángulo de observación de esta. Para corroborar lo anterior se caracterizó la homogeneidad de la fuente. Para esto se puso una fuente de emisión de 2 metros por 2 metros de área y 200 watts de potencia de salida, con las características de distribución de potencia descritas por la Ec. 3.1 puesto a 2 metros de distancia de 12 sensores repartidos equidistantemente en un área de 50 cm por 35 cm como se ve en la 3.1b. Para caracterizar la homogeneidad de la fuente luminosa se hizo rotar esta con respecto al eje x-y y se midió la cantidad de incidencias y el flujo luminoso medida por cada uno de los sensores colocados. Se muestra en la tabla 3.1 los resultados de esta caracterización.

Tabla 3.1 Potencia medida y número de hits del promedio del flujo medido por los 12 sensores colocados.

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Potencia (mW)	13±15%	13±15%	13±15%	13±15%	12±16%	12±16%	11±18.2%	11±18.2%
Hits	~37000 ±5.4%	~35000 ±8.5%	~35000 ±8.5%	~35000 ±8.5%	~35000 ±11.4%	~35000 ±11.4%	~30000 ±13.3%	~30000 ±13.3%

En ángulos negativos el comportamiento es igual al de los ángulos positivos por lo cual los datos fueron omitidos para esta tabla.

Con lo anterior se confirma que la configuración usada para la fuente de iluminación casi no agrega un efecto de preferencia a algún ángulo, sino que iluminará homogéneamente todo el sistema desde la posición en la que sea colocada.

3.3 Posición de las fuentes de iluminación

Para conocer la respuesta del sistema a luz indirecta (proveniente de múltiples direcciones sobre el horizonte) así como de luz directa (proveniente del sol en distintas horas del día), planteamos 5 puntos de iluminación del sistema, con fuentes de luz con las características descritas en el punto 3.2. La posición de estos 5 puntos de iluminación fue seleccionada a manera de cubrir la mayor cantidad de posibilidades de dirección de luz que podrían suceder en condiciones de luz natural. Por lo que seleccionó 2 puntos alrededor del horizonte y 3 puntos simulando el movimiento del sol desde el amanecer (sobre el horizonte) hasta el punto más alto (cuando se encuentra cercano al zenit).

Esta simulación se llevó a cabo sometiendo cada configuración del sistema a una fuente de iluminación colocada en todos los casos a una distancia de 3 m con respecto al reflector trasero y una posición angular distinta para las cinco posiciones, como se muestra en la Figura 3.2. La configuración F1 corresponde a la fuente a un ángulo de $\alpha = 90^\circ$ y $\beta = 0^\circ$ con respecto al RDP, F2 corresponde a la fuente situada a un ángulo $\alpha = 45^\circ$ y $\beta = 0^\circ$ con respecto del RDP. Las fuentes de luz F1 y F2 representan a la luz proveniente de reflexiones así como a la distribuida en distintos puntos del cielo, distinta de luz proveniente de la directa del sol. F3 corresponde a la fuente situada en un ángulo $\alpha = 0^\circ$ y $\beta = 0^\circ$ con respecto del RDP, F4 corresponde a la fuente situada a un ángulo $\alpha = 0^\circ$ y $\beta = 45^\circ$ del RDP y F5 corresponde a la fuente

situada a un ángulo $\alpha = 0^\circ$ y $\beta = 90^\circ$ del RDP. Las fuentes de luz F3, F4 y F5 representan a la luz proveniente del sol en distintas horas del día.

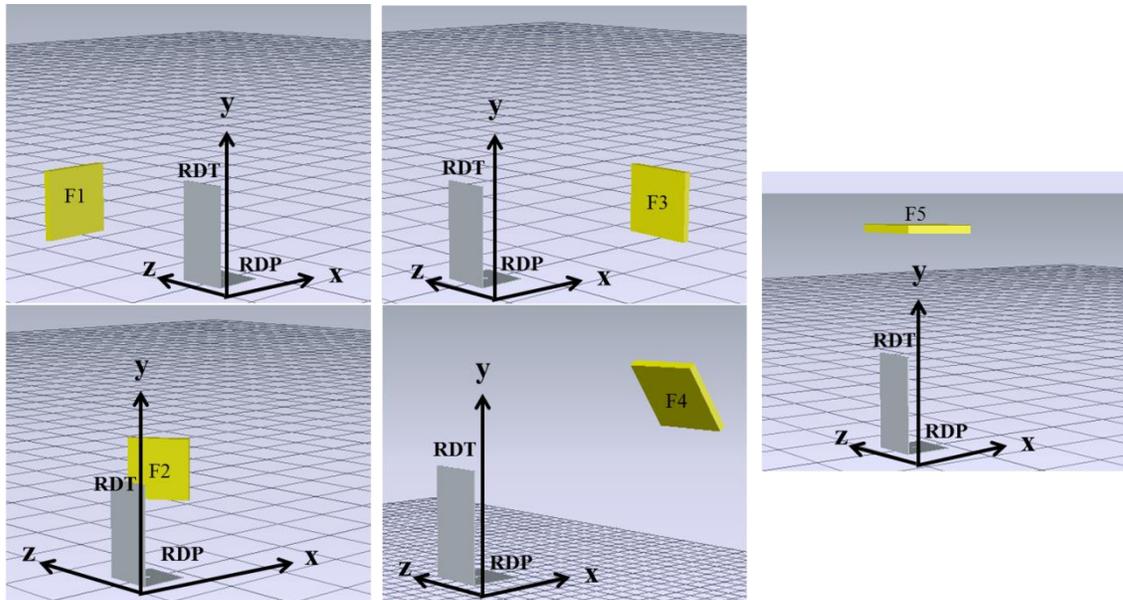


Figura 3.2. Representación esquemática de la posición de los puntos de luz utilizados como fuente de iluminación.

Se muestra en la Figura 3.2 que el ángulo α corresponde a un posición en el horizonte paralela al RDP mientras que las fuentes donde se modifica en β el ángulo de la fuente, esta se levanta en el horizonte hasta llegar a 90° con respecto de RDP.

La configuración de distribución de potencia y de dirección de rayos (explicada en la sección 3.2) fue seleccionada para emular luz en casos de días nublados, donde existe cierta direccionalidad pero donde la mayoría de rayos de luz sufren un efecto de dispersión ocasionado por reflexión en las nubes y otros objetos.

3.4 Simulación numérica del sistema básico en Zemax

Se utilizó el programa computacional Zemax para simular la respuesta de los distintos sistemas propuestos a luz proveniente de las fuentes de luz descritas en el punto 3.3. Se utilizó la modalidad de óptica no secuencial de este programa, ya que esta permite hacer el rastreo y medición de rayos de múltiples reflexiones e incidentes en una o varias superficies sin importar el orden en el que suceda, dependiendo de la configuración que se le dé a cada uno de los elementos utilizados.

Para estas simulaciones los componentes que conforman al sistema colector se les configuró un coeficiente de reflexión de 0.85 y por cada rayo incidente en las superficies difusas se pueden partir hasta en 100 rayos distintos obedeciendo la *ley del coseno* enunciada por Lambert (Ec. 2.1).

Se caracterizó el flujo radiante así como la cantidad de incidencias de rayos de luz de las distintas fuentes de luz propuestas, medido por un sensor colocado en la zona correspondiente al área de colección (AC) y se analiza la colección de flujo luminoso colectado por el sistema básico formado por un RDT y un RDP como se muestra en la Figura 3.3a.

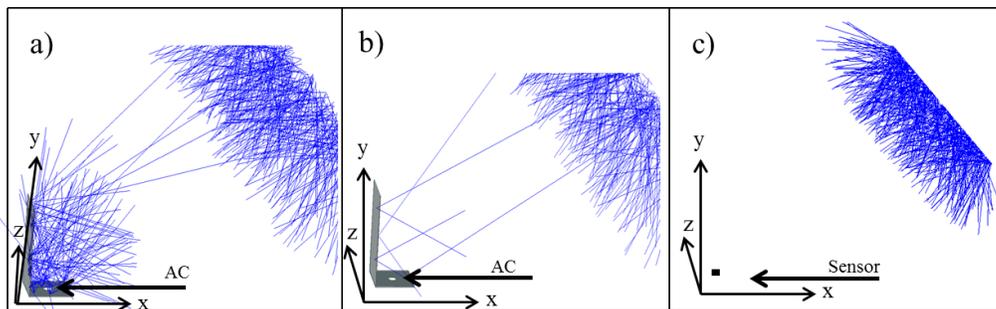


Figura 3.3. Representación gráfica de los sistemas que fueron utilizados para la simulación numérica. a) muestra el sistema formado por reflectores difusos y el área de colección correspondiente. b) muestra el sistema formado por reflectores especulares y el área de colección correspondiente. c) muestra el sensor colocado en la correspondiente área de colección.

Posteriormente comparamos el flujo radiante medido por el sistema básico con el flujo radiante colectado por un sistema formado por los mismos elementos del sistema básico pero con elementos especulares como se muestra en la Figura 3.3b y por el flujo radiante colectado por un sensor colocado en la misma región de área de colección pero sometido a radiación directa (sin sistema colector) como se muestra en la Figura 3.3c.

La Figura 3.4 muestra la comparación de flujo luminoso capturado por los distintos sistemas para cada una de las fuentes de luz.

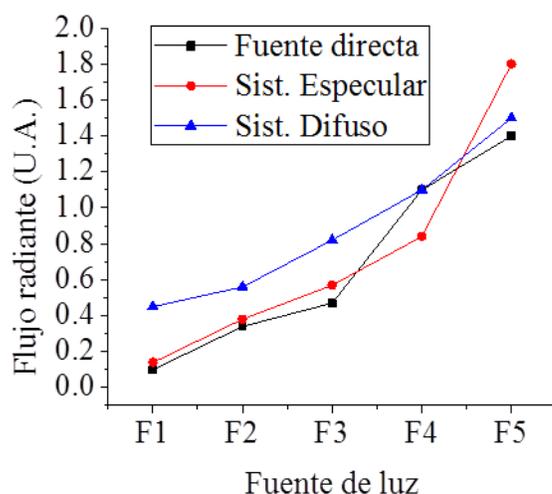


Figura 3.4. Simulación comparativa del flujo luminoso capturado por el sensor colocado en el AC comparado con el sistema básico y el sistema básico con elementos especulares.

Se observa en la Figura 3.4 que la colección de flujo luminoso va en aumento conforme la luz incide de manera normal al sensor, es decir, conforme la fuente de luz se acerca al zenit. Al comparar la colección de flujo radiante colectado por el sistema básico con el sistema formado por elementos especulares y el sensor con incidencia directa se nota que el sistema básico tiene una mayor colección para casi todas las fuentes de luz. Para la fuente de luz F5, el sistema formado por elementos especulares, colecta un poco más de

flujo radiante que el sistema. Esto puede ser debido a que la luz incide directamente en el sensor sin ser reflejado en ninguna superficie lo que hace que la potencia de cada rayo de luz no sea dividida en ningún punto.

Se midió de igual manera el número de incidencias para cada uno de los sistemas comparados en el paso anterior y se muestra en la Figura 3.5 el resultado de esta simulación.

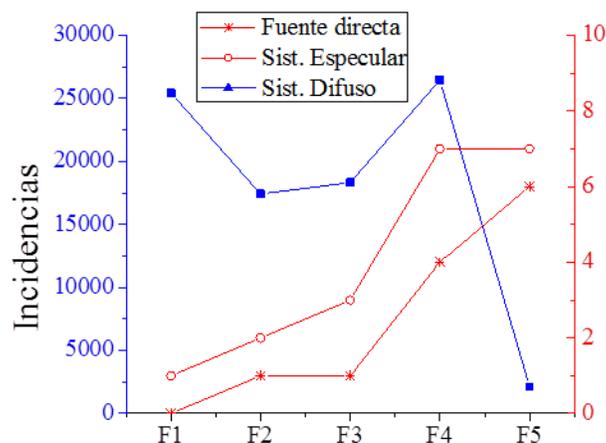


Figura 3.5. Medición del número total de incidencia de rayos en el sensor colocado en el AC comparado con las incidencias medidas por el sistema básico y la referencia (sistema básico formado por elementos especulares).

Se observa que los “hits” recolectados por el sistema especular, así como el sensor solo, no alcanzan las decenas de “hits”, mientras que el sistema formado por elementos difusos supera las decenas de miles de “hits”. Esto quiere decir que el sistema difuso tiene la capacidad de capturar muchos más rayos que los sistemas especulares pero que la potencia no necesariamente es mucho mayor; ya que la potencia de cada rayo incidente se reparte en cada uno de los rayos resultantes debido a las reflexiones en las superficies difusas.

Con lo anterior se puede ver cómo las superficies difusas tienen la capacidad de recolectar más flujo radiante que las superficies especulares debido al modo en el que reflejan la luz incidente. La localización de la fuente de luz juega un papel importante en la colección de luz, ya que se puede ver que conforme la fuente se acerca al zenit (90° con respecto del RDP) la luz llega de manera normal al sensor, sin embargo se muestra que el sistema básico, formado por elementos difusos colectó más luz sin importar dónde se encontraba la fuente de luz. Lo anterior podría significar que un sistema formado por elementos difusos podría funcionar durante más horas del día, capturando más flujo radiante sin importar el ángulo de incidencia.

La diferencia de hits colectada por el sistema básico nos llevó a pensar que era posible aumentar el total de flujo radiante capturado por el sistema agregando reflectores secundarios y de esta manera aumentar el área total de colección.

3.5 Simulación numérica de sistemas con reflectores secundarios

Los resultados obtenidos en el punto anterior permiten ver que es posible aumentar el flujo radiante capturado por un sistema cuyos elementos son difusos. Sin embargo, se pensó que era posible aumentar aún más la cantidad de luz recolectada por el sistema, aumentando el área total de colección. Debido a que el área donde se pretende instalar este tipo de sistemas es limitada, ya que se busca aprovechar espacios en las fachadas, el área de los reflectores no puede crecer de manera indiscriminada. Es por esto que se pensó posible aumentar el área de colección de manera vertical, es decir, agregar Reflectores Difusos Secundarios (RDS) paralelos al RDP.

La Figura 3.6 muestra los RDS agregados al sistema básico. En estas simulaciones se tienen como variables, a la configuración básica, la cantidad de RDS, así como la distancia d entre el RDS y el RDP y el ángulo θ de inclinación con respecto al RDP.

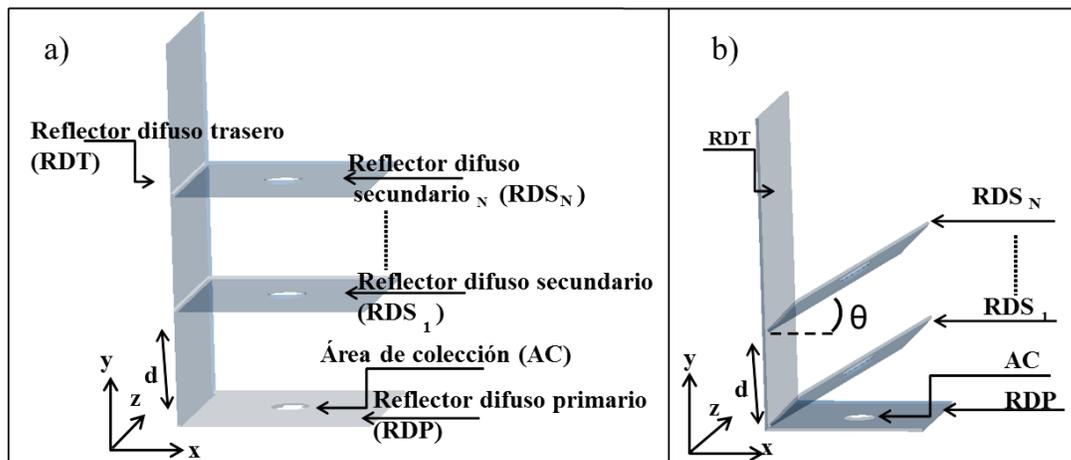


Figura 3.6. Representación esquemática del sistema complejo formado por RDT-RDP y varios RDS. a) muestra los RDS con inclinación de 0° con respecto del RDP. b) muestra el RDS con inclinación de θ con respecto del RDP.

Para este punto se probó agregando RDS paralelos al RDP y un rango de distancia d de 3 cm hasta 12 cm en pasos de 3cm entre cada distancia como se muestra en la figura 3.6 a y un rango de inclinaciones θ de 20° hasta 50° con un paso de 10° por cada simulación y valores de distancia d de 0cm hasta 12cm con un paso de 3 cm por cada simulación como se muestra en la figura 3.6 b.

Se presenta en la Figura grafica 3.7 los resultados de las corridas de simulaciones donde θ permanece constante (a 0° de inclinación) y se modifica la distancia d .

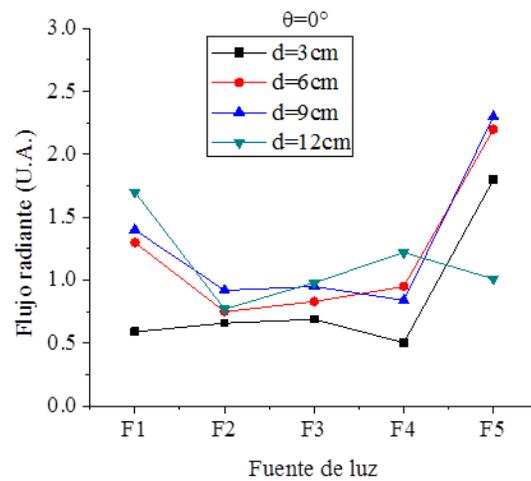


Figura 3.7. Respuesta del sistema básico agregando RDS a distintas fuentes de iluminación.

Se observa en la figura 3.7 que para este rango de configuraciones, la que logra tener una mayor colección de flujo luminoso para casi todos los casos es donde d es igual a 9cm. Posterior a este rango de configuraciones, donde se dejaba fijo el grado de inclinación de θ , se realizaron las simulaciones correspondientes a modificar tanto el grado de inclinación θ , como la distancia d entre el RDP y el RDS. Se muestra en la figura 3.8 los resultados obtenidos para esta corrida de simulaciones.

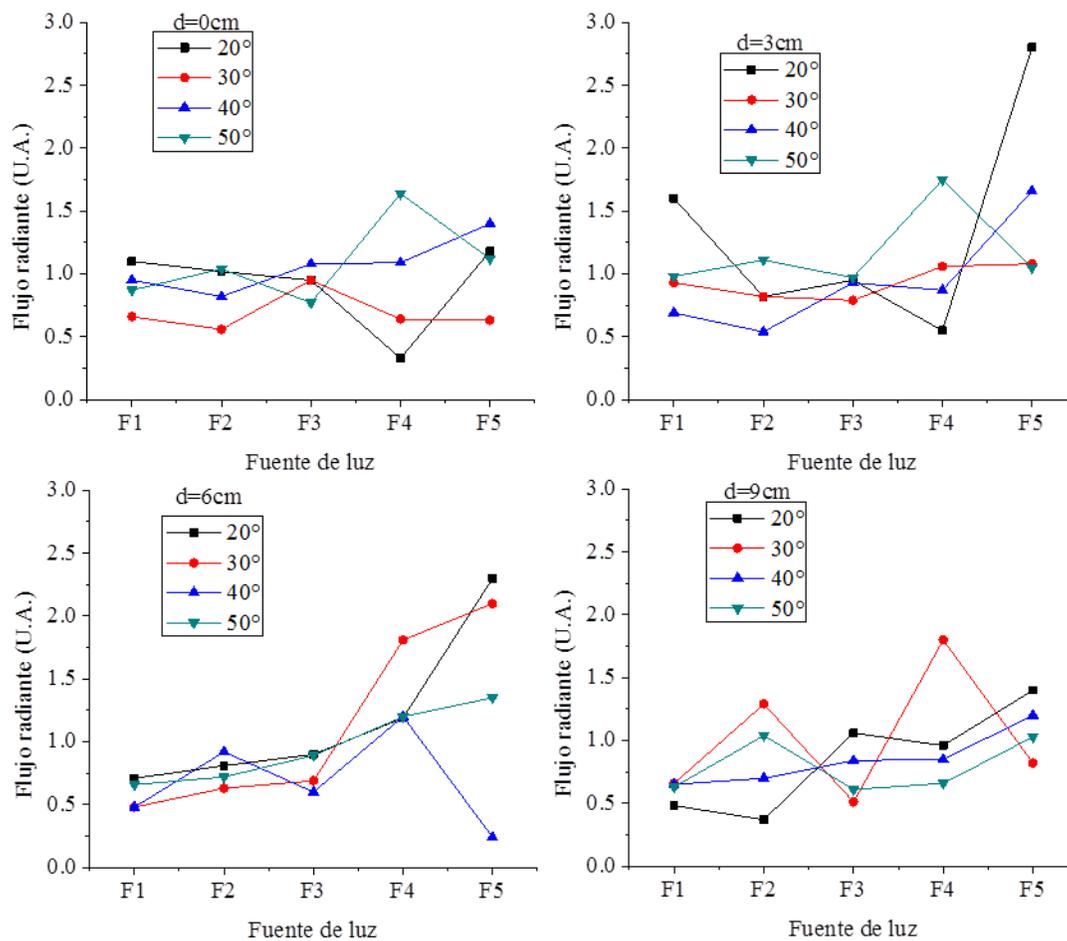


Figura 3.8. Resultado de las simulaciones de la respuesta del sistema en distintas configuraciones a iluminación en distintos ángulos.

Con los resultados obtenidos en esta corrida de simulaciones se analizó el porcentaje de mejora de cada una de las configuraciones comparando el flujo radiante colectado por cada configuración del sistema con lo colectado por el sistema formado por elementos especulares para cada una de las fuentes de iluminación y de esta manera hacer un compendio de configuraciones que tengan la mayor cantidad de flujo radiante.

Se muestra en la Tabla 3.2 el compendio de configuraciones con mayor flujo radiante colectado con respecto a la referencia.

Tabla 3.2. Porcentaje de mejora de la luz colectada por sistemas en distintas configuraciones para cada una de las fuentes de iluminación agregando 1 reflector difuso secundario.

Fuente de Iluminación	$\theta=0^\circ; d=9\text{cm}$ (%)	$\theta=20^\circ; d=6\text{cm}$ (%)	$\theta=30^\circ; d=6\text{cm}$ (%)	$\theta=40^\circ; d=0\text{cm}$ (%)	$\theta=50^\circ; d=3\text{cm}$ (%)
F1	90	80.2	70.8	85.26	85.7
F2	58.6	53.08	39.6	53.65	65.7
F3	40	36.6	17.4	47.2	41.2
F4	0	29.4	53.59	22.9	52
F5	21.73	21.7	14.28	-28.57	-71.5
Promedio	42.08	44.23	39.15	36.1	34.6

En esta tabla se muestran únicamente el análisis de los sistemas más significativos.

De la tabla 3.2 también se puede ver que la mejor respuesta sucede cuando el ángulo θ es de 20° y tiene una distancia d de 6cm que en promedio capta poco más de 44% más luz que la referencia, mientras que la configuración cuando el ángulo θ es de 30° y la distancia d es de 6 cm es la que varía menos con respecto a la fuente de iluminación que se podría traducir en la que consigue tener una respuesta más uniforme a lo largo de un día.

A continuación se probó el efecto de agregar más de un RDS y de igual manera modificar la distancia d y el ángulo θ como en el paso anterior, y se calculó el porcentaje de mejora al agregar hasta 4 RDS siendo lo mostrado en la Tabla 3.3 los resultados obtenidos.

Tabla 3.3. Porcentaje de mejora al agregar hasta 4 RDS*

$\theta=20^\circ, d=6\text{ cm}$		$\theta=30^\circ, d=3\text{ cm}$		$\theta=40^\circ, d=0\text{ cm}$		$\theta=50^\circ, d=3\text{ cm}$	
Fuente de luz	Porcentaje de mejora (%)	Fuente de luz	Porcentaje de mejora (%)	Fuente de luz	Porcentaje de mejora (%)	Fuente de luz	Porcentaje de mejora (%)
F1	-290.2	F1	15.4	F1	-122.5	F1	-24.2
F2	-105	F2	15.3	F2	32.5	F2	0
F3	-124	F3	13.1	F3	15.4	F3	20.6
F4	-243	F4	-23.2	F4	20.9	F4	-62.3
F5	-97	F5	42.5	F5	-30.7	F5	-13.3

*Para estas simulaciones únicamente se probaron los ángulos y distancias más significativas.

Se observa en la tabla anterior que en algunos casos era contraproducente agregar más de un RDS probablemente debido a algún efecto de sombra,

como lo es en el caso donde $\theta=20^\circ$ y $d=6\text{cm}$ donde el sistema formado por reflectores especulares logra coleccionar más flujo luminoso que el sistema propuesto, es por esto, que resulta con un porcentaje negativo de colección. En otros casos se observa que el porcentaje de mejora es muy bajo por lo que se concluye que agregar más de un RDS casi no tiene contribución a la suma de flujo luminoso coleccionado comparado con lo coleccionado por los elementos principales (RDT, RDP, solo un RDS) no así del total de incidencia de rayos en el detector. Lo anterior puede ser debido a que si existe captura de rayos en esos segmentos sin embargo llegan reducidos en potencia por una cantidad mayor de reflexiones a comparación de los capturados cerca del AC.

3.6 Estimación de la eficiencia del sistema propuesto

Las simulaciones descritas anteriormente permitieron definir algunas configuraciones que posiblemente puedan tener un desempeño aceptable en condiciones de luz natural, es por esto que continuación se estimó la eficiencia de algunas de estas configuraciones de acuerdo a los parámetros de diseño para saber con una mayor exactitud cuáles serán las o las configuraciones que deberán ser tomadas en cuenta para las pruebas experimentales. Para realizar la estimación de la eficiencia se tomaron en cuenta 2 factores:

- El elemento que más contribución tiene a la colección de flujo radiante y a partir de este elemento calculamos el
- Área efectiva de colección (AEC) que hace referencia al cálculo de área del elemento de mayor contribución a la cual este elemento deja de coleccionar luz.

Con estos factores se comparó el total de flujo radiante en el AEC con lo que el sistema colecta en el AC y de esta manera se obtuvo la eficiencia de colección del sistema.

3.6.1 Elemento de mayor contribución a la colección de luz

Para saber cuánta luz disponible hay incidente en el sistema fue necesario identificar cuál es el elemento que más contribución tiene a la colección de flujo radiante. Para esto se tomó una de las configuración que más colección de luz tuvo, del punto 3.5, siendo esta cuando: $\theta=30^\circ$ y $d=3$ cm. El sistema en esta configuración se iluminó con la fuente de luz F3 descrita en la sección 3.3 (donde la fuente luminosa se encuentra sobre el horizonte a 0° de elevación y 0° con respecto del RDP) y se agregaron cada uno de los reflectores a la vez para saber cuánto flujo luminoso se colectaba con cada uno de los elementos. Se muestra en la gráfica 3.9 cuál fue el resultado de esta simulación.

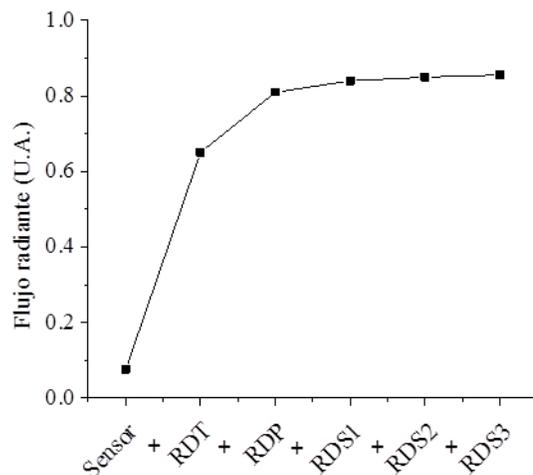


Figura 3.9. Simulación de la contribución a la colección de flujo luminoso de cada uno de los elementos del sistema propuesto iluminándolo con la fuente F3.

Se observa que el elemento que tiene una mayor contribución a la colección de flujo radiante es el RDT y el RDP, mientras que el resto de los elementos agregados tiene una contribución mínima. Es por esto que únicamente se tomará en cuenta el RDT y el RDP para la estimación de la eficiencia del sistema.

3.6.2 Cálculo del área efectiva de colección

A partir del elemento que más contribución a la colección de flujo radiante (el RDT) se calculó el AEC iluminando con las 5 fuentes de iluminación (F1, F2, F3, F4 y F5) encendidas al mismo tiempo, haciendo incidir la luz en el sistema colector básico (RDT-RDP), pero en este caso se varió la altura del RDT desde 3cm hasta 27 cm de alto con pasos de 3cm entre simulaciones como se muestra en la Figura 3.10.

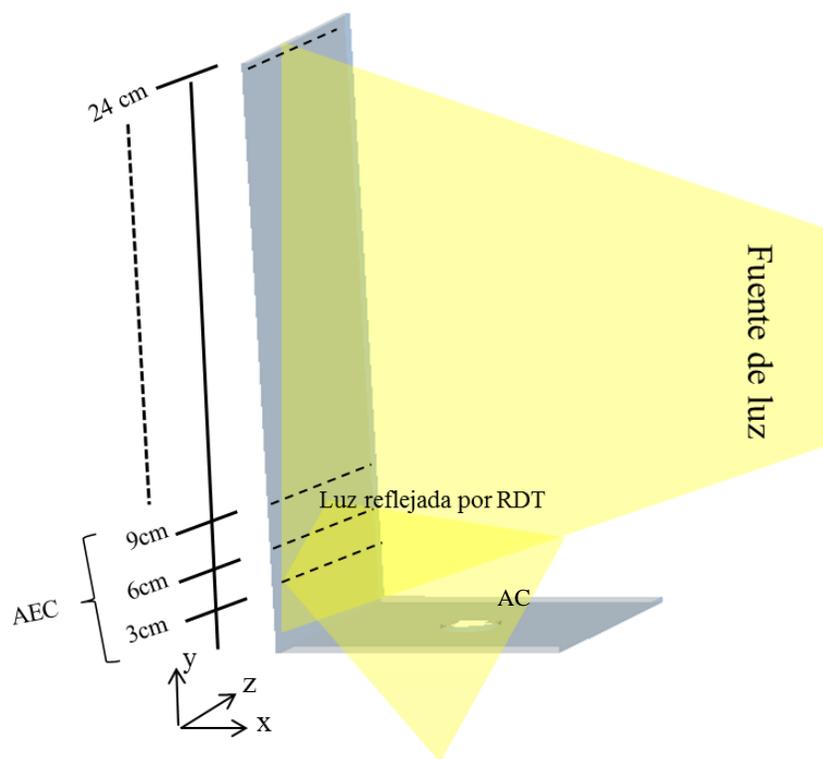


Figura 3.10. Esquema de la modificación de la altura del RDT para el cálculo del AEC para determinación de la eficiencia de colección del sistema.

De esta manera se encontró que la contribución del sistema básico con distintas alturas del RDT va en aumento según va aumentando el AEC hasta llegar a un límite como se muestra en la Figura 3.11.

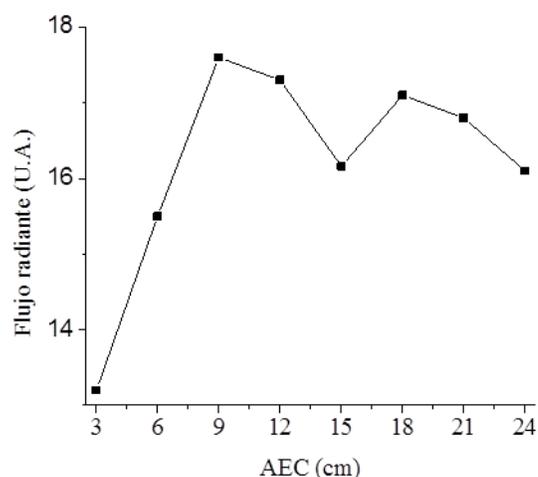


Figura 3.11. Respuesta del sistema básico al probar distintas alturas del RDT.

Se observa que a los 9cm de altura el RDT deja de tener contribución a la colección de flujo radiante. Con los datos obtenidos en el punto 3.6.1 y este punto se estimó la eficiencia de las distintas configuraciones consideradas.

3.6.3 Eficiencia para distintas configuraciones

Una vez calculado el elemento de mayor contribución y el AEC se utilizaron estos resultados para la estimación de la eficiencia del sistema. Para esto se midió el total de flujo directo incidente en el AEC y se comparó con lo colectado por sistemas en distintas configuraciones en las respectivas AC. Las configuraciones de los sistemas fueron escogidos de las más significativas de la sección 3.5 y se sometieron de igual manera a luz proveniente de distintos ángulos por las mismas fuentes de luz, F1, F2, F3, F4 y F5 pero en este caso,

todas estas se encontraban encendidas al mismo tiempo, con el fin de simular el caso ideal donde la luz es homogénea en todas direcciones y con relativamente la misma intensidad [24].

En la Tabla 3.4 se muestra los resultados de la estimación de la eficiencia de los sistemas en las configuraciones que mostraron ser más sobresalientes, siendo estas; cuando $\theta=20^\circ$ y $d=6\text{cm}$ (S1); cuando $\theta=30^\circ$ y $d=3\text{cm}$ (S2); cuando $\theta=40^\circ$ y $d=0\text{cm}$ (S3); cuando $\theta=50^\circ$ y $d=3\text{cm}$ (S4).

Tabla 3.4. Eficiencia de sistemas en las configuraciones que tuvieron una mejor respuesta a luz proveniente de distintas direcciones (Usando las fuentes de luz F1, F2, F3, F4 y F5 encendidas al mismo tiempo).

Sistema	Ángulo θ ($^\circ$)	Distancia d (cm)	Número de RDS	Eficiencia (%)
S1	20	6	1	6.53
S2	30	3	1	5.48
S3	40	0	1	6.84
S4	50	3	1	6.67

Estas simulaciones muestran que las configuraciones seleccionadas tienen eficiencias bajas, siendo la máxima cuando $\theta=40^\circ$, $d=0\text{cm}$ y con 1 RDS de 6.84%, por lo que se pensó que era posible aumentar la eficiencia de colección si el sistema era escalable, esto es, que se pudiera aumentar el flujo radiante colectado agregando más superficies reflectoras y así aumentar el área de colección del sistema.

Para aumentar la eficiencia del sistema se agregó al sistema S4, dos RDS en la misma configuración, ($\theta=40^\circ$ y $d=0\text{cm}$) así como un AC por cada uno de los RDS, además de probar distintas distancias (f) de las AC al RDT. Se muestra en la Figura 3.12 la configuración para las simulaciones de escalamiento del sistema.

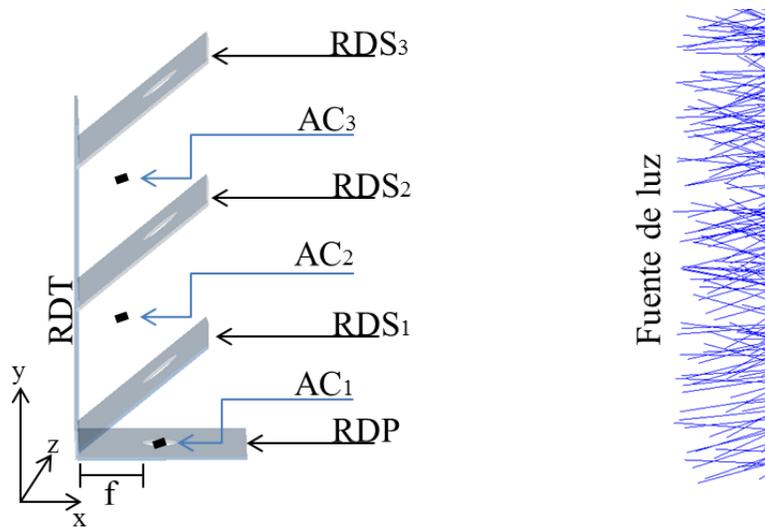


Figura 3.12. Aumento del área de colección del sistema aumentando RDS así como AC por cada RDS. Se muestra también la distancia f del AC al RDT.

Como se mencionó antes, también se probó modificando la posición de los distintos AC en 3 distancias f ; 0m, 0.05m y 0.1m al RDT. La Tabla 3.5 muestra el resultado de simular la respuesta del sistema al modificar la distancia f y sumar el total de potencia medida en cada una de las AC,

Tabla 3.5. Eficiencia de colección del sistema escalado a distintas distancias f .

f (cm)	Eficiencia (%)
10	16.47
5	19.13
0	28.94

Estas simulaciones muestran que la eficiencia aumenta cuando se acercan las AC al RDS, el sistema con escalado con la suma de la potencia en cada una de las AC, además de tener un aumento considerable en la eficiencia total del sistema de colección.

Algo importante de la estimación de la eficiencia del sistema es que cada área de colección captura una cantidad similar de flujo radiante (F) en Watts para cada distancia f probada; $F_{AC1}=1.89\text{mW}$, $F_{AC2}=2.49\text{mW}$, $F_{AC3}=2.68\text{mW}$. Esto querría decir que al introducir la luz a los recintos, por cada una de las AC se

tendría casi la misma intensidad de luz por cada uno de los segmentos del sistema.

Con lo anterior se puede suponer que es posible agregar una cantidad N de RDS, así como AC por cada RDS, flujo radiante al total de la luz colectada por el sistema y de esta manera aumentar la cantidad de luz introducida a los recintos.

3.7 Discusión de resultados

En lo obtenido en las simulaciones numéricas se destaca que la luz proveniente del zenit favorece la captación de rayos en trayectorias directas (sin muchas reflexiones) dado el sistema formado por elementos especulares; esto puede ser debido a que la potencia reflejada por éstos no se divide en múltiples rayos, como sucede en el caso de superficies difusas. Sin embargo, lo que se busca en este trabajo es encontrar un método que dadas ciertas condiciones de luz difusa favorezca la colección de flujo luminoso buscando un compromiso entre potencia y horas útiles de funcionamiento. Y como se observó en las simulaciones del punto 3.4 el sistema formado por reflectores difusos colectó una mayor cantidad de luz en casi todos los casos de las distintas posiciones de las fuentes de luz.

Se observó que los elementos que tiene una mayor contribución en la colección de flujo radiante son el RDT y el RDS. Es por esto que solo se tomaron en cuenta estos 2 elementos al estimar la eficiencia de colección. Se observa que el área efectiva de colección se encontró cuando el RDT tiene 9cm de alto, a mayor altura ya no aumentó el total de luz colectada por el sistema. Este método puede ser de utilidad al construir el prototipo ya que se podrá saber con anticipación las dimensiones del sistema a las cuales este es ya no introduce más luz al AC.

Es de notar que agregar múltiples RDS casi no tiene contribución a la colección de potencia óptica, no así de rayos incidentes, cuando solo se cuenta con una AC, sin embargo, aumentando un AC por cada RDS es posible aumentar el área de colección escalando el sistema y de esta manera se logró aumentar la eficiencia de colección. Llegando a medir hasta poco más del 28% de eficiencia de colección de flujo radiante.

Se puede prever que una de las limitantes de los sistemas pasivos, como lo es este sistema propuesto, es que la luz directa suele aventajar a los sistemas formados por elementos especulares, como lo observado en la sección 3.4, donde el sistema con elementos especulares tuvo una mayor colección de flujo radiante cuando la fuente de luz se encontraba cercana al zenit. Sin embargo la luz direccional suele estar presente solo en días despejados, que en regiones con climas como la Ciudad de México, suceden en el menor de los casos a lo largo de un periodo de un año. Es por esto que la respuesta del sistema observada en este capítulo hace suponer que es posible tener una mayor colección de flujo radiante en un rango más amplio tanto de ángulo de aceptación como de periodo de tiempo a lo largo de un día.

Las simulaciones desarrolladas en este capítulo también permitieron discernir entre varias configuraciones que fueron puestas a prueba en condiciones de luz controlada en laboratorio así como en condiciones de luz natural y cuyos resultados se presentan en el siguiente capítulo.

Capítulo IV

4 Caracterización del prototipo en condiciones controladas de laboratorio y condiciones de luz natural

4.1 Introducción

En este capítulo se describen las pruebas en condiciones controladas de laboratorio, así como mediciones en condiciones de luz natural, realizadas para verificar la respuesta observada en las simulaciones descritas en el capítulo III. En una primera fase se midió dentro de un cuarto oscuro la respuesta del prototipo iluminándolo con luz artificial y en condiciones controladas. En esta fase se midió de manera experimental la contribución de cada uno de los elementos que conforman el sistema y se probó con distintas configuraciones la colección de flujo radiante de manera análoga a lo realizado en las simulaciones numéricas. En la segunda fase se tomaron en cuenta los resultados obtenidos por las mediciones en laboratorio y lo obtenido en las simulaciones numéricas para armar nuevamente el prototipo con las configuraciones que demostraron ser las de mayor colección de flujo radiante. Estas configuraciones fueron utilizadas para probar el sistema en condiciones de luz natural por lo que fue instalado en la fachada con orientación norte del laboratorio del Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del CCADET y se midió la respuesta del sistema en días nublados.

Al final de este capítulo se analiza los resultados obtenidos en ambas fases de los experimentos realizados y se proponen posibles mejoras.

4.2 Fabricación del prototipo

El prototipo propuesto en el capítulo II, se elaboró con piezas de cartoncillo recubierto con una mezcla de pintura Vinimex blanco 700 de Comex con sulfato de bario para asemejar el recubrimiento Spectralon® [25]. La mezcla de pintura mostró tener una mejora en el factor de reflectancia en alrededor del 10% comparándola con la respuesta de una superficie recubierta con pintura vinílica blanca. Lo que se busca con esto, es la uniformidad de reflexión de los reflectores difusos y que se logre el efecto planteado en el capítulo II.

El RDT tiene dimensiones de 13cm de largo por 25cm de alto, mientras que el RDP y los RDS son círculos recortados de 7.5cm de radio. Todas las caras de los reflectores fueron recubiertas con pintura similar al Spectralon. Por debajo del AC fue colocada una esfera integradora ISP 50-8I de Ocean Optics con la que se recolectó la luz reflejada por los distintos elementos del sistema. La luz colectada por la esfera se transportó usando fibra óptica de 400 μ m de núcleo a un detector Newport 818-SL y se midió la potencia colectada por el sistema en un multímetro óptico Newport 1930c a 575nm. La razón de medir a esta longitud de onda radica en que se midió el espectro de emisión del foco utilizado para alumbrar el sistema en condiciones de laboratorio y se observó que el máximo de emisión se encontraba cercano a esta longitud de onda como se muestra en la Figura 4.1.

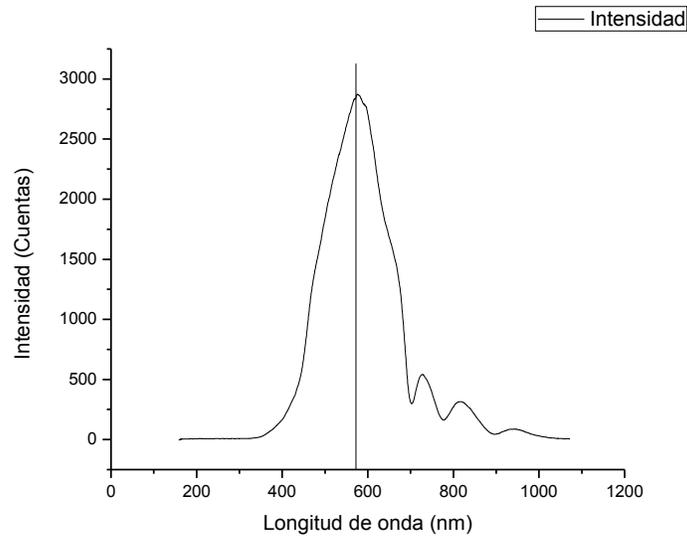


Figura 4.1 Espectro de emisión del foco utilizado para alumbrar el sistema, mostrando el máximo localizado cerca de 575 nm.

El sistema fue introducido a un tubo de acrílico de .355m de largo y 0.14m de diámetro como se muestra en la Figura 4.2. Por simplicidad en este trabajo no se consideró el efecto óptico causado por el tubo de acrílico.

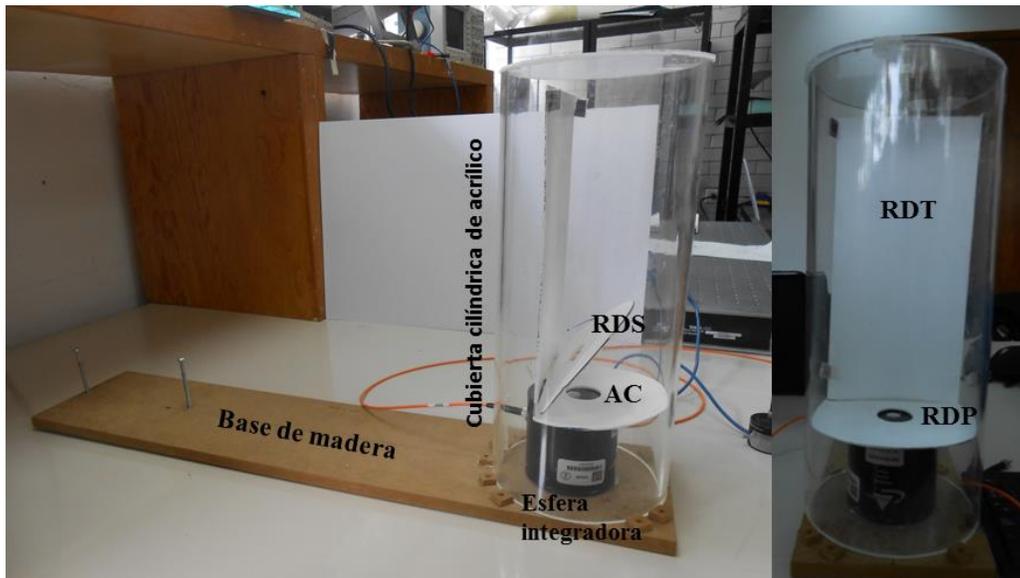


Figura 4.2. A la izquierda, vista de perfil del sistema instalado en la base de madera, a la derecha, vista frontal del sistema básico instalado en la base de madera.

El prototipo montado en el tubo de acrílico fue asegurado a una pieza de madera de 0.7m de largo por 0.15m de ancho, para fijar la distancia a la fuente de luz artificial y también para poder instalarlo en la ventana del laboratorio y suspenderlo a 1 metro de distancia del borde de la ventana para las pruebas en condiciones de luz natural.

4.3 Caracterización del prototipo en condiciones controladas

La caracterización de la respuesta del sistema se llevó a cabo introduciendo un elemento a la vez al tubo de acrílico y midiendo el flujo radiante reflejado en el AC, para medir el flujo radiante se colocó la esfera integradora por debajo del AC. El sistema fue iluminando con un foco incandescente de 50 Watts de marca Philips apuntando a una bóveda esférica recubierta de pintura blanca. El sistema se colocó a 2 m de distancia de separación de la fuente luminosa como se muestra en la Figura 4.3.

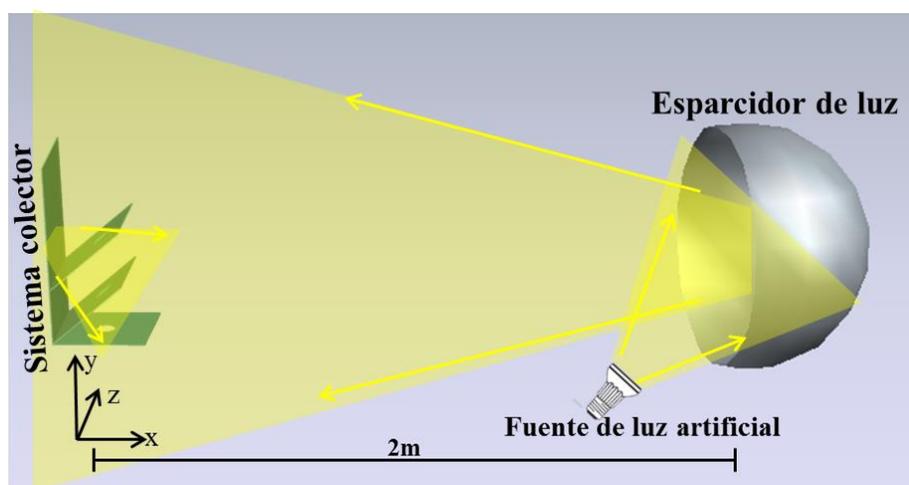


Figura 4.3. Esquema del montaje experimental, para las pruebas con luz artificial del prototipo.

Se alumbró el sistema de esta manera con el fin de obtener una iluminación con rayos de luz provenientes de varias reflexiones, con una distribución de potencia homogénea y lo menos direccional posible como sucedería en el caso de un día nublado.

La respuesta del sistema fue medida al probar distintas configuraciones. Las configuraciones a probar van desde agregar al sistema básico varios RDS de los cuales se modificaron los parámetros d y θ , midiendo la potencia colectada por el sistema en el AC de manera análoga a lo realizado en las simulaciones numéricas.

Para estas mediciones se tomó como punto de comparación la esfera integradora dentro del tubo de acrílico, sin ningún otro elemento presente. Posteriormente se fueron agregando los elementos que conforman al sistema básico (RDT-RDP) y al final se agregaron los elementos que conforman al sistema complejo, formado por reflectores secundarios (RDS1, RDS2, RDS3 hasta RDS4). Para las primeras mediciones se agregaron los elementos secundarios con un ángulo de inclinación $\theta=0^\circ$ con respecto al RDP. La respuesta del sistema se muestra en la Figura 4.4.

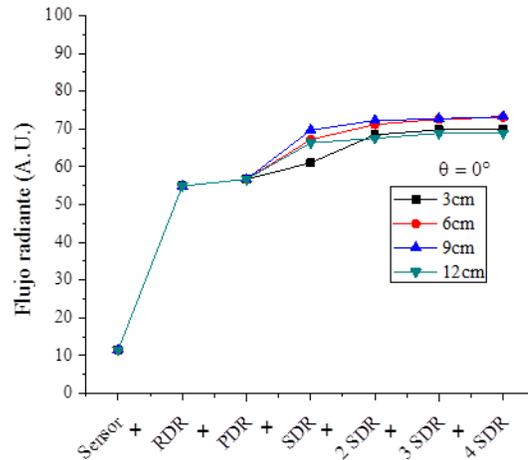


Figura 4.4. Respuesta del sistema en condiciones controladas y alumbrado con luz artificial de un prototipo formado por RDT-RDP-RDS y hasta 4 RDS.

Se observa que los elementos que más contribución tienen a la colección de luz son el RDT con una contribución del 61.9% y el RDS1 con una contribución del 12.79% del total de luz colectada.

También se observa que cuando d es igual a 9cm es cuando se obtiene una mayor cantidad colección de flujo radiante, cuando se agrega el RDS1 con una colección de 72.2 μw , llegando a coleccionar hasta 73.98 μw cuando se agrega el RDS4. En esta configuración donde más se tuvo colección de potencia luminosa, al agregar el RDS2 hubo una contribución de 0.5 μw lo que representa un 0.67% del total de luz colectada.

El RDS3 tiene una contribución aún menor de solo 0.02 μw . Un efecto similar se observa en el resto de configuraciones, por lo que se puede decir, entonces, que agregar más de un RDS casi no tiene efecto en la contribución total de luz colectada como lo observado en el capítulo III.

Posterior a estas pruebas se realizó, con el mismo procedimiento del paso anterior, la caracterización del sistema pero esta vez con ángulos θ de 15°, 30°

y 45° y distancias d de 0cm, 3cm, 6cm y 9cm. Se muestra en la Figura 4.5 el resultado de estas pruebas.

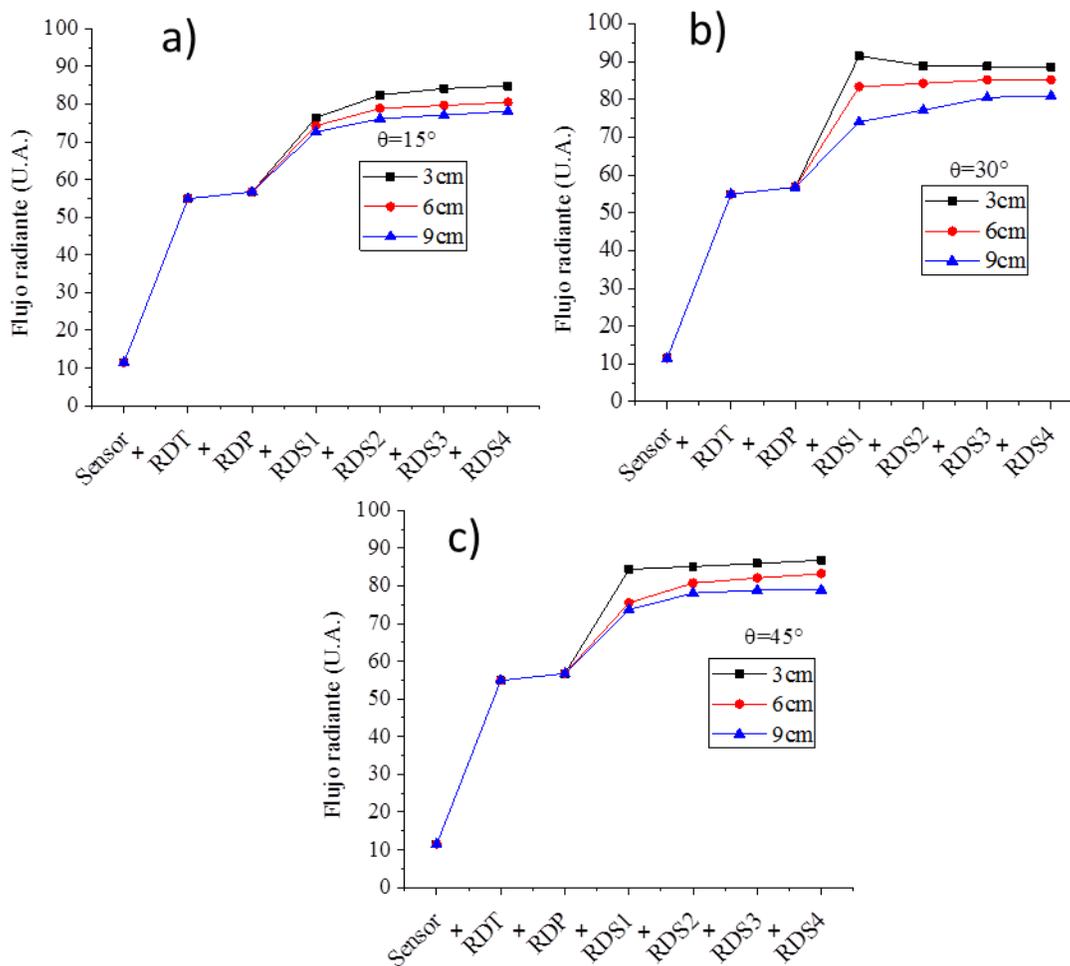


Figura 4.5. Respuesta del sistema en condiciones controladas y alumbrando el prototipo de manera indirecta. Se agregan hasta 4 RDS y se modifica la distancia d y el ángulo θ entre cada elemento. a) muestra el sistema con un ángulo $\theta=15^\circ$ y varias d . b) muestra el sistema con un ángulo $\theta=30^\circ$ y varias d . c) muestra el sistema con un ángulo $\theta=45^\circ$ y varias d .

Se observa en estas mediciones que el sistema formado por los elementos RDT-RDP-RDS1 con un ángulo θ de 30° y una distancia d de 3cm es el que tiene la mayor colección de flujo radiante de la iluminación artificial proveniente del difusor de luz.

En este caso se observa que los elementos que más contribuyen a la colección de luz son el RDT con un 47.45% y el primer RDS con un 38.01% del total de colección de luz alcanzando con esta configuración una colección de $91.5\mu\text{w}$ teniendo una mejora de casi el 20% del total de luz colectada comparándolo con el mejor de los casos de las pruebas donde el ángulo θ es 0° . Esto quiere decir que al agregar un ángulo de inclinación θ mayor que 0 es posible aumentar la colección de luz además de aumenta el porcentaje de contribución de luz por el RDS.

Un punto importante de este estudio es que se observa que para más de un RDS la contribución en potencia es casi despreciable (0.67% del total de luz colectada). Esto quiere decir que puede existir una gran cantidad de rayos dirigidos al área de colección pero con la potencia dividida en un número grande de reflexiones de cada uno de los rayos colectados. Con lo anterior se prueba que una mayor cantidad de rayos colectados no implican un aumento significativo en la potencia total colectada, como lo encontrado en las simulaciones numéricas.

Combinado lo anterior con lo observado en el capítulo 2, se puede concluir que las configuraciones que mejor podrían funcionar en un escenario real son; cuando $\theta=40^\circ$ y $d=0\text{cm}$ ya que fue la configuración con eficiencia de colección mayor según lo observado en las simulaciones y cuando $\theta=30^\circ$ y $d=3\text{cm}$ ya que fue donde se consiguió una mayor colección de flujo radiante según las mediciones experimentales.

4.4 Caracterización del prototipo en condiciones de luz natural

Lo obtenido en los puntos anteriores permitió discernir entre varias configuraciones posibles que pudieran tener un buen desempeño en

condiciones de luz natural y así poder diseñar un prototipo para ser instalado en la fachada con orientación norte del laboratorio del Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos (GSOE) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM con coordenadas $19^{\circ}19' N$, $99^{\circ}11' O$.

Las configuraciones seleccionadas fueron utilizadas para realizar mediciones en 2 días distintos, en condiciones climáticas similares, siendo ambos días de mucha nubosidad con algunos cambios a lo largo de las horas de medición.

La configuración 1 fue donde $\theta=30^{\circ}$ y $d=3\text{cm}$ y la configuración 2 donde $\theta=40^{\circ}$ y $d=0\text{cm}$. La Figura 4.6 muestra la forma en la que fue instalado el prototipo así como las dimensiones de la ventana donde fue instalado.

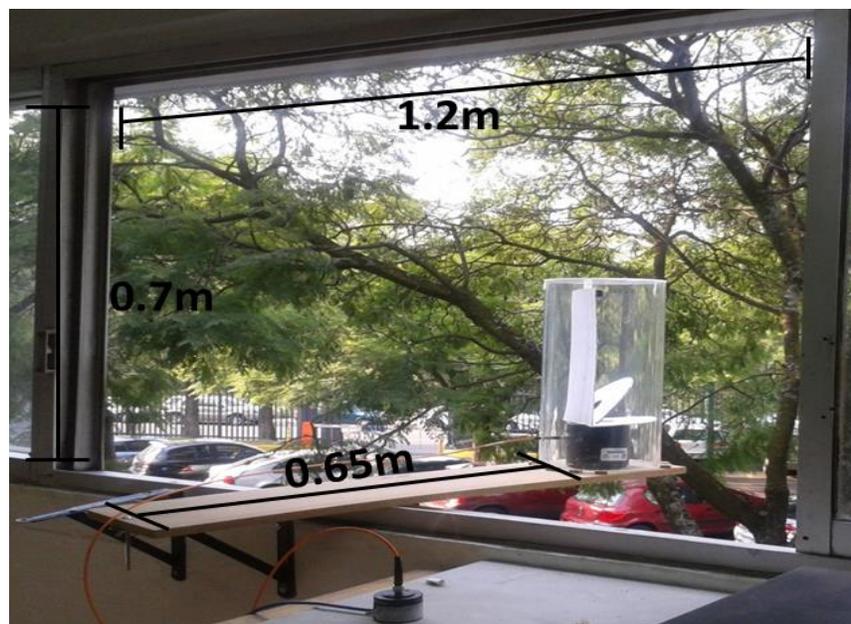


Figura 4.6. Vista del prototipo en una configuración específica, montado en la base de madera.
Vista de la fachada con orientación norte del laboratorio del GSOE.

Las mediciones se llevaron a cabo midiendo el flujo radiante colectado por el sistema. Se midió de manera continua la respuesta del sistema durante periodos de 6 horas con frecuencias de muestreo de 300 segundos. Debido a la naturaleza en los cambios de la luz natural (de dirección, de potencia y de

distribución, entre otros) fue necesario tener una medición en paralelo que permitiera tener un punto de referencia con el cual poder comparar entre distintos días de mediciones, para lo que se usó un espejo de las mismas dimensiones que el RDT del prototipo colocado en la misma forma que el sistema a probar como se muestra en la Figura 4.7.

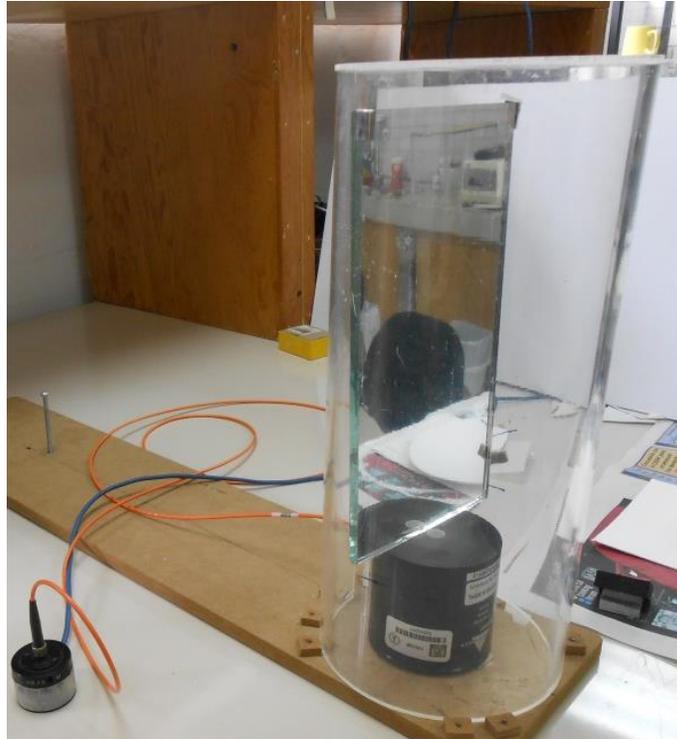


Figura 4.7. Sistema de referencia donde se muestra el RET como colector principal, el cual tiene las mismas dimensiones que el RDT y colocado de la misma manera que el sistema difuso.

Como se observó en los resultados de las simulaciones numéricas como en las pruebas experimentales de laboratorio el elemento que tiene una mayor contribución a la colección de luz en el sistema es el reflector trasero, por lo que en el caso de la referencia únicamente se utilizó este elemento para comparar las mediciones en condiciones de luz natural.

4.4.1 Pruebas experimentales en condiciones de luz natural: configuración 1

En la Figura 4.8 se observa el comportamiento del sistema a lo largo de 6 horas (12pm a 6pm) en un día nublado. En esta medición el sistema estaba conformado por un RDT, un RDP y un RDS con $d=3\text{cm}$ y $\theta=30$ grados de inclinación con respecto del RDP.

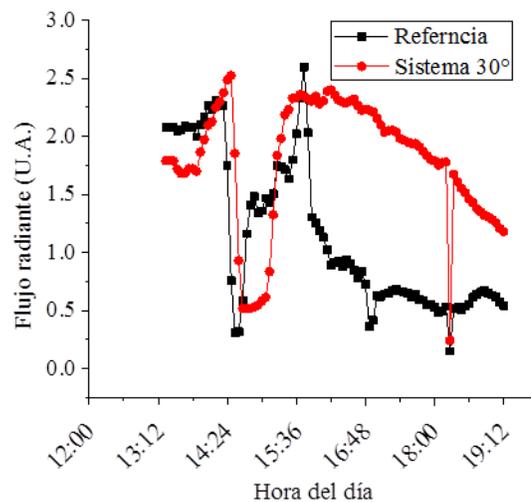


Figura 4.8. Respuesta del sistema colector de luz en condiciones de luz natural instalado en la fachada del CCADET en un periodo de 6 horas. Sistema: RDT+RDP+RDS1; $\theta=30^\circ$ $d=3\text{cm}$.

En la gráfica anterior se observa cómo el sistema tiene en promedio una mejora en la captación de luz de 26.3% de potencia por encima de la referencia durante el periodo de medición. Estos resultados muestran que el sistema es capaz de coleccionar una mayor cantidad de flujo radiante que un sistema formado por elementos especulares en días nublados.

La Figura 4.9 muestra el porcentaje de mejora del sistema formado por reflectores difusos a lo largo de esta medición experimental.

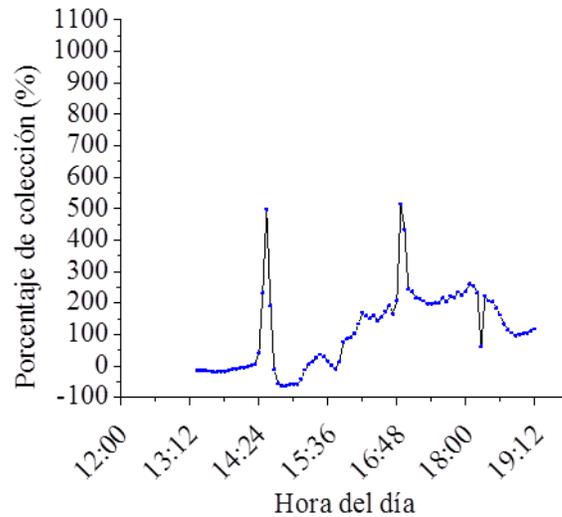


Figura 4.9 Porcentaje de colección de potencia óptica del sistema formado por reflectores difusos cuando $\theta=30^\circ$ y $d=3\text{cm}$ comparando con el sistema formado por elementos especulares.

Se observa que existieron casos donde la referencia colecta una mayor cantidad de potencia; esto sólo confirma la naturaleza de los sistemas formados por elementos especulares donde la direccionalidad es un factor importante para el funcionamiento de éstos, ya que es probable que en el periodo de 14:15 horas a 15:30 horas. El sistema de referencia reflejara rayos directos de la bóveda celeste y los dirigiera directamente al sensor, aumentando en un periodo muy corto su eficiencia.

4.4.2 Pruebas experimentales en condiciones de luz natural:

Configuración 2

En la Figura 4.10 se observa el comportamiento del sistema a lo largo de 6 horas (11am a 5pm) en un día nublado. En esta segunda medición el sistema estaba conformado por un RDT, un RDP y un RDS con $d=0\text{cm}$ del RDP y $\theta=40$ grados de inclinación.

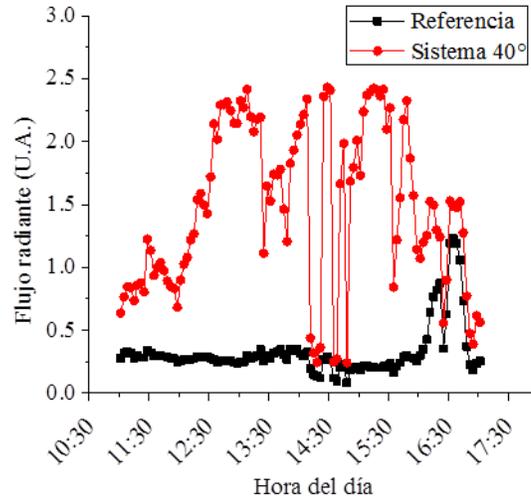


Figura 4.10. Respuesta del sistema colector de luz en condiciones de luz natural instalado en la fachada del CCADET en un periodo de 6 horas. Sistema: RDT+RDP+RDS1; $\theta=40^\circ$ $d=0\text{cm}$.

Se observa que el sistema fue superior en todo momento con una respuesta de poco más del 70%, en promedio, de luz capturada por encima de la referencia, llegando a estar en máximos de hasta 90% por encima de la referencia y en algunos momentos solo 9% por encima de la referencia. Se muestra en la Figura 4.11 el porcentaje de colección del sistema a lo largo de esta medición.

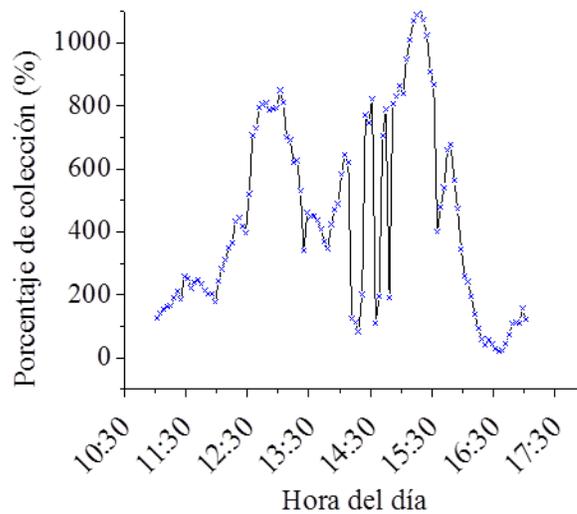


Figura 4.11 Porcentaje de colección de potencia óptica del sistema formado por reflectores difusos cuando $\theta=40^\circ$ y $d=0\text{cm}$ comparando con el sistema formado por elementos especulares.

En este caso, el sistema logró coleccionar un mayor porcentaje de colección a lo largo de la mayoría del tiempo de medición y en muy pocos momentos fue sobrepasado por el sistema formado por elementos especulares.

4.5 Discusión de resultados

Se observa que los sistemas formados por reflectores difusos contribuyen a la colección de luz proveniente de múltiples ángulos, especialmente en condiciones climáticas de nubosidad, debido a que la luz es esparcida por las nubes y esto hace que la luz carezca de direccionalidad, por lo que, los sistemas con reflectores especulares suelen tener un desempeño no tan favorable en la colección de luz difusa.

Se corroboró de manera experimental lo observado en las simulaciones numéricas respecto a que el elemento que mayor contribución de colección de luz en el sistema es el RDT con alrededor del 60% del total de colección y en segundo término el RDP con alrededor del 30% del total de colección. Por otro lado agregar más de un RDS casi no tiene contribución a la colección total del sistema.

Ambas configuraciones probadas experimentalmente capturaron una mayor cantidad de luz en promedio durante todo el periodo de medición. Y se puede concluir que los sistemas con reflectores difusos tienen una respuesta favorable para la colección de luz indirecta.

Según lo observado en el capítulo de simulaciones numéricas se cree que es posible aumentar el total de luz colectada por el prototipo, aumentando el área total de colección, sin embargo en la primera fase de este capítulo se verificó

que no basta con agregar superficies colectoras paralelas al RDP, si no que se cree que es necesario agregar un AC por cada RDS.

Lo anterior no pudo ser probado de manera experimental, debido a que no se contaba con los elementos para realizar estas pruebas.

Capítulo V

V Conclusiones

En este trabajo de tesis se probó el uso de reflectores difusos como colectores de luz solar indirecta y difusa para la iluminación de interiores, con el fin de aumentar las horas efectivas de funcionamiento de los sistemas de colección pasivos. Se caracterizó con simulaciones numéricas la respuesta del sistema a iluminación proveniente de distintos ángulos, se estimó la eficiencia del sistema propuesto y se corroboró de manera experimental, que los reflectores difusos pueden captar una mayor cantidad de flujo radiante en días nublados con respecto a la captación por un sistema especular.

Se utilizó el programa computacional de traza de rayos Zemax, para encontrar la respuesta del sistema en varias configuraciones a varios ángulos de iluminación y se estimó la eficiencia de éste. El cálculo del área efectiva de colección ayudó a definir que el elemento que más contribución tenía a la colección de luz es el reflector difuso trasero en combinación con un reflector difuso primario a 90° , cuando éste tiene una altura de 9cm. Con este dato se estimó la eficiencia del sistema en varias configuraciones comparando la luz disponible en el área efectiva de colección con respecto a lo medido por el sensor en el área de colección. Se observa que cuando se tiene un reflector secundario a 40° de inclinación y 0 cm de separación respecto al reflector difuso primario es cuando se tiene la mayor eficiencia de colección de flujo radiante con alrededor del 7% . También se mostró que colocar más de un reflector difuso secundario tiene muy poca contribución a la colección de luz, sin embargo se expuso la escalabilidad del sistema si se separa por regiones

de colección, es decir, si se dispone de áreas de colección independientes por cada reflector difuso secundario, como se mostró en el apartado 3.6. Se muestra, que la mayor colección de luz se encuentra en la franja cercana a la unión del reflector difuso secundario y el primario ya que al acercarse el área de colección a 0 cm de distancia del reflector difuso trasero, con lo que, se alcanzó casi el 30% de eficiencia de colección de flujo radiante.

Se construyó un prototipo de colector de luz, que con el uso de piezas de cartoncillo pintado con una mezcla de pintura blanca y sulfato de bario, permitieron llegar al diseño de un modelo a escala que, en las pruebas experimentales realizadas, tuvo un mejor desempeño que un sistema formado por superficies especulares. La mezcla de pintura blanca vinílica comercial con sulfato de bario permitió mejorar la reflexión de luz incidente en alrededor del 10% comparado con la pintura vinílica comercial.

Se muestra que el prototipo formado por un reflector difuso trasero, un reflector difuso primario y un reflector difuso secundario, colocado este último a una distancia $d=3\text{cm}$ del reflector difuso primario y un ángulo de inclinación $\theta=30$ en condiciones de luz natural, muestra una mayor colección de flujo radiante que un sistema formado por elementos especulares con una mejora en promedio del 26.3% y teniendo el máximo de colección en un periodo de tiempo de hasta 83.7% más en la colección de flujo radiante; es decir, en un periodo de 6 horas (de 12 pm a 6 pm) en un día nublado.

En una segunda medición experimental, en condiciones de luz natural, el prototipo formado un reflector difuso trasero, un reflector difuso primario y un reflector difuso secundario colocado a una distancia $d=3\text{cm}$ y un ángulo de inclinación $\theta=40^\circ$ del reflector difuso primario tiene una mayor colección de flujo radiante al formado por elementos especulares, con un promedio del

70% por encima del sistema especular, este último, llegando a estar hasta el 90% de la luz colectada en un periodo de 6 horas (de 11 pm a 5 pm) en un día nublado. Estas mediciones muestran que es posible aumentar la colección de luz disminuyendo la respuesta direccional en días nublados de los sistemas usando reflectores difusos.

Los resultados obtenidos de manera numérica en el apartado 3.6.3 así como los obtenidos de manera experimental en los apartados 4.4.1 y 4.4.2 nos permite concluir que los sistemas formados por un reflector difuso trasero, un reflector difuso primario y un reflector difuso secundario con una inclinación de entre 30° y 45° con respecto del reflector difuso primario tiene una mayor colección de flujo radiante en condiciones de días nublados donde predominantemente la luz en el ambiente tiene poca direccionalidad.

El sistema propuesto en este trabajo, dado que es de fácil reproducción, es de bajo costo, no requiere de una planeación previa ni sería necesario hacer alteraciones importantes a la estructura de los edificios, constituye una opción viable para introducir luz disponible en las fachadas de edificios ya existentes. La posibilidad de escalabilidad de este sistema plantea la posibilidad de introducir luz a los edificios por la fachada exterior de cada piso y aprovechar así al máximo el espacio exterior de los edificios ya existentes y reducir el consumo de energías no renovables.

Trabajo a futuro

Se propone el uso de “manojos” de fibra óptica colocados en cada una de los segmentos de colección para introducir la luz colectada por el sistema a los edificios, ya que se ha demostrado, que estos elementos tienen una buena eficiencia de transporte de luz, además de que ya existen en el mercado opciones de bajo costo que podrían cumplir con las necesidades de este tipo de sistemas. Además de esta manera se podría medir el flujo radiante colectado por cada uno de los segmentos del sistema y estimar la eficiencia del sistema completo.

El cálculo del área efectiva de colección será de utilidad en futuras investigaciones ya que de esta manera se puede estimar las dimensiones de cada uno de los segmentos de colección y así lograr un sistema escalado con una mayor eficiencia.

Como se explicó en este trabajo, la luz colectada por este sistema tiene poca direccionalidad en cada una de las áreas de colección, debido a la forma de reflejar la luz de las superficies difusas. Es por esto que se puede prever la necesidad de una etapa de concentración posterior a la colección de luz. Se propone el uso de CPC (colectores parabólicos compuestos) o lentes de Fresnel para concentrar la luz y lograr introducirla al elemento de transporte de luz al interior de los edificios.

Referencias

- [1] L. Edwards, P. Torcellini. *A literature review of the effects of natural light on building occupants*. (2002). National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-550-30769.
- [2] S. K. Wittkopf, E. Yuniarti, L. Soon. *Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates*. *Energy and Buildings*. Vol. 38, Issue 9. 2006. P.P. 1120-1129.
- [3] G. Courret, J. L. Scartezzini, D. Francioli, J. J. Meyer. *Design and assessment of an anidolic light-duct*. *Energy and Buildings*. Vol. 28, Iss. 1. 1998. P.P. 79-99.
- [4] G. Pichardo. *Manejador de Datos Climáticos Diarios de México*.
<http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/mdcl/res2z.htm>. Programas de Cómputo Desarrollado 2010. Revisado Enero 2013.
- [5] H.D. Cheung, T. M. Chung. *Calculation of the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment*. *Architectural Science Review*. Vol. 48, Iss. 1. 2005.
- [6] N. Ruck et al. *Daylight in buildings. A source book on daylighting systems and components* (2002). International Energy Agency. LBNL—47493.
- [7] F. Linhart, S. K. Wittkopf, J.L. Scartezzini. *Performance of Anidolic Daylighting Systems in tropical climates – Parametric studies for identification of main influencing factors*. *Solar Energy*. Vol 84, Iss. 7. 2010. pp. 1085–1094.

- [8] F. Linhart ; S. K. Wittkopf ; M. Münch and J. L. Scartezini. *Recent research on anidolic daylighting systems: highly reflective coating materials and chronobiological properties*. SPIE Vol. 7423 74230K-2 2010.
- [9] I. Wong, H.L. Choi, H. Yang. *Simulation and experimental studies on natural lighting in enclosed lift lobbies of high-rise residential buildings by remote source solar lighting*. Applied Energy. Vol.92. 2012. pp. 705-713.
- [10] G. Courret, B. Paule, J.L. Scartezini. *Anidolic zenithal openings: Daylighting and shading*. Lighting Research and Technology. Vol. 28 no. 1. 1996. pp. 11-17
- [11] SolaTube international Inc. *Daylighting systems* Internet: <http://www.solatube.com/>. Enero 2013.
- [12] CIE S 010/E:2004. *The CIE System of Physical Photometry*. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna 2004.
- [13] Gieck K. *Manual de fórmulas técnicas*. 18a Edición. Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1981. T1-T2.
- [14] J. Walsh. *Photometry*. New York. Dover Publications. 1958. pp. 136-52.
- [15] C. M. Goral, K. E. Torrance. *Modeling the interaction of light between diffuse surfaces 1984*. Proceedings: Computer graphics and interactive techniques. ACM. New York. pp. 213-222.
- [16] A. E. Mills. *Heat Transfer*. New Jersey. Prentice Hall. 1999. pp. 538-591.
- [17] J. F. Blinn. *Models of light reflection for computer synthesized pictures*. Proceedings: Computer graphics and interactive techniques. ACM. New York. pp. 192-198.
- [18] K. E. Torrance, E. M. Sparrow. *Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*. 1967. JOSA. Vol. 57 Iss. 9. pp. 1105-1112.

- [19] L. Hisen-Che, E. J. Breneman. Modeling light reflection for computer color vision. 1990. IEEE. Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 12. Iss. 4.
- [20] F. Grum. *Optical radiation measurements*. New York. Academic Press. 1979. pp.37-101.
- [21] J. Walsh. *Photometry*. New York. Dover Publications. 1958. pp. 136-52.
- [22] Winston R., Miñano J. Benítez P. *Non-imaging optics*. University of California. Merced, California. 2005. pp. 43-67.
- [23] S. K. Wittkopf. *A method to construct virtual sky domes for use in standard CAD-based light simulation software*. Architectural Science Review, 47:3, 2004. 275-286.
- [24] CIE S 011/E:2003. *Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky*. Commission Internationale de l'Eclairage, Vienna, 2003.
- [25] N. Knighton, B. Bugbee. *Mixture of Barium sulfate and White Paint is a low-cost substitute reflectance standard for Spectralon®*. Utah State University. 2000.

Anexos

*CIICA 2013-SOMIXXVIII Congreso de Instrumentación
Sn. Francisco de Campeche, Campeche, México 28-31 de octubre, 2013*

Colección de luz solar indirecta para iluminación de interiores

Carlos García Cadena*, Celia Sánchez-Pérez, Augusto García-Valenzuela, Salvador Cuevas-Cardona

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, CCADET UNAM, Apartado postal 04510 México D.F.

*carlos.garcia@ccadet.unam.mx;

RESUMEN

Se presenta un método de colección pasivo de luz solar indirecta para la iluminación de interiores como solución a la poca disponibilidad de luz natural en edificios ya existentes en zonas con alta densidad de población. Se ha demostrado que aumentar el aprovechamiento de luz natural a lo largo del día tiene un impacto importante en el ahorro del consumo de energía eléctrica, además de mejorar el bienestar de los ocupantes de edificios no habitacionales. El sistema propuesto está basado en la colección de luz indirecta por reflectores difusos en contraste a los sistemas pasivos propuestos actualmente que tienen ángulo de aceptación intrínseco al sistema limitado y que reduce el tiempo y la efectividad de uso de éstos a sólo ciertas horas del día, dependiendo de las condiciones climáticas y los objetos que lo rodean. Analizamos la colección de luz de fachadas a través de la simulación del comportamiento del sistema en condiciones de días nublados. Presentamos los primeros resultados experimentales de un sistema de colección de bajo costo que puede ser instalado en edificios ya existentes.

PALABRAS CLAVE: colector solar pasivo; iluminación de interiores; luz indirecta; sistema anidólico; superficies reflectoras difusas.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de luz natural en interiores ha demostrado tener un impacto positivo en la productividad como en el bienestar de ocupantes de edificios no habitacionales, además de reducir el consumo de energía eléctrica [1], sin embargo la urbanización en ciudades con alta densidad de población, la latitud, las condiciones climáticas entre otros, son factores que disminuyen la disponibilidad de luz natural para iluminación de interiores [2].

Uno de los principales problemas que se observan al momento de captar luz proveniente de la bóveda celeste, así como de múltiples reflexiones en el entorno, es la direccionalidad de ésta. Esto significa que el movimiento de la tierra provoca que la luz natural sea cambiante y provenga de

distintas direcciones, lo cual se percibe al momento de intentar captar luz a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Es por esto que la eficiencia de colección de los sistemas pasivos; es decir que no incorporan rastreo de la trayectoria solar; de captación depende, por un lado, del ángulo de aceptación que tengan y, por otro, de la efectividad al dirigir los rayos de luz captados hacia un punto donde posteriormente puedan ser transportados hacia el interior de un recinto [3].

Este trabajo utiliza la *teoría de óptica no formadora de imagen* (sistemas anidólicos) que, básicamente, indica que existen ciertas aplicaciones que no requieren que la luz captada forme una imagen [4].

El uso de superficies difusoras como captadores de luz ha sido muy poco utilizado, por lo general se han propuesto sistemas anidólicos que utilizan reflectores especulares para capturar y dirigir la luz por un tubo de luz [2] o fibra óptica [5] hacia el interior de edificios. El proponer un sistema anidólico con reflectores difusos tiene la ventaja de incrementar el rango angular de captura de luz; así como el tener una buena eficiencia de colección durante más horas a lo largo del día.

Una superficie uniformemente difusora obedece la ley del coseno, enunciada por Lambert, donde el flujo luminoso aparente emitido por unidad de área es igual en todas direcciones [6]. Esto quiere decir que cada rayo incidente (sin importar el ángulo) en las superficies reflectoras dividirá su potencia en un número finito de rayos con intensidad igual en todas las direcciones, superficie Lambertiana, a diferencia de un reflector especular donde un rayo incidente refleja, idealmente, con la misma potencia en el mismo ángulo de incidencia. Debido a que un colector de luz busca concentrar la mayor cantidad de rayos de luz en un punto para distribuirlos nuevamente al interior de algún recinto, resulta importante considerar el ángulo con el que estos llegan a un sistema. Esto hace suponer que es posible ampliar el ángulo de aceptación de un sistema captador de luz usando reflectores difusos con el objetivo de encontrar un equilibrio entre la potencia de luz capturada y la cantidad de rayos concentrados.

El prototipo propuesto en este trabajo está formado, en su forma más sencilla, por un reflector difuso trasero (RDT) y un reflector difuso primario (RDP). Para encontrar un sistema que hiciera lo más eficientemente posible la colección de luz indirecta, se probaron distintas configuraciones al agregar reflectores difusos secundarios (RDS) y modificar la distancia entre ellos y la inclinación en relación con la zona de colección (ZC).

En este artículo se presentan resultados paramétricos así como pruebas de laboratorio bajo iluminación controlada y se comentan algunas mediciones en un escenario real en la fachada de los laboratorios del CCADET (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM) con un prototipo a escala de colector de luz indirecta. Además, se describe el proceso de simulación en el programa computacional Zemax de la respuesta del modelo en 3D a escala. Se muestran los resultados obtenidos en condiciones de luz controladas para verificar lo obtenido en las simulaciones numéricas. Igualmente, se presentan los resultados experimentales del prototipo a escala instalado en la fachada norte del CCADET.

2. Sistema colector difuso

En este trabajo se propone un prototipo de colector difuso de luz formado, en el caso más sencillo, por un reflector difuso trasero (RDT) y un reflector difuso primario (RDP). La luz capturada por

este sistema será recolectada en un área de colección (AC) situada en el centro del RDP. Los sistemas más complejos constarán de reflectores difusos secundarios (RDS) colocados a distintas distancias (d) del RDP y con ángulos de inclinación (θ) con respecto del RDP como se muestra en la Figura 1B.

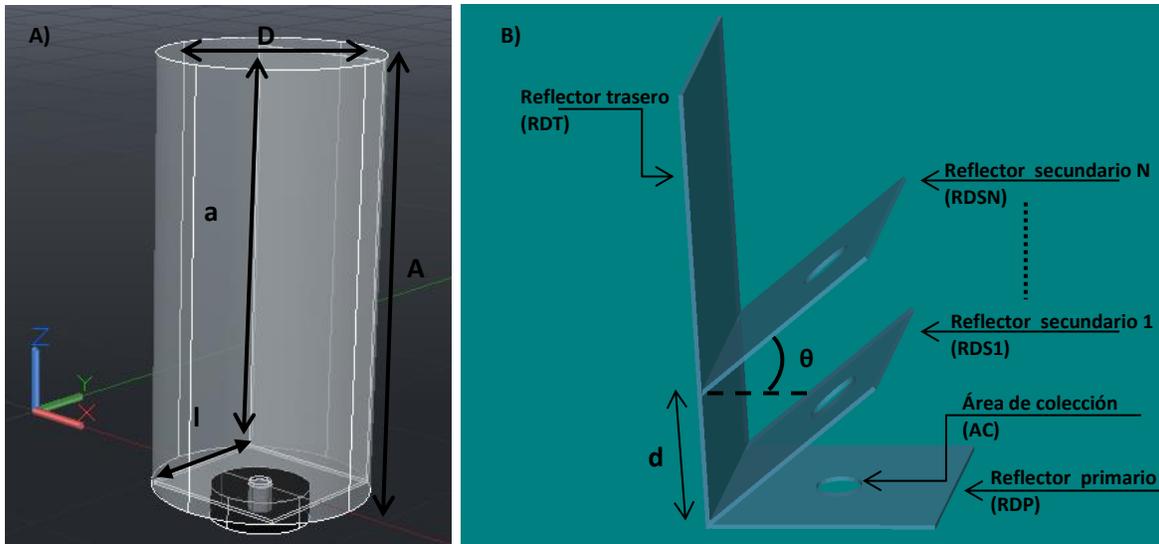


Figura 1. (A) Modelo a escala del prototipo de colección de luz solar de múltiples direcciones, diseñado en AutoCAD que muestra la proporción del sistema instalado en un tubo de acrílico. (B) Prototipo de sistema colector de luz importado a Zemax.

La figura 1A muestra el modelo en 3D del sistema que posteriormente fue creado para las pruebas experimentales con dimensiones $a=0.27\text{m}$, $l=0.1\text{m}$ instalados en un tubo de acrílico de dimensiones $A=0.35\text{m}$ y $D=0.15\text{m}$ (por simplicidad el efecto óptico causado por el tubo de acrílico no fue tomado en cuenta en las simulaciones ni en las pruebas experimentales).

La respuesta del sistema colector de luz, en sus distintas configuraciones, fue comparada en las simulaciones con un sistema referencia compuesto por un reflector especular trasero (RET) y un reflector especular primario (REP) de las mismas dimensiones que el sistema difuso.

3. Pruebas paramétricas

Las simulaciones descritas a continuación tienen como fin probar paramétricamente tanto la respuesta del sistema a distintos tipos de iluminación de forma controlada, como distintas configuraciones de manera que se logre encontrar el modo en el que el sistema funcione más eficientemente así como demostrar como los reflectores difusos tienen una respuesta más homogénea a los rayos incidentes sin importar el ángulo de procedencia. Esto, para posteriormente probar el funcionamiento de éstas con un prototipo real.

Basándose en los estándares del CIE (Comisión Internacional de la Iluminación por sus siglas en francés) se simulará con una fuente de iluminación formada por 5 “parches” de iluminación simulando luz proveniente de la bóveda celeste [7]. Debido a que son simulaciones preliminares, por simplicidad, se limitó a únicamente 5 parches de iluminación encendidos uno a la vez.

La simulación se llevó a cabo sometiendo cada configuración de sistema a una fuente de iluminación colocada en todos los casos a una distancia de 3 m con respecto al reflector trasero y

una posición angular distinta para cinco posiciones, como se muestra en la Figura 2. La configuración F1 corresponde a la fuente a un ángulo de $\alpha=90^\circ$ con respecto al RDP, F2 corresponde a la fuente situada a un ángulo de $\alpha=45^\circ$ con respecto del RDP, F3 corresponde a la fuente situada en un ángulo $\alpha= 0^\circ$ con respecto del RDP, F4 corresponde a la fuente situada a un ángulo $\gamma= 45^\circ$ del RDP y F5 corresponde a la fuente situada a un ángulo $\gamma= 90^\circ$ del RDP.

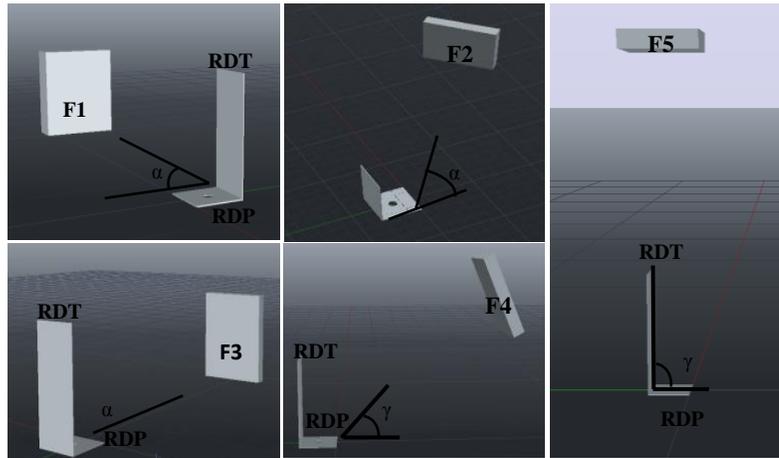


Figura 2. Representación esquemática de la posición de los "parches" utilizados como fuente de

Los parches de iluminación son recuadros de 1m por 1m con una distribución de rayos homogénea no colimada y potencia de 100 watts.

Se utilizaron las funciones de óptica no secuencial de Zemax para simular la respuesta del prototipo en distintas condiciones. Este software permite llevar a cabo el rastreo de rayos incidentes en una superficie así como reflexiones subsecuentes midiendo al final en un sensor colocado en el área de colección midiendo la potencia capturada por el sistema en varias configuraciones. Se diseñó el prototipo usando un software de modelado en 3D, posteriormente se importó a Zemax como un objeto "stl". Para caracterizar la respuesta del sistema se analiza la eficiencia de captación de un sistema básico con reflectores difusos con respecto a agregar un RDS con ángulos distintos. Los reflectores difusos tienen características de reflexión con dispersión lambertiana y coeficiente de reflexión de 0.85. Se compara la respuesta con un sistema de referencia básico (RET-REP).

La figura 3 muestra el resultado de la potencia colectada por el sistema para las distintas fuentes de iluminación F1 a F5 considerando un ángulo de inclinación θ de 0° , 20° , 30° , 40° y 50° con una separación entre colectores $d=3$ cm.

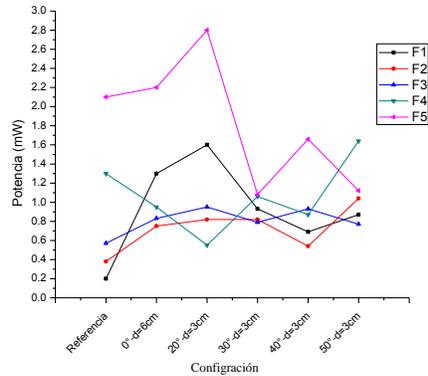


Figura 3. Respuesta del sistema a las diferentes fuentes de iluminación y $d=3$ cm.

Se observa en la figura anterior (Figura 3) la referencia, formada por elementos especulares, tiene una respuesta muy sensible al ángulo con el que se le ilumina, mientras que los sistemas formados por elementos difusores tienen menor sensibilidad al ángulo con el que son iluminados siendo el de mejor respuesta cuando $\theta=20^\circ$ y $d=3$ cm el cual capta en promedio 32% más de potencia óptica, mientras que la configuración $\theta=30^\circ$ y $d=3$ cm es la que varía menos con respecto a la fuente de iluminación que se podría traducir en la más uniforme a lo largo de un día.

En lo obtenido por las simulaciones destaca que luz proveniente del zenit favorece la captación de rayos así como trayectorias directas (sin muchos rebotes) por el sistema formado por elementos especulares; esto es debido a que la potencia reflejada por éstos no se divide en múltiples rayos, como sucede en el caso de superficies difusoras [6]. Sin embargo, lo que se busca en esta investigación es encontrar un método que amplíe las condiciones favorables para la colección de luz buscando un compromiso entre potencia y horas útiles de funcionamiento.

4. MEDICIONES EN LABORATORIO

Las primeras pruebas de laboratorio tienen como fin comprobar la respuesta del sistema haciendo incidir luz proveniente de múltiples reflexiones a distintas configuraciones, como se realizó en la sección anterior. La fuente de luz es un foco incandescente de 100 watts que apunta hacia una semi-esfera hueca recubierta con pintura esparcidora con el fin de alumbrar el sistema con una fuente difusa lo más uniforme posible. Esta fuente de luz se colocó a 2 metros de distancia del sistema y se realizó en condiciones controladas de iluminación.

El modelo digital del prototipo colector de luz, descrito en las secciones anteriores, se elaboró con piezas de cartoncillo pintado con una combinación de pintura Vinimex blanco 700 de Comex mezclado con sulfato de bario asemejando recubrimiento Spectralon [8]. El sistema fue introducido a un tubo de acrílico de 6plg de largo y 4plg de diámetro.

La figura 4 muestra la respuesta del sistema al probar distintas configuraciones donde se modificaron los parámetros d , θ , así como el número de reflectores secundarios. Además, se midió la potencia colectada así como la cantidad de rayos incidentes en AC.

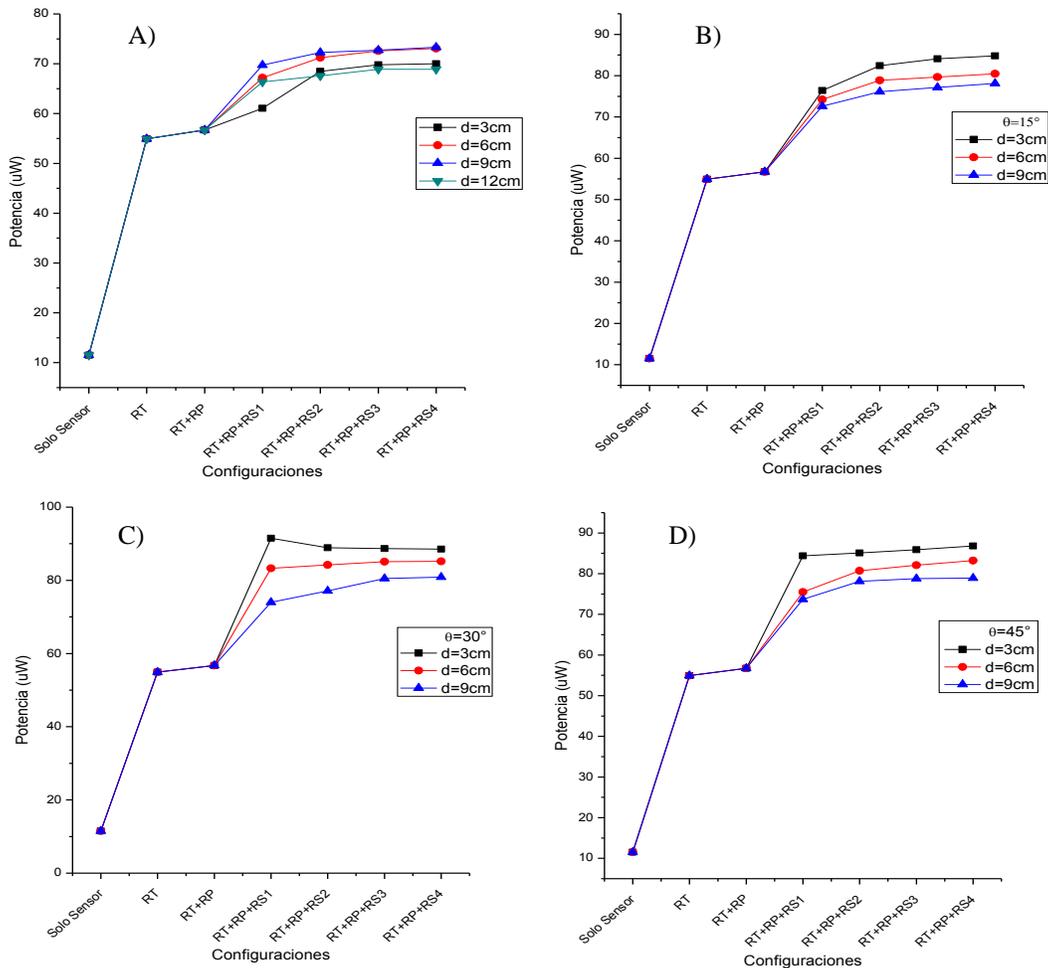


Figura 4. Respuesta del sistema en distintas configuraciones (A) Respuesta del sistema a la iluminación agregando superficies secundarias paralelas a la superficie primaria modificando d ; (B);(C);(D): Respuesta del sistema agregando superficies secundarias modificando d y θ entre cada elemento

Las mediciones en laboratorio mostraron que los elementos que más contribuyen a la colección de luz son: en primer lugar, la pared trasera que tiene una colección de cerca de 40mW; en segundo, el elemento que más contribución tiene es un primer reflector secundario siendo la configuración $\theta=30^\circ$ y $d=3$ cm de distancia la que logra hasta un 38% más de luz que el sistema básico RDT-RDP.

Otro punto importante del estudio de este tipo de sistemas es que se observa que para más de un RDS la contribución en potencia es casi despreciable, no así para la cantidad de rayos incidentes, como se muestra en la sección 2. Esto quiere decir que existe una gran cantidad de rayos dirigidos al área de colección pero con la potencia dividida por un número grande de reflexiones, según lo explicado en la sección 1; por lo que una mayor cantidad de rayos colectados no implican un aumento significativo de potencia.

Combinado con lo observado en la parte 2, se puede concluir que las configuraciones que mejor podrían funcionar en un escenario real son; cuando $\theta=20^\circ$ y $d=3$ cm y cuando $\theta=30^\circ$ y $d=3$ cm.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Lo obtenido en los puntos anteriores permitió diseñar un prototipo a escala que fue instalado en la fachada norte del CCADET-UNAM con coordenadas $19^{\circ}19'$ N, $99^{\circ}11'$ O. Las mediciones se llevaron a cabo midiendo la potencia óptica recuperada por el sistema. Se midió de manera continua la respuesta del sistema durante periodos de 6 horas. Debido a la naturaleza en los cambios (de dirección, de potencia y de distribución, entre otros) de la luz natural fue necesario tener una medición en paralelo que permitiera tener un punto de referencia con el cual poder comparar distintas configuraciones probadas, para lo que se usó un espejo de las mismas dimensiones que el reflector trasero del prototipo.

Una de las configuraciones que demostró ser más eficiente tanto en simulación como en las pruebas de laboratorio fue En la cual el sistema estaba conformado por la pared trasera, reflector primario y un reflector secundario con $d=3\text{cm}$ de la superficie primaria y $\theta=30$ grados de inclinación.

En la Figura 5 se observa el comportamiento del sistema a lo largo de 6 horas en un día nublado.

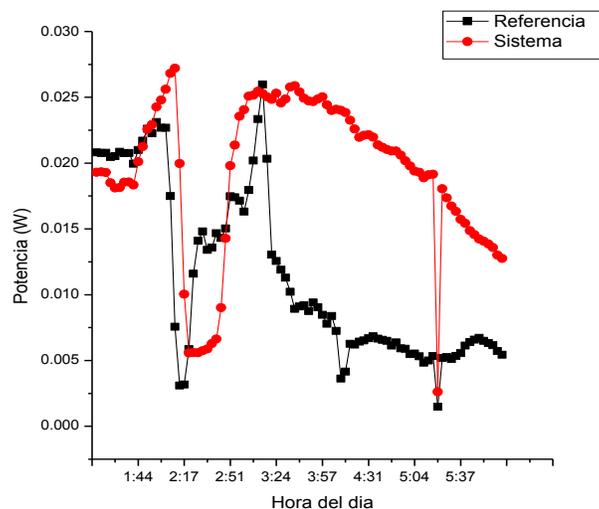


Figura 5. Respuesta del sistema colector de luz en condiciones reales instalado en la fachada del CCADET en un periodo de 6 horas
Sistema: RT+RP+RS1; $\theta=30^{\circ}$ $d=3\text{cm}$

En la gráfica anterior se observa cómo el sistema tiene en promedio una mejora en la captación de luz de 26.3% de potencia por encima de la referencia durante el periodo de medición. Estos resultados comprueban que el sistema es capaz de coleccionar una mayor cantidad de potencia que un sistema formado por elementos especulares en días nublados. También se observa que existieron casos donde la referencia colecciona una mayor cantidad de potencia; esto sólo confirma la naturaleza de los sistemas formados por elementos especulares donde la direccionalidad es un factor importante para el funcionamiento de éstos, ya que es probable que en el periodo de 14:15 hrs. a 15:30 hrs. el sistema referencia reflejara rayos directos de la bóveda celeste y los dirigiera directamente al sensor, aumentando en un periodo muy corto su eficiencia. Dado que la colección

de energía solar es proporcional al área de colección, se esperaría que aumentando el área de los colectores en el prototipo se colecte una mayor cantidad de potencia.

CONCLUSIONES

Se demuestra que el sistema pasivo RDT-RDP-RDS1 con $d=3\text{cm}$ y $\theta=30$ muestra un mejor desempeño que un sistema formado por elementos especulares con una mejora en promedio del 26.3% y teniendo un máximo en un periodo de tiempo de hasta 83.7% más en la colección de potencia óptica en un periodo de 6 horas (de 12 pm a 6 pm) en un día nublado y se demuestra, de igual manera, que es posible aumentar la colección de luz disminuyendo la respuesta direccional de los sistemas usando reflectores difusos.

Las simulaciones demuestran que es posible encontrar una configuración ideal para ciertos ángulos de iluminación, lo que podría ayudar en futuras investigaciones a encontrar un modelo que funcione con una mejor eficiencia para distintas latitudes.

A pesar que el sistema reduce el efecto de direccionalidad de la luz que se pretende colectar, se puede prever que la geometría del sistema es crucial para la eficiencia del sistema. Por lo tanto, se propone, para un futuro estudio, el uso de distintas geometrías de los reflectores con forma parabólica, por ejemplo y de esta manera poder dirigir la luz colectada a un punto específico.

Si bien las pruebas descritas en la sección 3 de este estudio muestran que agregar más de un reflector secundario tiene muy poca contribución a la colección de luz, es de suponer que es posible el escalamiento del sistema si se separa por regiones de colección, es decir, si se dispone de áreas de colección independientes por cada RDS y al final se acumula esta potencia en otro punto.

REFERENCIAS

- [1] R. P. Leslie. *Capturing the daylight dividend in buildings: why and how?*. Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, NY, USA. 2003.
- [2] Gilles Cow-ret, Jean-Louis Scartezzini, David Francioli b, Jean-Jacques Meyer. *Design and assessment of an anidolic light-duct*. Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Buintent. Lausanne Switzerland. 1992
- [3] Ruck N., Aschehoug Ø. Aydinli S. *Daylight in buildings*. International Energy Agency. Washington, D.C. 2009. [4] H. D. Cheung, T. M. Chung. *Calculation of the Vertical Daylight Factor on Window Façades in a Dense Urban Environment*. The Hong Kong Polytechnic University. Kowloon, Hong Kong, China. 2005.
- [4] Winston R., Miñano J. Benítez P. *Non-imaging optics*. University of California. Merced, California. 2005. pp. 43-67
- [5] Wong I. Simulation and experimental studies on natural lighting in enclosed lift lobbies of highrise residential buildings by remote source solar lighting. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong. 2011.
- [6] Walsh J. *Photometry*. New York. Dover Publications. 1958. pp. 136-52
- [7] Wittkopf S. *A method to construct Virtual Sky Domes for Use in Standard CAD-based Light Simulation Software*. National University of Singapore. Singapore. 2011
- [8] K. Nick, B. Bruce. *Mixture of Barium sulfate and White Paint is a low-cost substitute reflectance standard for Spectralon®*. Utah State University. 2000.

2013 ISES Solar World Congress

Indirect light collector for interior lighting

Carlos García Cadena^{2a}, Celia Sánchez-Pérez^a, Augusto García-Valenzuela^a,
Salvador Cuevas Cardona^b

^aCentro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-186,
04510 Mexico DF

^bInstituto de Astronomía UNAM, Apartado Postal 04510

Abstract

We propose a passive indirect light collector system for interior lighting with the use of diffuse reflectors. This system is based on the idea that diffuse reflectors may increase the acceptance angle of passive systems therefor improving the overall effectiveness and also achieving a better response to light directionality in certain hours of the day. We search the most efficient way to collect optical power by scaling the collection area with a multi-level configuration. We also analyse the light collection on buildings facades through the simulation of the behaviour of the system under cloudy day conditions showing these systems as a feasible and economic option for indirect and direct light collection for interior lighting, allowing a less invasive way to conduct light to interiors with acceptable efficiency and avoiding the use of heliostats or expensive coating materials.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Selection and/or peer-review under responsibility of ISES

"Keywords: Diffuse light; interior lighting; green solution; passive light collection; overcast light; anidolic system."

Introduction

The capacity of light collecting systems to introduce natural light to enclosed areas is limited by certain factors such as light availability, local climate factors as well as the system efficiency. Our research studied the effect of non-specular reflection of light by diffuse surfaces to extend anidolic (non-imaging) passive systems to improve its effective working time and increase its acceptance angle producing a more homogeneous response to light coming from different angles along a day.

The amount of light captured by anidolic systems depends on the total collecting area, meaning that the amount of light introduced to a precinct is directly proportional to the total collection area [1]. Due to the fact that these systems are designed to be installed on buildings facades, the area cannot be of unlimited dimensions. So it was thought that it was possible to increase the effective area by dividing the system in various vertical segments and adding up collected light per each segment.

Recently proposed studies have reported results of light collection systems which have a good performance of direct light collection, such as cylindrical collector systems. However the reported acceptance cone (around 27°) reduces the capacity of collection of diffuse light [2]. Other studies report overall efficiencies between 12% [3] and 32% [4] equally passive systems, however they make use of optical lenses or require high-cost reflective material such as optical grade aluminium and in all of the cases commented before, the systems are highly invasive and require planning before constructing a building.

In this paper we propose a prototype collector formed, in the basic case, of a diffuse rear reflector (RDR) and a primary diffuse reflector (PDR). Light captured by this system will be collected in a light collection area

* Carlos García. Tel.: +0052 55 56228602 ext 1243
E-mail address: carlos.garcia@ccadet.unam.mx

(LCA) located in the center of the PDR. More complex systems consist of secondary diffuse reflectors (SDR) positioned at different distances (d) to the PDR and tilt angles (θ) with respect to the PDR as shown in Figure 1. Also proposed in this work we analyze the possibility of the system scaling by adding more than one LCA in different distances with respect to the RDR (LDR).

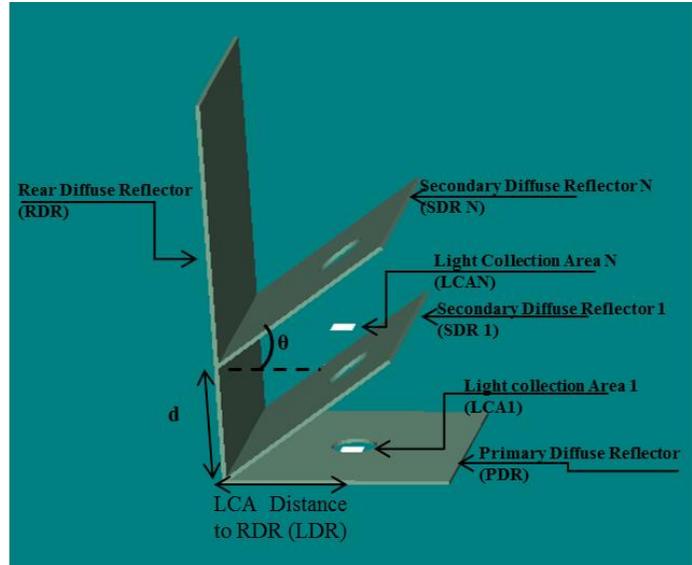


Fig. 1. Virtual model of the proposed system imported to Zemax.

We present in this paper the result of simulations performed in the ray tracing program Zemax showing the collected light efficiency of various proposed system configurations and modified systems (adding different LCAs and different LDR distances). Based on the efficiency graphs, we designed a scale prototype, and we tested it under real natural lighting on the exterior of our CCADETs laboratory and compared its behaviour with a reference system and discussed the results.

Numerical Simulation

Simulations described below were intended to analyse the efficiency of various configurations of the proposed system. To do so we compared the amount optical power of incident light rays in the RDR with the light captured by the system with various configurations.

We tested initially the basic configurations (modifying θ and d in the model showed in Fig1) and subsequently the scalability of the system in which we added several LCAs according to the number of RDSs in the system. Due to the fact that the proposed system is still a prototype and, also for simplicity, in the efficiency simulations we only used five points of lighting simultaneously lit, based on the construction of a virtual sky dome [5]. Based on the CIE (International Commission on Illumination, by its French acronym) standards, we used the light distribution for overcast sky [6], to illuminate the prototype with light coming from different directions.

These light source spots were placed in all cases at a distance of 3 m with respect to the PDR, with a different angular position in each case, as shown in Figure 2. F1 corresponds to the configuration where the source is at an angle $\alpha = 90^\circ$ to the PDR, F2 corresponds to the source at an angle $\alpha = 45^\circ$ with respect to the PDR, F3 corresponds to the source at an angle $\alpha = 0^\circ$ with respect to the PDR, F4 corresponds to the source at an angle $\beta = 45^\circ$ with respect to the PDR and F5 corresponds to the source at an angle $\beta = 90^\circ$ with respect to the PDR.

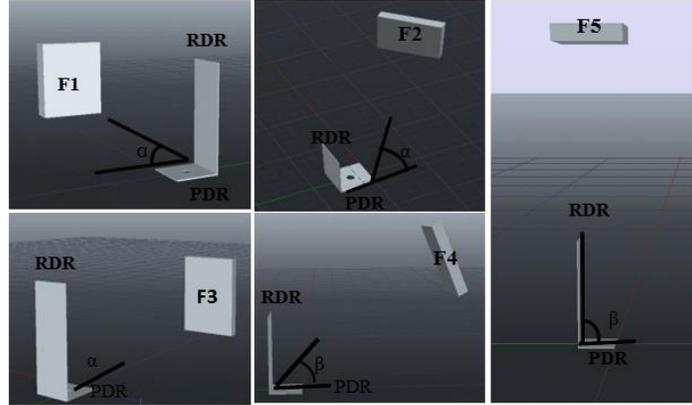


Fig. 2. Schematic representation of the light spots used for simulations.

Lighting source spots power was of 200Watts and an area of 1m^2 with non-collimated and homogeneous distribution of light rays for all simulations. We used computer Zemax software in its non-sequential mode to calculate the efficiency of the proposed systems. We calculated the efficiency by comparing the optical power measured by the incident rays in the RDR against light measured in the LCAs of the system in different configurations. We tested a wide range of configurations modifying angle θ from 0° to 50° with a 10° steps, and different distance d from 0cm to 12cm with a 3 cm step. The configuration that showed the best response was the one where $\theta=40^\circ$ and $d=0\text{cm}$ with an efficiency of 6.84%.

Following simulations consisted of the system that showed better efficiency described before but we also added three SDR; SDR1 was placed at $d=0\text{ cm}$ and $\theta=40^\circ$; SDR2 was placed at $d=20\text{ cm}$ and $\theta=40^\circ$; SDR3 at $d=40\text{cm}$ and $\theta=40^\circ$ as shown in Fig.3.

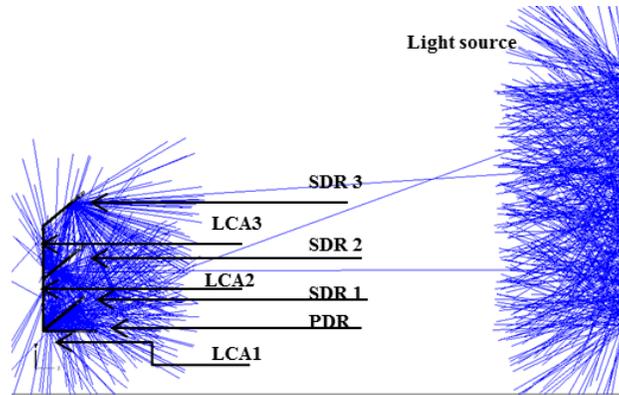


Fig. 3. Graphic representation of escalated system, showing the distribution of the added elements.

As mentioned before we also simulated the position of the LCA in 3 LDR distances; 0m, 0.05m and 0.1m to the RDR. The Table 2 shows the result of simulating the response of the system to modification of LDR distances.

Table 2. Efficiency of escalated system with different LDR distances

LDR Distance (cm)	Efficiency (%)
10	16.47
5	19.13
0	28.94

Simulations showed that efficiency improved when LCAs were nearest to the RDS. The system coupled efficiency with 2 extra collection areas reaches up to 28.9% thus having 76% of improvement of the system proposed initially.

When we examined the detectors placed on each of the LCAs of the escalated system, each detector had similar amount of total power collected; LCA1 captured 18.99mW, LCA2 captured 26.4mW and LCA3 captured 26.97mW as shown in Fig. 4.

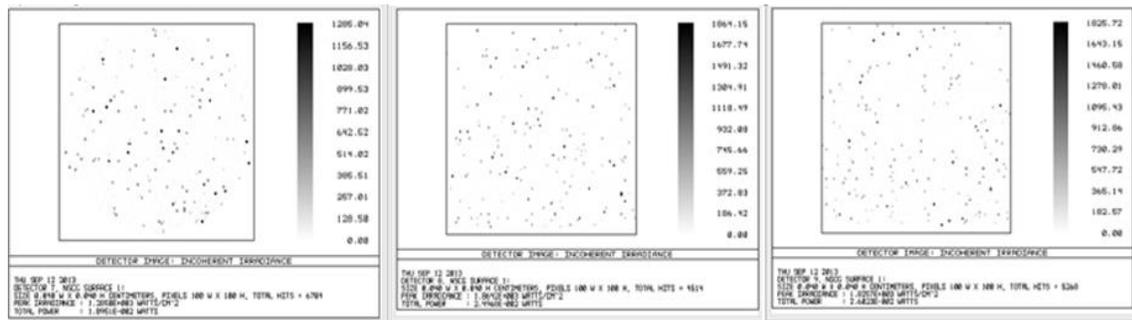


Fig. 4. Detector viewer for each of the LCAs of escalated system.

We can assume that it is possible to add N number of SDR and each will sum up to the total light power collected by the entire system with a homogenous response.

Prototype design

The simulations described in the previous section allowed us to design a prototype for indirect light collection formed by a RDR, a PDR and a SDR located at a distance d of 0cm from the RDR and an θ angle of 40° being the configuration shown in the simulations to have the best efficiency. The light reflections obtained from the system mentioned above is collected in the LCA located in the centre of the RDP where an integrating sphere was placed to measure the optical power.

Fig. 5 shows a 3D model system representation with dimensions of a of 0.27m, l of 0.1m, installed in an acrylic tube of dimensions A of 0.35m and D of 0.15m (for simplicity the optical effect caused by the acrylic tube was not taken into account in the experimental tests).

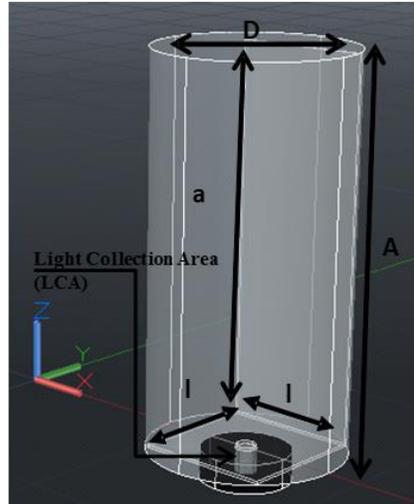


Fig. 5. 3D model of the basic indirect light collector designed in a CAD based software, showing proportions and positions of each part of the system.

One of the settings that showed significantly increase in the light collection efficiency simulations was to add a second and third SDR plus ad well as LCAs and also placing the LCA near the RDR. The design of this prototype impeded the measurement of the effect of scaling the system due to the size of the used integrating spheres. A way to solve this problem is discussed in the next section for future work.

The prototype described previously, was made with pieces of cardboard painted with a white Vinimex Comex 700 paint mixed with barium sulphate, resembling Spectralon [7].

Experimental results

A prototype with the specifications described before was installed in the north-oriented facade of CCADET-UNAM laboratory whose coordinates are $19^{\circ} 19' N$, $99^{\circ} 11' W$. The measurements were carried out by measuring the optical power recovered by the system during a six-hour period, in an overcast condition day. Fig. 6A shows the experimental setting of the system, which was placed in a 0.65m long by 0.15m wide wood piece outside of the north-oriented laboratory facade. Fig. 6B shows the experimental setting in its basic configuration.

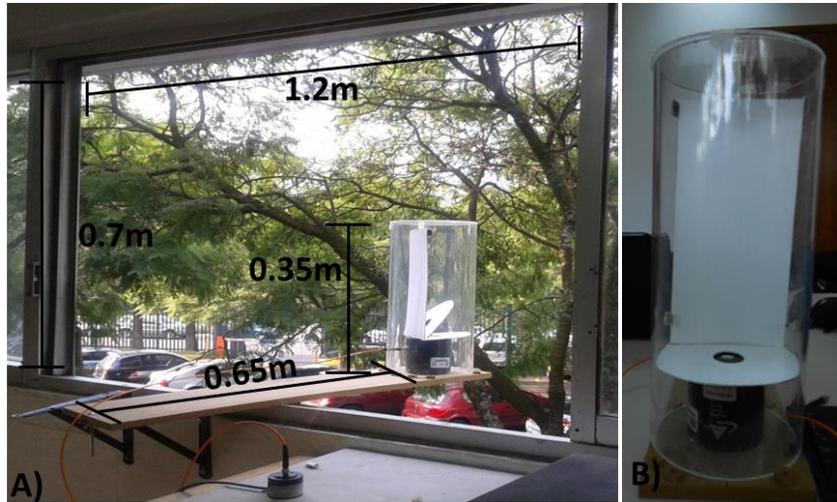


Fig. 6. Experimental setting of the system: A) RDR-PDR-SDR placed on the laboratory window; B) basic system configuration in controlled illumination testing.

The system configuration used was the one that proved to be the most efficient (when angle θ is 40° and distance d is 0cm for the SDR1). Due to the nature of natural light, it was necessary to have a parallel measurement as a reference for further analysis. This reference was a common mirror of the same area as the RDR placed in the same way as the diffuse reflective system.

Fig. 6 shows the system response to a six-hour period of measurement (11am to 5pm) on a cloudy day compared to the reference.

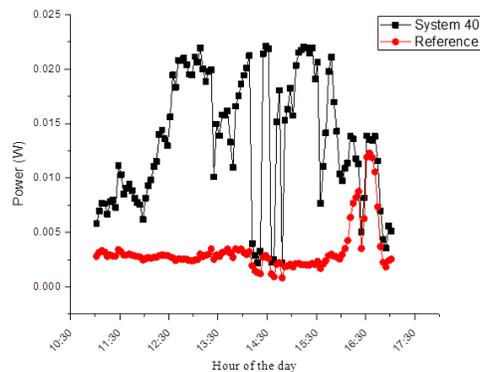


Fig. 7. System response to natural light in an overcast day conditions on the 29th of May 2013.

As it can be observed the system was superior at all times with an average response of over 70% more light captured by the reference, with peaks reaching 90% above the reference and at times only 9% above the reference.

Future study of this system will include re-directing the collected light at several LCAs with the use of optical fiber bundles, which has shown to have a good transmitting efficiency. In this way it will also be possible to measure the overall system efficiency as well of each independent element. This will permit a complete analysis of the amount of natural light collected and redistributed to a building's interior.

Conclusions

The proposed system result in a feasible solution for a passive low-cost indirect light collector, since it has shown an acceptable improvement in the collection of light compared to the basic prototypes, achieving up to 28.94% of light collection efficiency with the possibility of further improvement.

The use of the ray tracing program Zemax permitted an accurate measurement of different lighting effects of the elements used for this work and will also permit the study of different optic elements for future work such as optic fiber for collected light transport to the interior of a room and also the use of concentrator elements such as compound parabolic collectors.

This system consists of pieces of cardboard covered with a mixture of cheap paint and barium sulphate achieving a high reflection coefficient, resulting in an easy-reproducible system. This system could also take up little space in existing buildings and take advantage of the available light in the facades of the buildings regardless of the orientation where it is installed.

Another advantage of this type of system is that is minimally invasive in existing buildings and don't require previous planning since the strategy to follow is to transport collected light with the use of optic fiber bundles.

According to the simulations, we achieved a scalable system based on the increase of collection area to meet the CIE standards regarding to the minimum light required for non-residential buildings as well as visual comfort [8].

These types of systems have a more homogeneous response regardless of incoming light direction. Therefore they can increase the effective working period throughout the day compared to other reported systems.

Reflectors geometry is still to be modified to see if there is a possibility to improve efficiency by focusing collected light in the LCA with the use of parabolic reflectors.

Future studies include the use of light concentrators, and optic fiber to measure efficiency per each element to prove experimentally the scalability of the system and also for collected light transport; this will also include the study of the contribution of the light collected to an interior room in terms of photometric parameters.

References

- [1] Winston R., Miñano J. Benítez P. *Non-imaging optics*. University of California. Merced, California. 2005. 43-67.
- [2] Swift P.D. Smith G.B. *Cylindrical mirror light pipes*. Solar Energy. Materials and Solar Cells. Volume 36, Issue 2. 1995. 159-168.
- [3] Wong I., Choi H., Yang H. *Simulation and experimental studies on natural lighting in enclosed lift lobbies of high-rise residential buildings by remote source solar lighting*. Applied Energy, Volume 92, 2012. 705-713.
- [4] Linhart F., Wittkopf S., Scartezzini J.L. *Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates – parametric studies for identification of main influencing factors*. Solar Energy, Volume 84, Issue 7, 2010. pp. 1085-1094.
- [5] Wittkopf S. *A method to construct virtual sky domes for use in standard CAD-based light simulation software*. Architectural Science Review, 47:3, 2004. 275-286.
- [6] CIE S 011/E. *Spatial Distribution of Daylight – CIE general sky standard defining luminance distributions*. Commission International de l'Eclairage, Vienna, 2003.
- [7] Knighton N., Bugbee B. *Mixture of Barium sulfate and White Paint is a low-cost substitute reflectance standard for Spectralon®*. Utah State University. 2000.
- [8] CIE 055. *Discomfort Glare in the Interior Working Environment*. Commission Internationale de l'Eclairage. Paris. 1983.