



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COLECCIÓN DE LUZ DIFUSA PARA ILUMINACIÓN  
DE INTERIORES**

**T E S I S**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

P R E S E N T A:

**MARIO ANTONIO TOVAR ROSAS**



**TUTORA: DRA. CELIA SÁNCHEZ PÉREZ**

**Ciudad Universitaria, México, D.F.**

**Marzo 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

# Agradecimientos.

---

Quiero darle en primer lugar un especial agradecimiento a la UNAM, que si bien tiene políticas a las que me opongo rotundamente, estoy orgulloso de tenerla como alma máter. Agradezco a todos los mexicanos y mexicanas que gracias a sus impuestos he logrado concluir mis estudios universitarios.

Le agradezco con todo mi corazón a mi familia por su apoyo incondicional: a mi mamá, a mi hermana, a mis tíos y tías, a mis abuelos y a mi perro Vodka; pero especialmente a mi papá, M.I Eduardo Antonio Tovar González, a él le dedico este trabajo, descanse en paz.

También quiero hacer un agradecimiento al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) y a todo el grupo del Laboratorio de Sensores Ópticos y Eléctricos. Lugar donde se elaboró esta tesis.

A la doctora Celia Sánchez, por ser una de las mejores tutoras que he tenido en mi vida, a M.I. Carlos A. García Cadena, por su paciencia y colaboración en este proyecto.

Finalmente quiero agradecerles a todos mis amigos y amigas, a todos mis profesores a lo largo de todos estos años, al Grupo de Acción Revolucionaria, a la Facultad de Ingeniería y especialmente al Departamento de Telecomunicaciones.

Vivimos una época de crisis no sólo económica, también ya vemos directamente reflejada una crisis ambiental que produce nuestro estilo de vida. Tengo mucha fe en que el futuro tecnológico sea encaminado al aprovechamiento de energías renovables.

# Contenido.

---

Agradecimientos.....	i
Índice.....	iii
Resumen.....	v
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Lista de acrónimos .....	xv

---

# Índice.

---

## Capítulo 1.

<b>1 Introducción</b> .....	1
1.1 Sistemas de captación de luz solar para iluminación de interiores.....	3
1.1.1 Sistemas activos.....	3
1.1.2 Sistemas pasivos.....	6
1.2 Motivación.....	8
1.3 Hipótesis.....	9
1.4 Objetivos.....	10

## Capítulo 2

<b>2 Antecedentes</b> .....	11
2.1 Óptica anidólica.....	11
2.2 Fuentes naturales de iluminación.....	12
2.3 Reflexión difusa y especular.....	13
2.4 Lentes de fresnel.....	13
2.5 Conceptos de fotometría.....	15
2.6 Superficies lambertianas.....	16
2.7 Transferencia de flujo entre dos superficies.....	18

## Capítulo 3

<b>3 Diseño del sistema de colección de luz solar indirecta</b> .....	23
3.1 Introducción.....	23
3.2 Diseño.....	24
3.3 Resultados de las simulaciones numéricas utilizando ZEMAX.....	26

## **Capítulo 4**

<b>4 Caracterización del prototipo en laboratorio</b> .....	29
4.1 Colección de flujo lumínico en condiciones de luz no direccional.....	34
4.2 Transporte de flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta.....	37
4.2.1 Estimación de pérdidas en el transporte de luz.....	38

## **Capítulo 5**

<b>5 Caracterización del prototipo en condiciones de luz natural</b> .....	42
5.1 Resultados obtenidos de las mediciones con el sistema de colección de luz indirecta y varios sistemas de referencia.....	45
5.2 Resultados obtenidos de las mediciones con fibra óptica y el sistema de colección de luz indirecta.....	52
<b>Conclusiones</b> .....	62
<b>Perspectivas</b> .....	64
<b>Referencias</b> .....	65

---

# Resumen.

---

Uno de los retos más grandes hoy en día, es reducir el uso de energías no renovables, para poder ver directamente disminuidas su repercusión en el medio ambiente. Muchas de las nuevas tecnologías van enfocadas al uso de fuentes renovables de energía y libres de contaminantes.

Una de estas fuentes renovables es la energía proveniente del Sol, actualmente existen muchas formas de aprovechar esta energía, una forma desde hace miles de años, es utilizar directamente la luz solar para iluminar interiores. Muchas empresas han incluido sistemas de colección de luz solar para iluminación de interiores, no sólo porque se disminuyen los costos en el consumo de energía eléctrica, sino porque también el uso de luz natural para iluminar el interior de un recinto, tiene repercusiones benéficas para la salud de los ocupantes [1].

Aprovechar las fuentes de energías renovables, específicamente la luz solar, ha tenido un gran auge en la última década. Sin embargo las investigaciones y la industria se han enfocado en aprovechar la luz directa del Sol (por ser la de mayor intensidad luminosa). Existen muy pocos estudios sobre sistemas de colección de luz solar no direccional o estudios del aprovechamiento de luz difusa. Este tipo de iluminación está presente en días nublados, donde la mayoría de los sistemas que usan luz direccional, reportan una baja eficiencia [2].

Actualmente existe una amplia variedad de sistemas para la colección de luz solar con el fin de iluminar interiores. Básicamente podemos diferenciar dos tipos de sistemas: activos y pasivos.

Los sistemas activos trabajan con luz directa y necesitan para su correcto funcionamiento un sistema de seguimiento del Sol, este sistema de seguimiento aumenta bastante el precio total del sistema. Por ejemplo el sistema SP3 de la empresa *Parans*, hecho en Suiza, ha ganado varios premios alrededor del mundo. Pero es de los más caros en el mercado [3].

En cuanto a los sistemas pasivos, los cuales no cuentan con un sistema de seguimiento del Sol, su principal desventaja es que la mayoría de ellos requieren una planeación previa a la construcción de los edificios, o requieren de modificaciones importantes a la estructura de éstos. Por lo que se encarece el precio, o bien, imposibilita la instalación del sistema.

Al analizar todos los tipos de sistemas de iluminación solar que existen, surge la necesidad de un sistema económico, sencillo, fácil de instalar y lo más importante, que funcione bajo condiciones de iluminación natural de forma pasiva; ya que en la mayoría de los sistemas actuales que usan la luz directa del Sol, su eficiencia se reduce considerablemente bajo condiciones de cielo nublado, por ejemplo [2].

Esta tesis explora superficies difusas, su desempeño frente a superficies especulares, y el diseño de un sistema de colección de luz indirecta basado en superficies reflectoras difusas, las cuales demostraron ser muy eficientes para condiciones de luz no direccional, como las que se tienen en la fachada del edificio del laboratorio de sensores ópticos y eléctricos del CCADET, lugar donde se realizó este trabajo.

Para el diseño del sistema, además del uso de superficies reflectoras difusas, se exploraron varias configuraciones de éstas y se agregó una lente de fresnel para ayudar a concentrar los rayos provenientes de diferentes direcciones. También se incorporó la parte de transporte, fabricando manojos de fibra óptica, con hilos de fibra plástica de 2 mm de núcleo. Se eligió fibra óptica por su facilidad de instalación y bajo costo. Estos manojos de fibra, también llamados *bundles* de fibra óptica (FO), fueron de gran ayuda para poder llevar la luz desde el sistema hasta los instrumentos de medición. De esta manera se pudieron realizar diferentes pruebas para ver el desempeño de un sistema de colección con superficies reflectoras difusas y una lente de fresnel, frente a varios sistemas de referencia.

Esta tesis se conforma por cinco capítulos:

El Capítulo I aborda diferentes tipos de sistemas de iluminación solar que existen actualmente, con base en algunas necesidades que no cubren estos sistemas y a los pocos trabajos publicados sobre captación de luz indirecta, surge la motivación de estudiar las superficies difusas para el diseño de un sistema de colección de luz solar para iluminación de interiores.

El Capítulo II trata principalmente de algunos de los conceptos básicos que se manejarán a lo largo de este trabajo. También se propone un modelo matemático para la transferencia de flujo radiante, como modelo para analizar la colección de luz.

En el Capítulo III se aborda la parte del diseño del sistema propuesto, se hace un estudio basado en simulaciones por computadora con el software de traza de rayos ZEMAX, se encuentra un ángulo óptimo entre dos superficies difusas para la colección máxima de flujo lumínico y se analiza la zona donde ocurre esta máxima colección.

El Capítulo IV incluye los resultados que se obtuvieron al caracterizar el sistema dentro del laboratorio. Se presenta un sistema basado en superficies difusas y una lente de fresnel para la colección de luz indirecta. También se incluye la parte de transporte de luz en el sistema.

El Capítulo V incluye los resultados que se obtuvieron al caracterizar el sistema propuesto en condiciones de luz natural.

Finalmente se abordan las conclusiones que arrojaron los resultados de las simulaciones por computadora, los experimentos hechos en el cuarto oscuro, y los experimentos realizados con luz natural.

También se incluye un apartado que aborda las perspectivas sobre el trabajo futuro en este proyecto. En estas perspectivas se propone continuar con el estudio en la parte del transporte de luz, para encontrar nuevas técnicas, métodos y materiales para reducir las pérdidas. De igual manera se propone el estudio de

difusores (botellas con agua clorada por ejemplo) para poder finalmente esparcir la luz transportada e iluminar el interior de un recinto.



# Índice de Tablas.

---

<b>Tabla 3.1</b> Flujo lumínico colectado al variar el ángulo ( $\theta$ ) entre superficies difusas.....	26
<b>Tabla 4.1</b> Resultados experimentales de reflectividad con diferentes superficies.....	31
<b>Tabla 4.2</b> Resultados de las pruebas experimentales de colección máxima con diferente ángulo entre los colectores.....	34
<b>Tabla 4.3</b> Resultados de las pruebas experimentales de pérdidas realizadas en los bundles de fibra óptica.....	40

# Índice de Figuras.

---

<b>Figura 1.1.</b> Sombras de edificios para distintas horas del día [1].....	2
<b>Figura 1.2.</b> Sistema de iluminación solar SP3 de la empresa suiza Parans [3].....	4
<b>Figura 1.3.</b> Elementos principales del sistema de iluminación solar de fuente remota [2].....	5
<b>Figura 1.4.</b> Tragaluz de la empresa Solar Tube, sistema pasivo de iluminación solar [5].....	6
<b>Figura 1.5.</b> Representación esquemática de un sistema anidólico y sus elementos principales [6].....	7
<b>Figura 2.1.</b> Figura 2.1. a) Simulación de una superficie homogéneamente difusa reflejando un rayo de luz incidente en múltiples rayos con múltiples ángulos. b) Simulación de una superficie especular reflejando un rayo de luz incidente [10].....	13
<b>Figura 2.2.</b> Corte transversal de una lente de fresnel.....	14
<b>Figura 2.3.</b> Corte transversal de dos lentes de potencia equivalente: 1. de fresnel, 2. plano-convexa tradicional.....	14
<b>Figura 2.4.</b> Geometría de la radiación reflejada a) por una superficie y b) por una superficie difusa Lambertiana [10].....	17
<b>Figura 2.5.</b> Geometría del cálculo del factor forma [10].....	18
<b>Figura 2.6.</b> 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 $j$ [10].....	20
<b>Figura 3.1.</b> Esquema de los elementos para la simluación en ZEMAX del ángulo $\theta$ entre superficies difusas.....	24

<b>Figura 3.2.</b> Ubicación de los sensores en el sistema de reflectores RT y RP.....	25
<b>Figura 3.3.</b> Esquema de los elementos en ZEMAX para encontrar la zona de mayor colección de flujo lumínico en las superficies difusas a 30°.....	25
<b>Figura 3.4.</b> Potencia incidente en el Detector 1.....	27
<b>Figura 3.5.</b> Potencia incidente en el Detector 2.....	27
<b>Figura 4.1.</b> Montaje de medición de flujo lumínico reflejado.....	30
<b>Figura 4.2.</b> Esquema de los reflectores difusos para la colección de luz.....	31
<b>Figura 4.3.</b> Esquema del prototipo de caracterización en el cuarto oscuro.....	32
<b>Figura 4.4.</b> Bóveda utilizada como reflector difuso en el cuarto oscuro.....	33
<b>Figura 4.5.</b> Puntos de medición de la iluminación de la fuente de luz no direccional en la zona del reflector (RT).....	33
<b>Figura 4.6.</b> Prototipo del sistema de colección de luz indirecta con lente de fresnel doblada.....	35
<b>Figura 4.7.</b> Comparación del efecto de la lente de fresnel en el RT y RP. Vista frontal.....	36
<b>Figura 4.8.</b> Efecto de iluminación en el prototipo del sistema de colección de luz indirecta con la lente de fresnel doblada.....	36
<b>Figura 4.9.</b> Bundle 1 (B1) y Bundle 2 (B2) de F.O. Vista de un extremo.....	38
<b>Figura 4.10.</b> Esquema de las diferentes pruebas realizadas a los bundles de F.O.....	39
<b>Figura 4.11.</b> Montaje de laboratorio para la prueba de pérdidas en el bundle de F.O.....	39
<b>Figura 5.1.a</b> Esquema del montaje de los elementos empleados en las pruebas en condiciones de luz natural.....	42

<b>Figura 5.1.b.</b> Montaje real de los elementos empleados en las pruebas de medición en condiciones de luz natural.....	43
<b>Figura 5.2.</b> Esquema del montaje de los sensores.....	44
<b>Figura 5.3.</b> Condiciones de luz indirecta en la fachada del CCADET.....	44
<b>Figura 5.4.</b> Vista de un día nublado desde la ventana del laboratorio de sensores ópticos y eléctricos del CCADET.....	45
<b>Figura 5.5.</b> Gráfica del flujo lumínico del sistema de colección de luz indirecta (puntos) y un luxómetro 2 como referencia (cruces). Las condiciones de iluminación natural las dio un cielo parcialmente nublado.....	46
<b>Figura 5.6.</b> Gráfica del flujo lumínico colectado el sistema de colección de luz indirecta con el factor de corrección de áreas y el luxómetro 2 como referencia.....	47
<b>Figura 5.7.</b> Gráfica de la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de colección de luz indirecta y el luxómetro como referencia.....	48
<b>Figura 5.8.</b> Gráfica de la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de colección de luz indirecta y el luxómetro como referencia, mostrado en porcentaje.....	48
<b>Figura 5.9.</b> Sistema de colección de luz indirecta y sistema especular.....	50
<b>Figura 5.10.</b> Gráfica del flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta (puntos) y el flujo colectado en un sistema especular como referencia (cuadros). Las condiciones de iluminación natural, las dio un cielo parcialmente nublado.....	50
<b>Figura 5.11.</b> Gráfica de la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado en un sistema especular usado como referencia.....	51

<b>Figura 5.12.</b> Gráfica de la razón de diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y un sistema especular como referencia.....	52
<b>Figura 5.13.</b> Sistema de colección de luz indirecta y bundle de fibra óptica B2 a 0° .....	53
<b>Figura 5.14.</b> Gráfica del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta (puntos) y en el B2 a 0° usado como referencia (cruces). Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.....	53
<b>Figura 5.15.</b> Gráfica de la diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.....	54
<b>Figura 5.16.</b> Gráfica de la razón de diferencia entre flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.....	55
<b>Figura 5.17.</b> Sistema de colección de luz indirecta y bundle de fibra óptica B2 a 30° .....	56
<b>Figura 5.18.</b> Gráfica del flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta (cruces) y B2 como referencia a 30° (puntos). Las condiciones de iluminación natural las dio un cielo soleado.....	56
<b>Figura 5.19.</b> Gráfica de la diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.....	57
<b>Figura 5.20.</b> Gráfica de la razón de diferencia entre flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 30° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.....	58
<b>Figura 5.21.</b> Sistemas de colección de luz indirecta, uno a 30° y otro a 40° .....	59

**Figura 5.22.** Gráfica del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta a 30° (cruces) y un sistema de colección de luz indirecta a 40° (triángulos). Condiciones de iluminación natural dadas por un cielo completamente nublado.....59

**Figura 5.23.** Gráfica de la suma del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta a 30° y en el sistema de colección de luz indirecta a 40° .....60

# Lista de acrónimos.

---

A	Área.
AC	Área de colección.
AEC1	Área efectiva de colección 1.
AEC2	Área efectiva de colección 2.
B1	Bundle de fibra óptica 1.
B2	Bundle de fibra óptica 2.
B_RT	Base del reflector trasero.
B_RP	Base del reflector primario.
CAD	Diseño asistido por computadora.
cd	Candela.
CIE	Commission Internationale de L'Eclairage.
D1	Distancia del sistema a la bóveda reflectora.
D2	Distancia del foco de filamento a la bóveda reflectora.
D_BV	Diámetro de la bóveda reflectora.
D_B	Diámetro del bundle 1 y 2 de fibra óptica.
D_S	Diámetro del sensor del luxómetro.
DI_RP	Diámetro interno del reflector primario.
F	Factor entre el bundle 1 y el bundle 2 de fibra óptica.
$F_r$	Flujo lumínico de referencia.
$F_c$	Flujo lumínico colectado.

$F_{C_{ref}}$	Flujo lumínico colectado en el sistema de referencia.
$F_{C_{dif}}$	Flujo lumínico colectado en el sistema propuesto.
$F_{fb}$	Flujo lumínico al final del bundle 1 o el bundle 2 de fibra óptica.
$F_{ref}$	Flujo lumínico reflejado.
FO	Fibra óptica.
I	Irradiancia.
$I_r$	Radiancia.
$I_{rd}$	Radiancia difusa.
$I_v$	Intensidad luminosa.
L	Pérdidas en el bundle 1 o en el bundle 2 de fibra óptica.
LCP	Láser Cut Panel.
LITD	Light Interface Transfer Device.
lm	Lúmenes.
lx	Luxes.
m	Metros.
mW	Miliwats.
nm	Nanómetros.
nW	Nanowats.
P	Flujo lumínico.
P_B	Profundidad de la bóveda reflectora.

RP	Reflector difuso primario.
RT	Reflector difuso trasero.
sr	Esterradián.
W	Watts.
$\Theta$	Ángulo entre el reflector trasero y el reflector primario.
$\phi$	Ángulo formado por la dirección del observador y la normal de una superficie lambertiana iluminada.
$\Delta F_c$	Diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y en un sistema de referencia. Esta diferencia está dada en unidades de flujo lumínico (lx).
$\delta F_c$	Razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y en un sistema de referencia. Esta razón está dada en porcentaje

# Capítulo 1.

## 1 Introducción.

El uso de luz natural en el interior de edificios no habitacionales, tiene grandes beneficios para el bienestar de sus ocupantes. La luz natural permite una discriminación e interpretación del color excelentes con el ojo humano, lo que significa que este tipo de luz da las condiciones perfectas para una buena visibilidad. Algunos estudios en edificios no habitacionales, iluminados con luz natural, muestran que el ser humano al estar en contacto con este tipo de luz, tiene un efecto psicológico positivo, ya que al tener buenas condiciones de iluminación en el área de trabajo y en el espacio total donde se desenvuelven los ocupantes, se crea una atmósfera con sensación de bienestar. Esto da como resultado un aumento en la productividad, se mejora el humor de los ocupantes, se reduce el estrés y la tensión ocular [1].

Por otra parte el uso de sistemas de aprovechamiento de luz natural para iluminar interiores ha logrado reducir el consumo de energía eléctrica utilizada en edificios no habitacionales, estos proyectos muestran una reducción de gastos importante, así como la reducción del efecto ambiental negativo causado por el exceso de consumo energético no renovable [1].

En el caso del Distrito Federal y otras ciudades densamente pobladas del mundo<sup>1</sup>, el problema que afecta la disponibilidad de luz natural es la urbanización. El crecimiento exponencial de la población ha provocado un crecimiento de igual manera en las construcciones, obligando al crecimiento vertical de los edificios. Esto provoca un efecto de sombras para muchos edificios o alguna de sus orientaciones, por lo que se ve disminuida considerablemente la disponibilidad de luz natural [4].

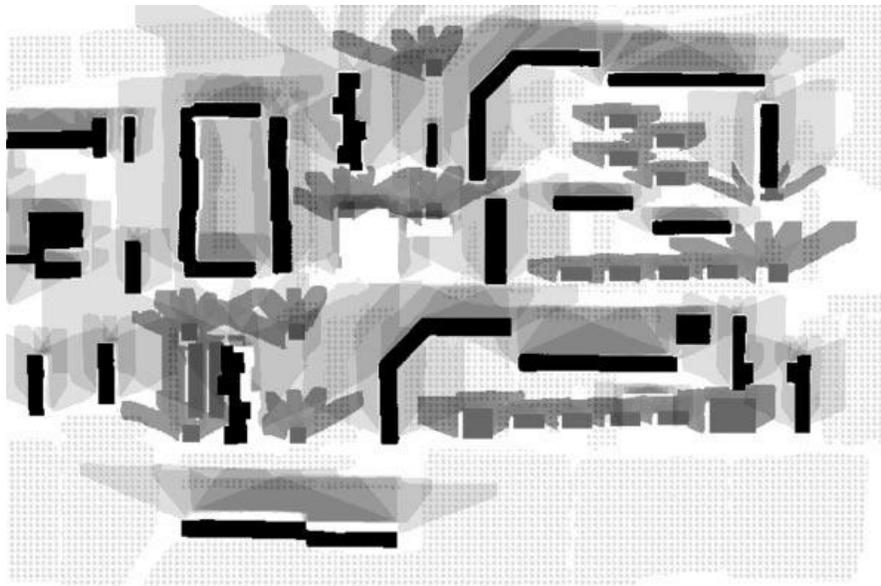
Se ha visto que bajo estas condiciones, la contribución de luz natural disponible en las fachadas de edificios proviene en su mayoría de reflexiones en el suelo o en

---

<sup>1</sup> 5920.5 habitantes por km<sup>2</sup>, según datos del INEGI (2010).

objetos cercanos (otros edificios, árboles, etc); más que de la luz proveniente de la bóveda celeste [4].

En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de la proyección de sombras para un día completo en una latitud específica, en un lugar con un gran número de edificaciones. Se observa como existen sitios donde se forman sombras que restringen la luz natural disponible, esta depende de la posición en la que se encuentren respecto a otros edificios. También se observa que las sombras mostradas en la Figura 1.1, llegan a las fachadas de edificios posteriores, 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 [1].**

Ya que existe muy poca planeación en cuanto al aprovechamiento de luz natural en los edificios de ciudades densamente pobladas como en la Ciudad de México, existen áreas donde a pesar de que exista una gran cantidad de luz no direccional disponible en las fachadas, no hay forma de hacerla llegar a las zonas internas de los edificios (como pasillos, escaleras, cuartos internos, recepciones, etc.). Esto obliga a tener las luminarias encendidas en estas zonas, por largos periodos de

tiempo. Dadas estas circunstancias, es deseable contar con sistemas capaces de introducir la luz natural disponible (generalmente luz indirecta) en las fachadas al interior de los edificios, se desea que estos sistemas preferiblemente no requieran modificaciones estructurales en los edificios.

### **1.1 Sistemas de captación de luz solar para iluminación de interiores.**

La selección de un sistema de captación de luz solar en particular depende de muchos factores, los más importantes son tres:

- Ubicación del edificio (latitud) y su orientación con respecto a la trayectoria del Sol.
- Costo del sistema.
- Capacidad de hacer modificaciones estructurales al edificio para instalar el sistema.

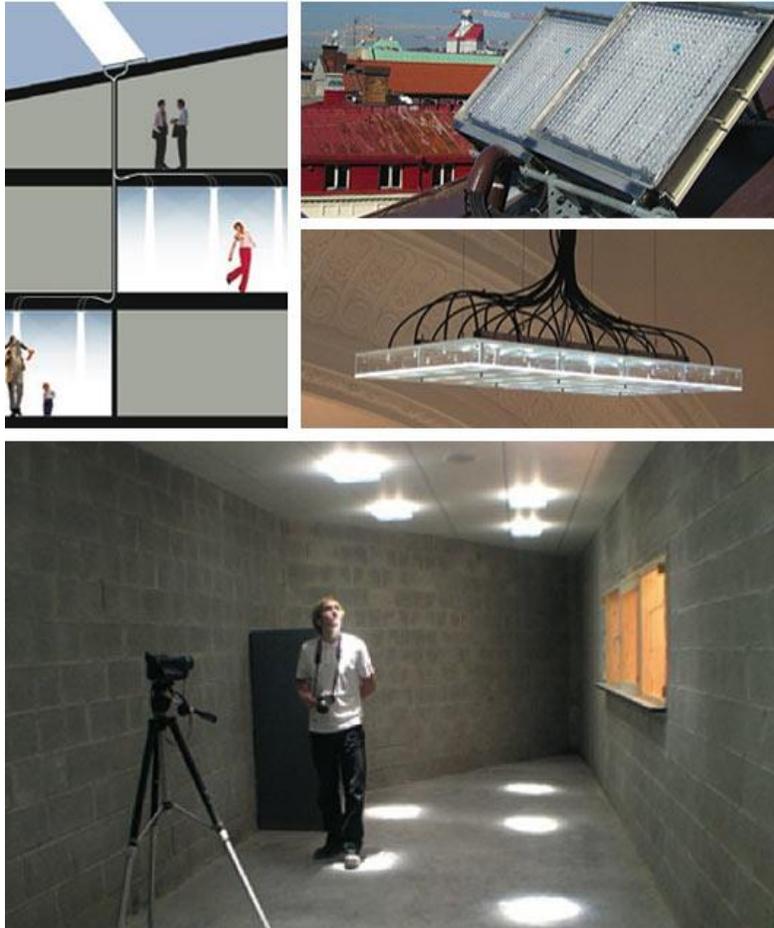
En la actualidad existen diversos sistemas de captación de luz solar para iluminación de interiores, sin embargo la mayoría de estos sistemas aprovechan la luz solar directa.

Podemos distinguir dos tipos de sistemas de iluminación con luz solar. Sistemas activos y sistemas pasivos, en este apartado se muestran algunos ejemplos de ambos tipos de sistemas, se analizan sus cualidades y deficiencias. Con base en este análisis, se plantea un sistema de iluminación de luz solar que cubra las necesidades que otros sistemas no satisfacen.

#### **1.1.1 Sistemas activos.**

Los sistemas activos son aquellos sistemas de iluminación solar que tienen un sistema de traqueo solar, para poder recibir de manera directa, los rayos con mayor potencia. En la actualidad existen sistemas de este tipo de alta tecnología, como el sistema de la empresa suiza Parans SP3 [3], el cual ha sido galardonado a nivel internacional por su alta eficiencia.

El receptor solar desarrollado por la empresa Parans es giratorio (se instala en la azotea) y después de ser programado puede seguir la trayectoria del Sol a 360°, de esta manera se aprovecha cada rayo solar de manera directa. Cada receptor está conectado a 6 manojos de fibra óptica que transportan la luz hacia el interior del edificio. Este tipo de sistema puede transportar la luz solar hasta 20 m dentro del recinto [3]. En la Figura 1.2 se muestra el sistema SP3 de la empresa Parans.

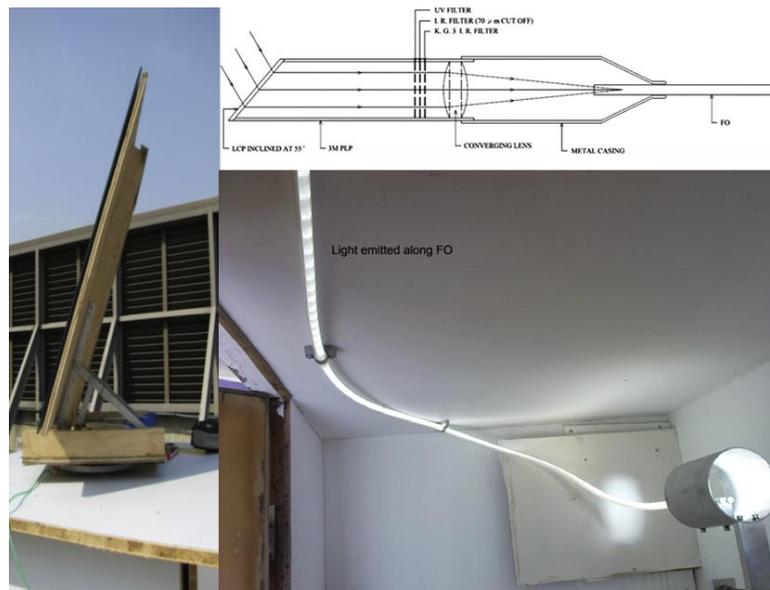


**Figura 2.2. Sistema de iluminación solar SP3 de la empresa suiza Parans [3].**

Este sistema (Parans SP3) actualmente ilumina edificios como el Hospital de Gothenburg en Suecia. Donde se reportan resultados benéficos en los pacientes. Sin embargo también se reporta que este sistema necesita conmutarse con el sistema de iluminación conectado a la red eléctrica en días nublados [3].

Si bien este sistema, es uno de los sistemas de iluminación solar más completos hoy en día, ya que colecta, concentra y transporta la luz solar (hasta 20 metros), sin necesidad de afectar la estructura del edificio. Tiene como deficiencia el no poder funcionar en días nublados y su alto costo por su avanzado sistema de traqueo solar, al igual que las lentes utilizados para concentrar la luz en la entrada de los manojos de fibra.

A continuación se presenta un sistema activo (sistema de iluminación solar de fuente remota) basado en un estudio hecho en Honk Kong [2]. Este sistema utiliza un panel cortado con láser a (*laser-cut panel, LCP*)  $55^\circ$  como colector. El LCP tiene como función colimar la luz hacia un arreglo de lentes, las cuales enfocan la luz en la entrada de una fibra óptica. Posteriormente la luz es transportada a través de la fibra al interior de los edificios y redistribuida 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 [2].**

Los estudios de este sistema reportan una eficiencia de alrededor del 14.8% en un día soleado apuntando directamente al Sol [2]. Este sistema logra introducir luz con el uso de fibra óptica hasta 6 metros dentro de un edificio. Según lo que se reporta en este artículo, se planea que este sistema tenga seguimiento de la

trayectoria del Sol, ya que este sistema depende de la intensidad de luz capturada de manera directa.

Este sistema no requiere de modificaciones en la estructura de donde se requiere instalar, ya que como en el sistema anterior (Parans SP3), el receptor se instala en la azotea y el transporte se hace por medio de fibra óptica. Sin embargo requiere de elementos complejos como el LCP, óptica formadora de imagen (lentes ópticas) y un sistema de seguimiento solar, lo que aumenta la complejidad y costo de este tipo de sistemas. Además de reportar una baja eficiencia en condiciones de luz dadas por un día nublado [2].

### **1.1.2 Sistemas pasivos.**

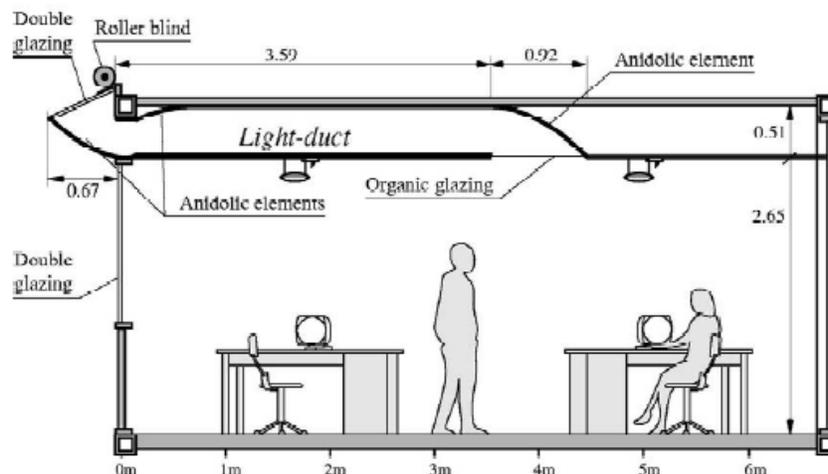
Los sistemas pasivos a diferencia de los activos, no requieren de un sistema de traqueo solar, estos sistemas se diseñan de tal manera que puedan aprovechar los rayos del Sol provenientes de todas direcciones. El sistema más sencillo de este tipo es un tragaluz. Por ejemplo la empresa Solar Tube (Figura 1.4) hace sistemas pasivos de este tipo; básicamente son guías de luz instaladas en el techo de las edificaciones. El sistema que presenta la empresa Solar Tube, es capaz de conducir la luz hasta 12 metros por el interior del conducto (con una reflectividad espectral del 99,8%). Su tecnología Raybender y LITD (Light Intercepting Transfer Device) aporta la luz necesaria, incluso en días nublados [5].



**Figura 1.4. Tragaluz de la empresa Solar Tube, sistema pasivo de iluminación solar [5].**

Estos sistemas (también conocidos como tubos de luz) presentan ventajas frente a los sistemas activos, la principal ventaja es que pueden funcionar en días nublados. Su principal desventaja es que este tipo de sistemas deben estar considerados en la planeación de la edificación donde se desea instalar. O se requieren modificaciones importantes y costosas en la estructura de dicha edificación.

Dentro de los sistemas pasivos también se encuentran los sistemas anidólicos. (Del griego: *an*: sin, *eidolon*: imagen). Estos sistemas usan como elemento principal un ducto, el cual suele ser de materiales altamente reflejantes (en el caso de este trabajo se reporta el uso de aluminio anodizado). Este sistema tiene una entrada parabólica apuntando al zenit. La forma de la entrada es parabólica para poder concentrar la luz a lo largo del ducto rectangular. 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 1.5 [6].



**Figura 1.5. Representación esquemática de un sistema anidólico y sus elementos principales [6].**

Este sistema pasivo de colección de luz solar, ha reportado eficiencias de alrededor del 32% a 4 metros de distancia de la apertura de entrada de luz en climas tropicales. Esta eficiencia es estimada mediante simulaciones donde

suponen una distribución de luz como la de un día nublado, tomando el máximo de luz disponible, (en cada unidad de área), en la 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 [6].

Estudios recientes han mostrado que el uso de materiales con calidad óptica como el MiroSilver® en todo el sistema colector aumenta la eficiencia del transporte y captación de luz [7].

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 sistemas requieren de una planeación previa a la construcción en donde se desea ser instalado o modificaciones importantes debido a las dimensiones que estos sistemas suelen tener, además de requerir el uso de materiales costosos.

Haciendo una recopilación de todos los sistemas antes mencionados, tanto activos como pasivos, ambos presentan una posibilidad real de iluminar interiores con luz solar, ya sea directa o indirecta. Presentan cualidades en el transporte de luz, como en el sistema Parans antes mencionado, de hasta 20 metros. Sin embargo, la mayoría de sistemas activos presentan problemas al trabajar en condiciones de iluminación dadas por días nublados y los sistemas pasivos, en su mayoría tienen el problema de requerir una planeación previa o modificaciones importantes en la construcción donde se desea instalar.

## **1.2 Motivación**

La contribución de luz natural disponible en las fachadas de edificios (en ciudades densamente pobladas), proviene en su mayor parte de reflexiones en el suelo o en objetos cercanos, más que de la luz proveniente de la bóveda celeste [4] (luz no direccional). El reto que presentan estas condiciones, es plantear un sistema capaz de aprovechar esta fuente de luz no direccional y llevarla a los interiores.

Desde hace muchos años existen estudios y desarrollos que abordan distintas estrategias para introducir luz natural al interior de edificios. Sin embargo, existen muy pocos trabajos respecto al uso de superficies reflectoras difusas como captadores de luz natural.

En este sentido, este trabajo propone un sistema de colección de luz solar no direccional que ayude a solventar el problema de iluminación de manera sencilla y barata. Dado que la mayor cantidad de luz disponible en las fachadas es no direccional (difusa en el caso de días completamente nublados), se propone el uso de sistemas colectores con superficies difusas. Este trabajo realiza un estudio del uso de dichas superficies para la captación de luz natural no direccional. También se pretende producir con el sistema propuesto un efecto de homogeneidad (es decir un flujo lumínico constante a lo largo del día) en distintas condiciones climáticas. Ya que la mayoría de los sistemas de iluminación solar actuales, sólo funcionan en condiciones de iluminación dadas por días soleados.

### **1.3 Hipótesis**

En una superficie difusa se redistribuye la luz incidente, sin importar la dirección con que incide, 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 significa que una superficie uniformemente difusa reflejaría una fracción definida de acuerdo con 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 de poder tener una respuesta más homogénea (un flujo lumínico constante) con 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.

## 1.4 Objetivos

Hacer un estudio asistido con simulaciones por computadora y de manera experimental de la respuesta de superficies difusas como colectores de luz no direccional. Con base en la respuesta de estas superficies difusas se propone un sistema simple de colección de luz solar para iluminación de interiores. Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Encontrar con simulaciones numéricas una configuración del sistema de colección de luz no direccional con superficies difusas que tenga una buena eficiencia de colección con una fuente de luz difusa.
- Realizar pruebas, en condiciones controladas de laboratorio, de las configuraciones que en las simulaciones demuestren tener una buena colección de la luz. Se plantea con base en estos resultados, diseñar un prototipo básico para la parte de colección y la etapa de transporte.
- Realizar pruebas en condiciones de luz solar natural del sistema propuesto, con las configuraciones que las pruebas en el laboratorio demuestren una respuesta aceptable.
- Proponer un sistema de colección de luz solar que funcione con luz no direccional. Con un buen funcionamiento a lo largo de gran parte del día y que el sistema sea de bajo costo.

# Capítulo 2

## 2 Antecedentes

En este capítulo se abordan los conceptos básicos utilizados a lo largo de todo este trabajo. Se incluye un apartado sobre óptica anidólica, se describen algunos tipos de fuentes de iluminación natural que existen dadas ciertas condiciones climáticas, se describe la reflexión difusa y la reflexión especular, se incluyen conceptos básicos de fotometría para entender el flujo lumínico, se aborda el concepto de superficie lambertiana y otros utilizados para el desarrollo del sistema propuesto como las lentes de fresnel.

En el apartado final de este capítulo se plantea el modelo matemático de transferencia de energía radiante.

### 2.1 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 período 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, 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 [8].

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 [9].

## **2.2 Tipos de fuentes de iluminación.**

Para este trabajo, es importante distinguir la diferencia entre algunas fuentes de iluminación solar presentes bajo diferentes condiciones climáticas.

### *Fuente de iluminación solar directa.*

Se llama luz solar directa a la porción de luz natural que incide en un lugar específico proveniente directamente desde el Sol. La luz solar directa se caracteriza por tener rayos muy potentes (no han tenido reflexión alguna en su trayectoria desde el Sol), pero sobre todo es un tipo de iluminación con un continuo cambio de dirección.

### *Fuente de iluminación solar indirecta o no direccional.*

Este tipo de iluminación tiene su principal contribución proveniente de rayos de varias reflexiones. Estos rayos solares en su trayectoria se reflejaron en varios objetos, como autos, otros edificios, árboles o el pavimento y llegan por ejemplo, a las fachadas de los edificios.

### *Fuente de iluminación solar difusa.*

La luz natural difusa es aquella que tiene aproximadamente la misma intensidad en diferentes direcciones, este tipo de iluminación es el que se tiene en un día completamente nublado.

### *Fuente colimada.*

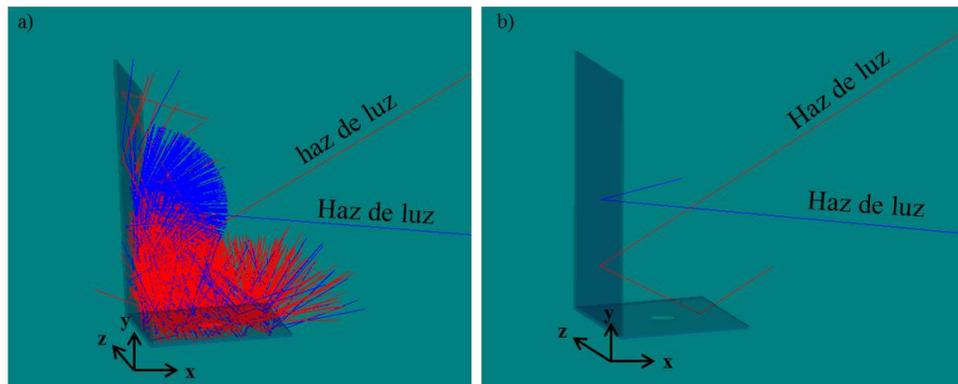
Una fuente colimada es aquella cuyos rayos son paralelos entre sí, haciendo el flujo de energía unidireccional. Un ejemplo de este tipo de fuente es el láser [8].

### 2.3 Reflexión difusa y especular

A lo largo de todo este trabajo se hablará de reflexión difusa y reflexión especular, siendo la primera en una superficie difusa, la cual sigue la ley de emisión del coseno de Lambert y la segunda en una superficie especular, en la cual los rayos incidentes siguen la Ley de Snell .

*Reflexión Difusa.* Este tipo de reflexión ocurre en una superficie homogéneamente difusa, cuando un rayo incide (sin importar el ángulo) en este tipo de superficies reflectoras, dividirá su potencia en un número finito de rayos con intensidad igual en todas las direcciones, como se muestra en la Figura 2.1a.

*Reflexión Especular.* Ocurre en un reflector especular donde un rayo incidente se refleja, idealmente, con la misma potencia en el mismo ángulo de incidencia como se muestra en la Figura 2.1b.



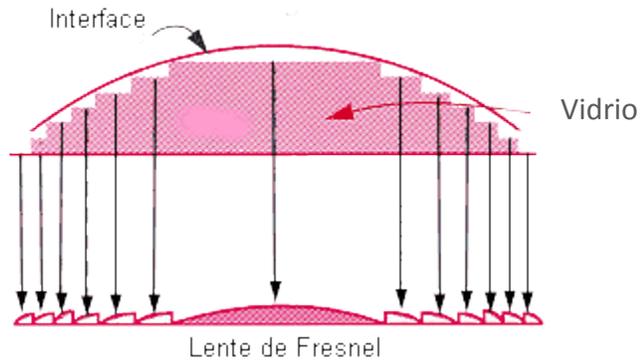
**Figura 2.1. a) Simulación de una superficie homogéneamente difusa reflejando un rayo de luz incidente en múltiples rayos con múltiples ángulos. b) Simulación de una superficie especular reflejando un rayo de luz incidente [10].**

### 2.4 Lentes de fresnel

Las lentes de fresnel son vidrios tallados o también plásticos fabricados con la geometría que se muestra en la Figura 2.2, su función es hacer que los rayos de luz, al atravesar la lente, se comporten de la siguiente manera:

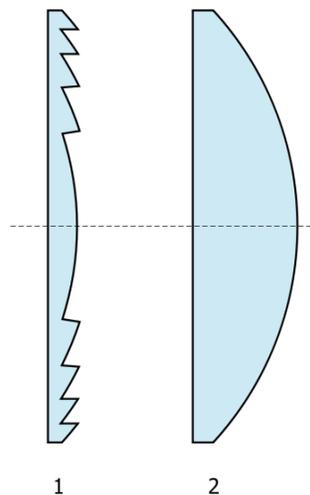
- Los rayos de luz que llegan paralelos al eje óptico tienden a concentrarse en un punto o foco (se focalizan).
- Los rayos que salen del foco atraviesan la lente y salen paralelos en un tubo de luz, es decir, colimados.

Las lentes de fresnel son un tipo de lente derivada de una lente plana convexa con cortes de la lente en anillos circulares concéntricos consecutivos.



**Figura 2.2. Corte transversal de una lente de fresnel.**

El diseño de la lente permite la construcción de lentes con gran apertura y una corta distancia focal sin el peso y volumen de material que debería usar en una lente de diseño convencional (Figura 2.3).



**Figura 2.3. Corte transversal de dos lentes de potencia equivalente: 1. de fresnel, 2. planoconvexa tradicional.**

## 2.5 Conceptos de fotometría

De acuerdo con la 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 [11]. Esto crea la necesidad de establecer estándares basados en un grupo representativo de observadores. A continuación se presentan 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 lumínico* ( $P$ ), que se define como la cantidad de fotones ( $Q$ ) por segundo (Ecuación 2.1), que emana desde un elemento de área diferencial  $dA$  como se muestra en la Figura 2.4a.

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

*Intensidad luminosa* ( $I_v$ ). Se define como el cociente entre el flujo lumínico ( $P$ ) recibido dentro de un ángulo sólido con vértice en el punto dado (Ecuación 2.2) y que contiene la dirección dada. Hace referencia a la unidad básica de luz visible en una dirección en un punto específico, es decir un flujo lumínico en una dirección específica.

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

*Irradiancia* ( $I$ ). Está definida como el cociente entre el flujo lumínico ( $P$ ) recibido por unidad de área en una superficie (Ecuación 2.3). La irradiancia es el flujo lumínico por unidad de área.

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

*Radiancia* ( $I_r$ ). Hace referencia a la irradiancia ( $I$ ) por unidad de ángulo sólido ( $d\omega$ ) vista desde una dirección en particular de observación ( $\vec{v}$ ). La radiancia es el flujo

que emana de una superficie en una dirección dada por unidad de área de la superficie iluminada, se define en la Ecuación 2.4.

$$I_r = \frac{1}{d\omega} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad (2.4)$$

$I_r$  representa el flujo lumínico emitido por la superficie de radiación, expresada por unidad de área de la superficie iluminada proyectada en el ángulo sólido<sup>2</sup>  $d\omega$  en la dirección de observación.

## 2.6 Superficies Lambertianas.

Cuando ocurre una reflexión en una superficie reflectora difusa ideal, el flujo radiante en cualquier dirección depende del coseno del ángulo  $\phi$ , formado por la dirección del observador y la normal a la superficie iluminada. Estas superficies son conocidas como superficies lambertianas.

Estas superficies obedecen a la ley de Lambert conocida como la Ley de emisión del coseno de Lambert [13]. En este caso el flujo lumínico que emana de la superficie difusa ( $P_d$ ) está dado por la Ecuación 2.5.

$$d^2P_d = I_{rd} dA d\omega \cos\phi, \quad (2.5)$$

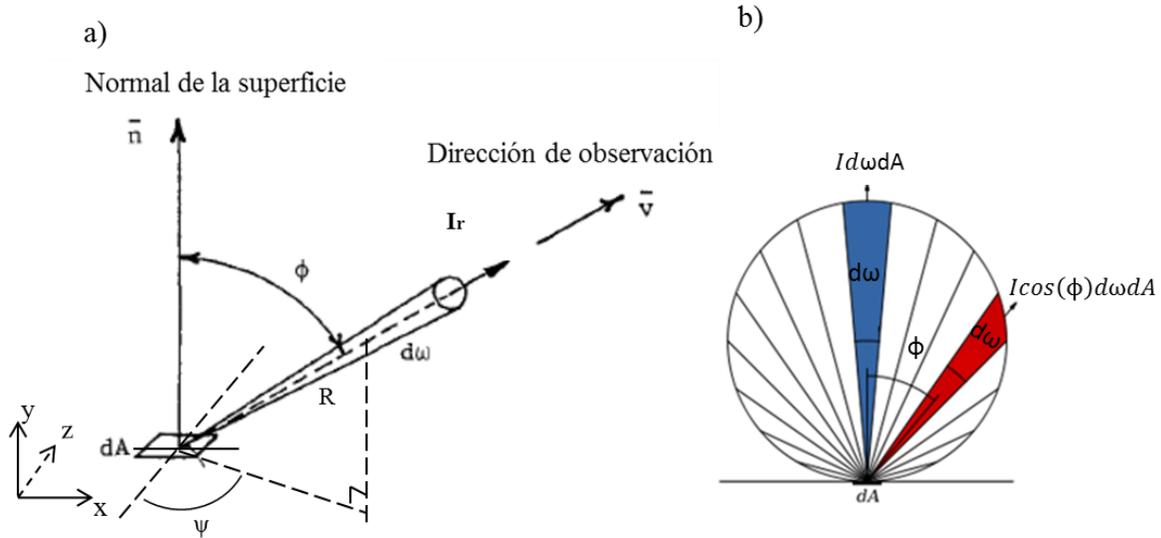
Donde  $I_{rd}$  es el flujo radiante en cada unidad de área y de ángulo sólido, se puede nombrar como la radiancia difusa.

En estas condiciones, la máxima emisión de flujo lumínico 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:

$$I_{rd} = \frac{d^2P_d}{dA d\omega \cos\phi}. \quad (2.6)$$

---

<sup>2</sup> 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 que se encuentra limitada por una superficie cónica. Está definido por  $\Omega = A/r^2$  [12].



**Figura 2.4. Geometría de la radiación reflejada a) por una superficie y b) por una superficie difusa Lambertiana [10].**

En la geometría descrita en la Fig. 2.4b se puede observar que el flujo lumínico emitido por la superficie reflectora difusa en la dirección del observador depende del ángulo sólido en el sistema coordenado  $xyz$   $d\omega = \text{sen}\phi d\psi d\phi$ . La diferencial  $d\omega$  depende de la dirección con respecto al ángulo  $\phi$  y  $\psi$  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:

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

Dado que la radiancia difusa sigue la ley de emisión del coseno de Lambert, la máxima emisión de flujo lumínico se da en la dirección normal a la superficie cuando  $\phi = 0^\circ$ , por lo que 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 que emana de una superficie difusa dada una fuente de iluminación externa.

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[14] que se basa en los conceptos de la teoría de transferencia de calor radiativo [15, 16, 17, 18]. 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.

## 2.7 Transferencia de flujo entre dos superficies.

Mediante el método general de transferencia de energía radiante planteado por F. Grum [19] es posible describir el intercambio de flujo radiante entre dos superficies, para el caso en el que el medio entre estas superficies sea isotrópico, homogéneo y que no existan pérdidas.

Dadas las consideraciones anteriores se puede decir que la radiancia, definida por la Ecuación (2.4), 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 radiancia ( $I_{ri}$ ) está dada por:

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

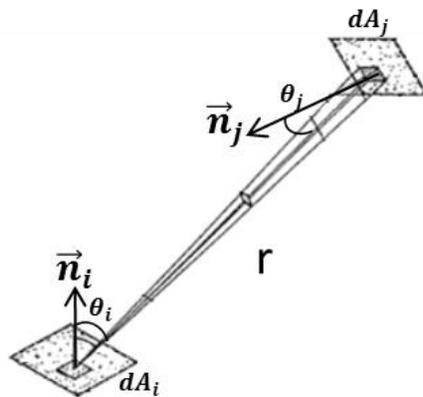


Figura 2.5. Geometría del cálculo del factor forma [10].

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 lumínico con un área diferencial  $dA_j$ , el flujo radiante transmitido a  $dA_j$  por  $dA_i$  está dado por:

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

Se puede ver que  $dA_j$  y  $dA_i$  son las áreas de  $j$  e  $i$  respectivamente.  $\phi_i$  y  $\phi_j$  son los ángulos entre la superficie normal de  $i$  y  $j$  con respecto a la línea con distancia ( $r$ ) entre  $dA_i$  y  $dA_j$ . 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  $i$ , 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:

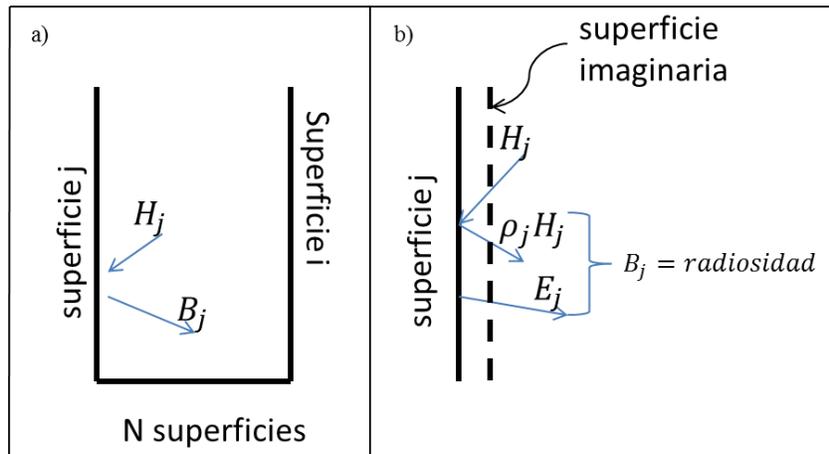
$$\Phi_{ij} = \frac{F_i}{\pi} \int_{A_i} \int_{A_j} \left( \frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{r^2} \right) dA_i dA_j \quad (2.12)$$

Además se tiene que el total de flujo radiante que sale de la superficie  $i$  es  $\Phi_{ij} = F_i A_i$ . 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 [10].

Para realizar el cálculo de la energía de la luz en cualquier superficie se considera 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  $j$  [10].**

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 la superficie  $j$ , 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 por la superficie  $j$ . Al ser observada, esta superficie estaría emitiendo un flujo  $B_j$ , desde la superficie imaginaria. Este flujo está formado por:

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

donde:

$B_j$  es la radiosidad de la superficie  $j$ , representa la tasa a la que la energía abandona la superficie en términos de energía  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

$E_j$  es la tasa de emisión de energía directa de la superficie  $j$   $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

$\rho_j$  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  $j$   $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

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  $F_{ij}$ . 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:

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

donde:

$B$  es la radiosidad de la superficie  $i$   $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .

$F$  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 obtiene la ecuación 2.16:

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

La Ecuación 2.16 incluye un conjunto de  $N$  ecuaciones lineales con  $N$  valores de  $B_j$  desconocidos y con valores  $E_j$ ,  $\rho_j$  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 [14], sin embargo el análisis de geometrías complejas usualmente es resuelto por métodos numéricos [15][10].

Con el modelo físico propuesto, se puede obtener una solución analítica de diferentes geometrías de reflectores y calcular el flujo lumínico colectado.

En el siguiente capítulo se estudia el uso de distintas configuraciones para el sistema de colección, si se usa el modelo propuesto, éste se tendría que resolver para cada una de las diferentes características geométricas del sistema, para esto se propone el uso de un software de traza de rayos ZEMAX para aproximar de manera numérica el intercambio de flujo radiante entre superficies reflectoras.

# Capítulo 3

## 3 Diseño del sistema de colección de luz solar indirecta

En el capítulo anterior se presentaron algunos conceptos básicos que serán utilizados a lo largo de este trabajo, ya que en el caso de superficies difusas (Lambertianas), no se trabaja con óptica geométrica, sino con óptica no formadora de imagen. Se tiene que utilizar un software adecuado que incluya un modelo matemático de transferencia de flujo radiante difuso, con el fin de obtener datos numéricos que apunten hacia dónde tiene que ir el diseño de un sistema de colección de luz indirecta usando superficies difusas.

### 3.1 Introducción

En este capítulo presentamos las simulaciones realizadas en ZEMAX para probar numéricamente la cantidad de flujo lumínico colectado por el sistema propuesto. Esto es con el fin de encontrar la configuración en la que el sistema colecte la mayor cantidad de flujo lumínico, dada una fuente de iluminación no direccional.

La idea inicial fue usar el efecto de iluminación en superficies difusas y usarlas como reflectores, la máxima radiancia que puede haber en un reflector es cuando éste se encuentra a  $90^\circ$  de la fuente de luz; se verificó que este reflector (reflector trasero RT) es el que tiene mayor contribución a la colección. Otro aspecto que se tomó en cuenta, fue que el sistema de reflectores propuesto, no sólo colectara el flujo incidente, sino también que dicho arreglo, ayudara a concentrar el flujo colectado. En base a esta idea, se agregó un reflector primario (RP) y se varió el ángulo  $\theta$  entre dichos reflectores, tratando de encontrar una configuración que permitiera tener estas características.

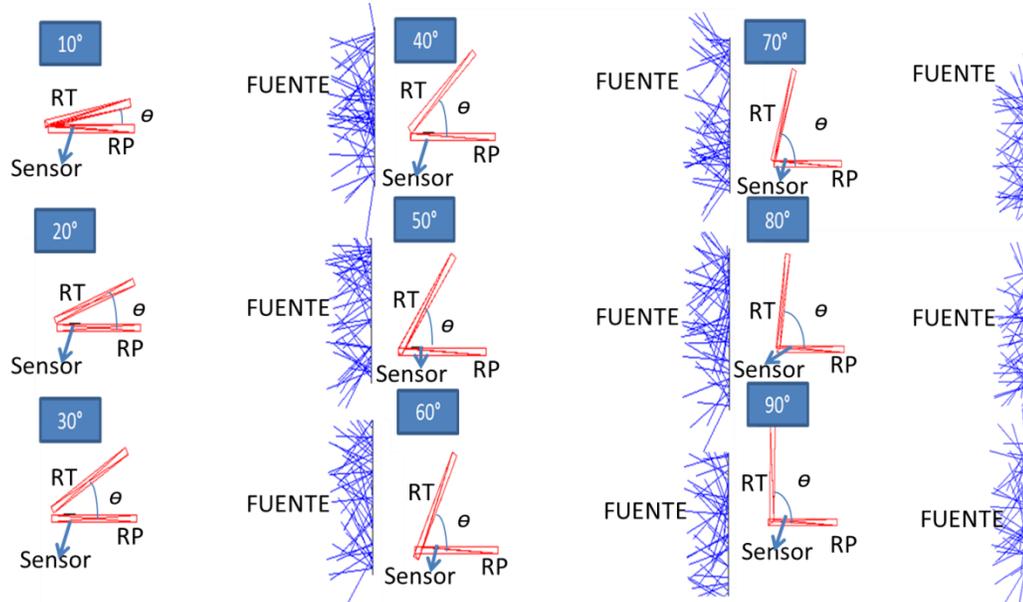
Inicialmente se eligió una fuente de iluminación capaz de reproducir las condiciones de luz que podrían existir en días nublados. Posteriormente se modelaron superficies difusas variando un ángulo  $\theta$  entre ellas. Se utilizó un programa de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) con

los diferentes reflectores difusos en sus diferentes ángulos ( $\theta = 10^\circ - 90^\circ$ ) y se importaron estos diseños al programa computacional ZEMAX para realizar las simulaciones correspondientes. También se realizaron pruebas con el fin de encontrar la zona en los reflectores donde se concentra la mayor parte del flujo lumínico en el sistema.

### 3.2 Diseño

Para estas simulaciones se utilizó una fuente no direccional de 100 [W] con una distribución cosenoidal. Se tuvo especial cuidado en colocarla a una distancia de 1 [m] cuidando la posición de la fuente para que la emisión de flujo lumínico cubriera completamente el sistema de reflectores difusos.

Para la primera simulación, se crearon varios diseños en Autocad del reflector trasero (RT) y el reflector primario (RP) con diferentes ángulos ( $\theta$ ). RT y RP son rectángulos de 15 [cm] \* 10[cm]. Se importó cada diseño en CAD con el ángulo  $\theta$  correspondiente (Figura 3.1). Estas superficies se configuraron en sus propiedades de objeto en ZEMAX como superficies lambertianas. Se colocó un sensor en el centro de cada RP como se muestra en la Figura 3.1, para cuantificar el flujo lumínico incidente en cada configuración. Los resultados de esta simulación se discuten en el siguiente apartado.



**Figura 3.1. Esquema de los elementos para la simulación en ZEMAX del ángulo  $\theta$  entre superficies difusas RT y RP.**

Los sensores utilizados en esta prueba fueron cuadrados de un tamaño de 0.5 [cm] \* 0.5 [cm], que se colocaron justo por encima del RP en el centro del mismo, en la parte cercana al vértice con RT (Figura 3.2). Para esta simulación, el sensor sólo tiene habilitada la cara superior que ve hacia el RT.

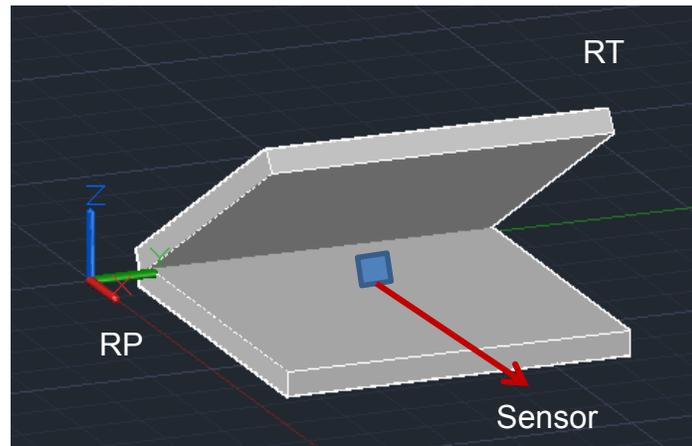


Figura 3.2. Ubicación de los sensores en el sistema de reflectores RT y RP.

La segunda simulación numérica realizada en ZEMAX, consistió en poner dos sensores del tamaño de RT y RP (15 [cm] \* 10 [cm]) de tal forma que abarcaran toda la superficie de los reflectores difusos (Figura 3.3). Esta prueba se realizó con el fin de encontrar la zona en los reflectores donde se concentra la mayor cantidad de flujo lumínico, los resultados de esta simulación se discuten en el siguiente apartado.

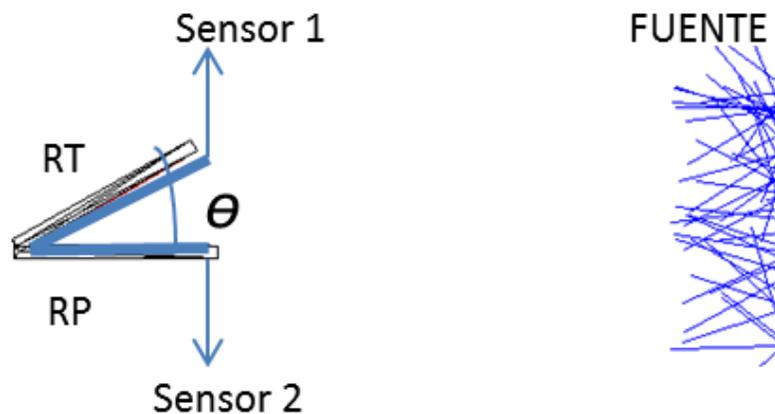


Figura 3.3. Esquema de los elementos en ZEMAX para encontrar la zona de mayor colección de flujo lumínico en las superficies difusas a 30°.

### 3.3 Resultados de las simulaciones numéricas basadas en ZEMAX.

Para la primera simulación hecha con reflectores a distintos ángulos ( $\theta$  va de  $10^\circ$  -  $90^\circ$ , en incrementos de  $10^\circ$ ), se observa en la Tabla 3.1 que el mayor flujo lumínico incidente se tiene en las configuraciones de reflectores a  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ .

De la Tabla 3.1, se observa que cuando  $\theta$  cambia de  $20^\circ$  a  $40^\circ$  hay un incremento del 63% en el flujo lumínico con respecto a la medición en  $20^\circ$ , el máximo flujo lumínico se registra en  $40^\circ$ . De  $50^\circ$  en adelante, el flujo lumínico incidente empieza a disminuir (14%), en  $60^\circ$  disminuye un 19% y en  $70^\circ$  el flujo lumínico disminuye un 40%.

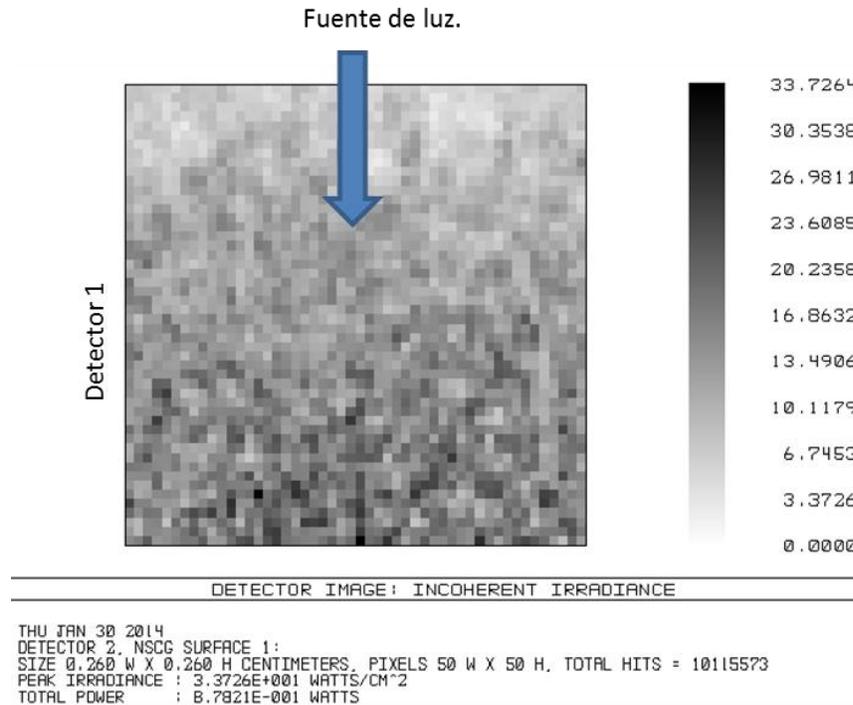
**Tabla 3.1. Flujo lumínico colectado al variar el ángulo ( $\theta$ ) entre superficies difusas.**

$\theta$ [°]	Flujo Lumínico [mW]
10	3.58
20	6.41
30	9.84
40	10.4
50	8.96
60	8.42
70	6.25
80	4.73
90	4.05

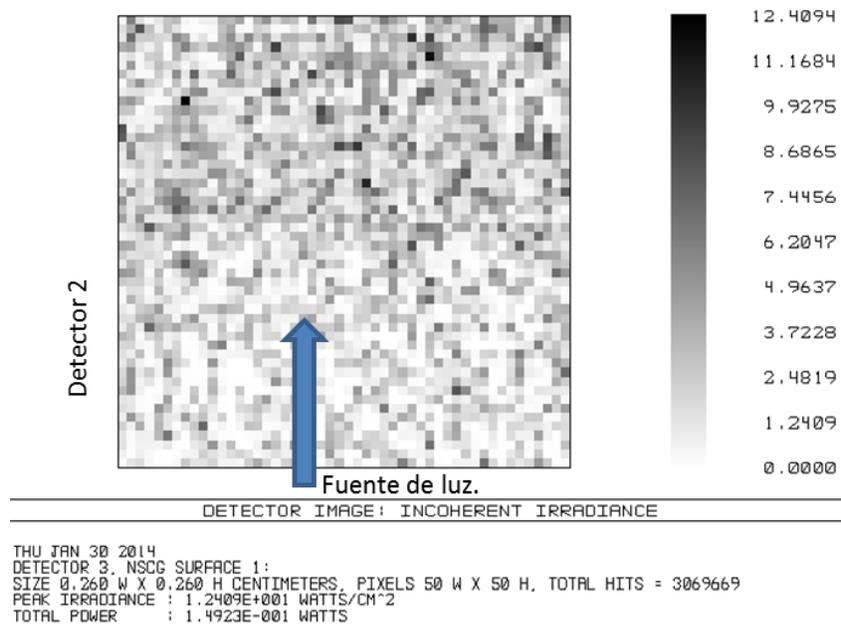
La segunda simulación se realizó con el fin de encontrar cuál es la zona de los reflectores difusos en donde se concentra la mayor cantidad de flujo lumínico. Dada la configuración para esta simulación mostrada en la Figura 3.3, se obtuvieron los siguientes resultados.

Como se observa en la Figura 3.4, el detector 1 presenta una zona más sombreada en la parte inferior que en la parte superior, esto representa una mayor cantidad de “hits” en esa zona, la cual corresponde al vértice entre ambos reflectores. Los “hits” se refieren a la cantidad de rayos incidentes en el sensor.

De la misma manera, se observa que en el caso del detector 2 (Figura 3.5). La zona superior, que corresponde al vértice entre ambos reflectores, recibió más “hits” que la zona inferior. Lo que significa que la zona del vértice entre reflectores difusos es la zona con mayor colección de flujo lumínico.



**Figura 3.4. Flujo lumínico incidente en el Sensor 1.**



**Figura 3.5. Flujo lumínico incidente en el Sensor 2.**

Gracias a las simulaciones numéricas hechas en ZEMAX, se encontró que el mejor ángulo  $\theta$  entre reflectores difusos para la mayor colección de flujo lumínico dadas las condiciones de iluminación de una fuente no direccional es  $\theta = 40^\circ$  y una zona con un rango bueno de colección es para  $\theta = 30^\circ$  a  $50^\circ$ . Existe un trabajo donde se hace un estudio similar en ZEMAX [20], arrojando un ángulo óptimo de colección entre reflectores difusos de  $30^\circ$  a  $40^\circ$ , con lo que se corroboran algunos resultados obtenidos en este capítulo.

También se encontró que la zona en los reflectores difusos donde se colecta mayor flujo lumínico está en el vértice de dichos reflectores. Estos resultados son importantes, ya que se retomarán para realizar un prototipo de un sistema de colección de luz indirecta y se caracterizará en el laboratorio, lo cual se desarrolla en el siguiente capítulo.

# Capítulo 4

En el capítulo anterior, se presentaron los resultados de las simulaciones numéricas, las cuales apuntan a que una configuración con dos reflectores difusos en un ángulo  $\theta$  de  $30^\circ$  a  $50^\circ$  entre ellos, es la que tiene una mayor colección de flujo lumínico. Otro resultado importante en el capítulo 3, fue que se encontró la zona entre dos superficies difusas (el vértice entre ambas), donde se concentra la mayor cantidad de flujo lumínico. En este capítulo se muestra el proceso de diseño y la caracterización del sistema de colección de luz no direccional en pruebas controladas en el laboratorio.

## 4 Caracterización del prototipo en laboratorio.

Primero se hicieron pruebas del flujo lumínico reflejado en varias superficies reflectoras, midiendo en varios puntos de dichas superficies con el montaje que se muestra en la Figura 4.1. Si dicho flujo reflejado en una superficie es alto, significa que también lo es su reflectividad.

Se utilizó una fuente de luz policromática de la marca Newport, que es conectada a una esfera integradora<sup>3</sup> modelo ISP 50-8l de la marca Ocean Optics, por medio de una fibra óptica de  $400\ \mu\text{m}$  de núcleo. La fuente de luz envía un haz de luz, éste pasa por la fibra óptica de  $400\ \mu\text{m}$ , llega a la esfera y finalmente a la superficie muestreada. La superficie refleja el haz de luz y este regresa a la esfera integradora, dicha esfera también está conectada a un fotodetector Newport 818-SL, el cual mide el flujo lumínico reflejado en unidades de potencia con un multímetro óptico de la marca Newport modelo 1930C a una longitud de onda de  $575\ \text{nm}$ .

Se utilizaron varios trozos de papel cascarón pintados con diferentes capas de pintura vinílica (para ver qué muestra es la que refleja mayor flujo lumínico), marca Vinimex tipo mate, de la marca COMEX. Se eligió esta marca por tener un índice de reflexión alto.

---

<sup>3</sup> La esfera integradora es un elemento empleado en la óptica para sumar todo el flujo radiante reflejado o radiado por una muestra sin importar la dirección hacia donde refleja o radia

En la Tabla 4.1 se muestran los valores promedio de 10 mediciones para el caso de reflectores sin recubrimiento, con recubrimiento de pintura Vinimex y un recubrimiento de pintura Vinimex y 20% de sulfato de bario. Ya que algunos artículos muestran que el sulfato de bario es altamente reflectivo con una mezcla del 20% de pintura blanca [21].

En todas las mediciones la fuente utilizada y las condiciones de iluminación fueron las mismas. La esfera integradora siempre se colocó haciendo contacto con la superficie reflectora. De los resultados de la Tabla 4.1 se puede apreciar que los recubrimientos con una capa de Vinimex aumentan un 26.4% el flujo reflejado (en comparación con el reflector sin pintura) y que el mejor caso se obtiene para un recubrimiento con 4 capas de pintura Vinimex. El agregar sulfato de bario no mejora significativamente la reflectividad de los reflectores; ya que el flujo reflejado es prácticamente el mismo que en el caso de dos recubrimientos de pintura Vinimex.

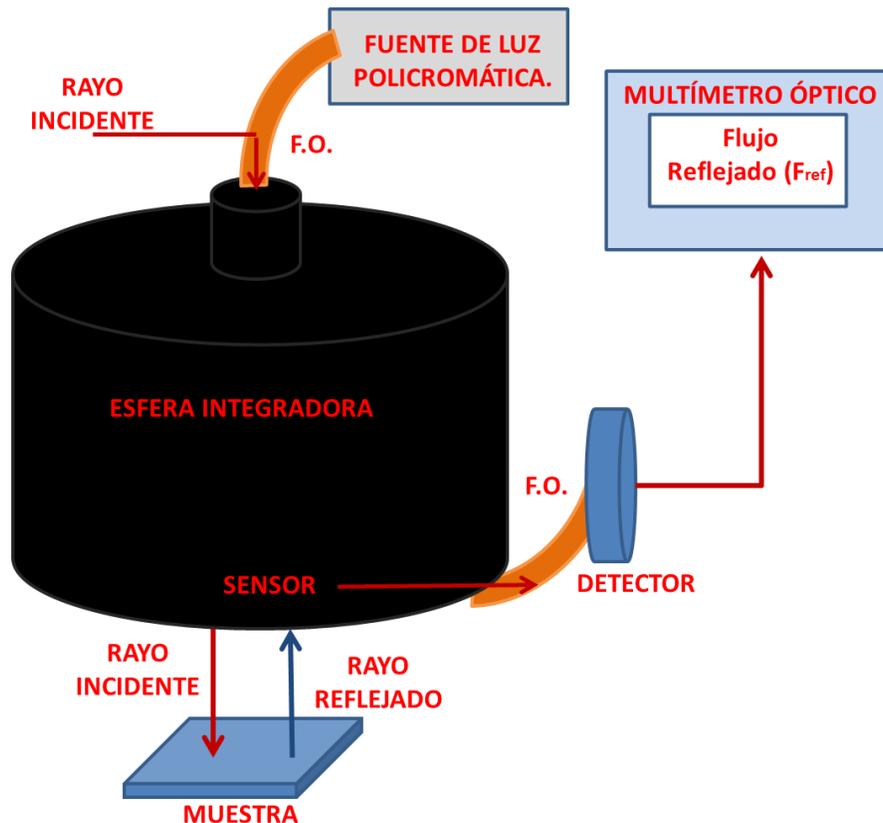
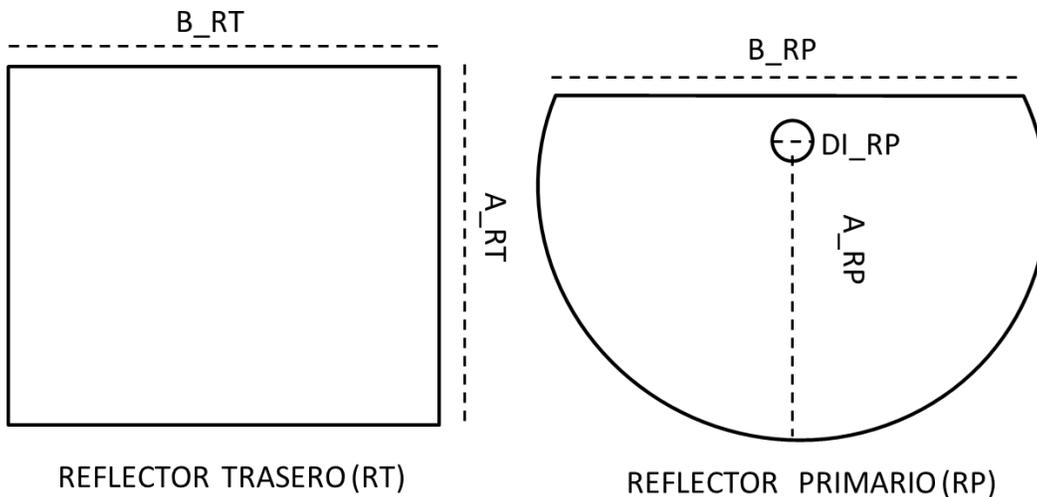


Figura 4.1. Montaje de medición del flujo lumínico reflejado.

**Tabla 4.1. Resultados experimentales de reflectividad con diferentes superficies.**

Muestra	$F_{ref}$ [nW]
Sin pintar	113.5
Una capa	135.5
Dos capas	143
Tres capas	143.2
Cuatro capas	143.5
Cinco capas	143.5
Seis capas	143.5
Sulfato de Bario con tres capas	141.7

Con este resultado se verificó que se necesitan al menos cuatro capas de pintura Vinimex para reflejar el máximo flujo lumínico, lo que indirectamente indica una buena reflectividad. Con base en estos resultados se fabricaron dos reflectores con 4 capas de pintura Vinimex, uno llamado reflector trasero (RT) y otro llamado reflector primario (RP) la forma de estos reflectores se muestran en la Figura 4.2.



**Figura 4.2. Esquema de los reflectores difusos para la colección de luz.**

El esquema de la Figura 4.2 hace referencia a las siguientes medidas de los reflectores difusos. Respecto al reflector trasero (RT), B\_RT (la base de RT) tiene una longitud de 13 [cm] y su altura (A\_RT) es de 12 [cm]. Respecto al reflector primario (RP). Su base, (B\_RP) tiene una longitud de 13 [cm] y una

altura ( $A_{RP}$ ) de 10.5 [cm]. El diámetro interno del reflector primario ( $DI_{RP}$ ) es de aproximadamente 1 [cm].

El siguiente paso en el desarrollo de este sistema, fue encontrar el ángulo entre el reflector trasero (RT) y el reflector primario (RP) (Fig. 4.2), donde la potencia reflejada por ambas superficies fuera máxima (según las simulaciones este ángulo  $\theta$  está entre  $30^\circ - 50^\circ$ ). Para realizar estas pruebas, se dispusieron los elementos en el cuarto oscuro del laboratorio como se muestran en la Figura 4.3.

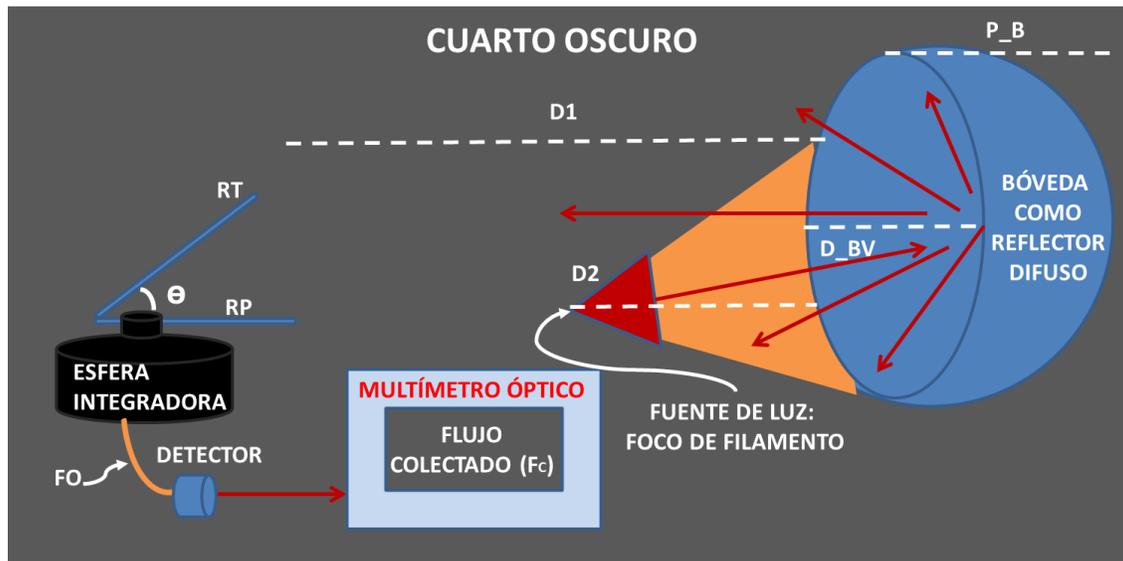


Figura 4.3. Esquema del prototipo de caracterización en el cuarto oscuro.

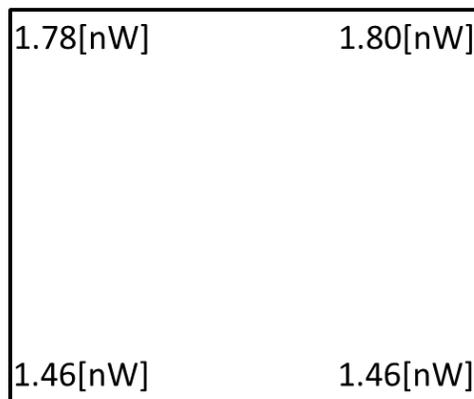
En la figura 4.3 se muestra el esquema usado en el laboratorio para caracterizar el sistema con reflectores difusos.  $D_1$ , es la distancia del sistema a la bóveda (2 [m]), usada como reflector difuso y la distancia  $D_2$  es de la bóveda a la fuente de luz (13 [cm]), que en nuestro caso es un foco de filamento de 50 [W] marca Philips.  $D_{BV}$  es el diámetro de la bóveda (45 [cm]) y  $P_B$  es su profundidad (28 [cm]).

La bóveda que se muestra en la Figura 4.4 actúa como reflector difuso. Si bien esta fuente sigue siendo direccional por encontrarse a una distancia relativamente corta al sistema es una buena aproximación a las condiciones de una fuente de luz no direccional.



**Figura 4.4. Bóveda utilizada como reflector difuso en el cuarto oscuro.**

También se verificó la homogeneidad de la fuente de iluminación (Figura 4.5) tomando mediciones de la potencia incidente en varias posiciones de la zona donde se colocaría el reflector trasero.



**Figura 4.5. Puntos de medición de la iluminación de la fuente de luz no direccional en la zona del reflector (RT).**

Como se aprecia, en la Figura 4.5, la potencia incidente en la parte superior de la zona donde se colocaría el RT, es alrededor de 0.4 [nW] más que en la parte inferior. Esto corresponde a una diferencia del 20%, por lo que no se puede considerar una superficie completamente homogénea, esto es debido a que la pintura no formó capas completamente homogéneas en los reflectores. Para mejorar la homogeneidad habrá que utilizar reflectores de otro material donde se puedan formar capas de pintura más homogéneas.

A continuación se describen las pruebas de caracterización del sistema de colección formado por los reflectores caracterizados en este apartado.

#### 4.1 Colección del flujo lumínico en condiciones de luz no direccional.

En este apartado se muestran los resultados de las pruebas de caracterización en el laboratorio del sistema formado por los reflectores caracterizados en la sección anterior. En base a estos resultados, se construyó el prototipo del sistema de colección de luz indirecta.

La primera prueba fue encontrar el ángulo máximo de colección entre el reflector trasero (RT) y el reflector primario (RP). Se utilizó como fuente de luz un foco de filamento, a una distancia D2 apuntando a una bóveda con superficie difusa como se mostró en la Figura 4.5. A una distancia D1 (2 [m]) se colocó la esfera integradora. Arriba de ella, se alineó la entrada de la misma con el diámetro interno de RP. El ángulo  $\theta$  entre RT y RP se varió dejando RP a  $0^\circ$  y moviendo el RT en intervalos de  $10^\circ$ . Se midió con la esfera integradora la potencia de colección ( $P_c$ ) en diferentes ángulos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Resultados de las pruebas experimentales de colección máxima con diferente ángulo entre los colectores.**

Ángulo $\theta$ [°]	$F_c$ [nW]
0°	0.01
10°	0.38
20°	0.77
30°	0.82
40°	0.76
50°	0.65
60°	0.53
70°	0.28
80°	0.22

En la columna “Ángulo  $\theta$ ” se muestran los diferentes ángulos usados entre el RT y el RP. La columna “ $F_c$ ” muestra el flujo lumínico de colección en cada ángulo, se registra el máximo flujo de colección en  $30^\circ$ .

De la Tabla 4.2 se observa que entre  $20^\circ$  y  $40^\circ$  se tiene el rango de mayor colección y esta colección disminuye rápidamente (46%) fuera de este rango

angular. En  $30^\circ$  se tiene el máximo flujo de colección. Esta medición se repitió cinco veces, encontrando el flujo de colección máximo en el mismo valor del ángulo  $\theta$  en  $30^\circ$ .

El siguiente paso fue mejorar el prototipo para aumentar el flujo de colección ( $F_c$ ). Sin embargo, en un principio tomó bastante tiempo y paciencia encontrar el elemento ideal que ayudara a concentrar los rayos provenientes de todas direcciones y así aumentar  $F_c$ . La luz colectada se concentraba en el vértice de unión de los dos colectores; sin embargo había una cantidad no despreciable de luz en el resto de la superficie de los reflectores y que no se podía concentrar en el vértice; es decir en el área de colección. Fue así que surgió la idea de usar lentes de fresnel, que permitirían focalizar la luz incidente (como se explica en el apartado 2.4) de varias direcciones en el centro del vértice de los reflectores, Como primera prueba utilizamos lentes de fresnel rígidas con un foco de 30 [cm]. Se mejoró el flujo colectado pero todavía no se aprovechaba el flujo colectado en los costados de los reflectores; por lo que se decidió utilizar una lente de fresnel flexible con un foco aproximadamente de 10 [cm]. Con esta lente se logró aumentar  $F_c$  en una gran proporción. Dando como resultado un prototipo como el que se muestra en la Figura 4.6



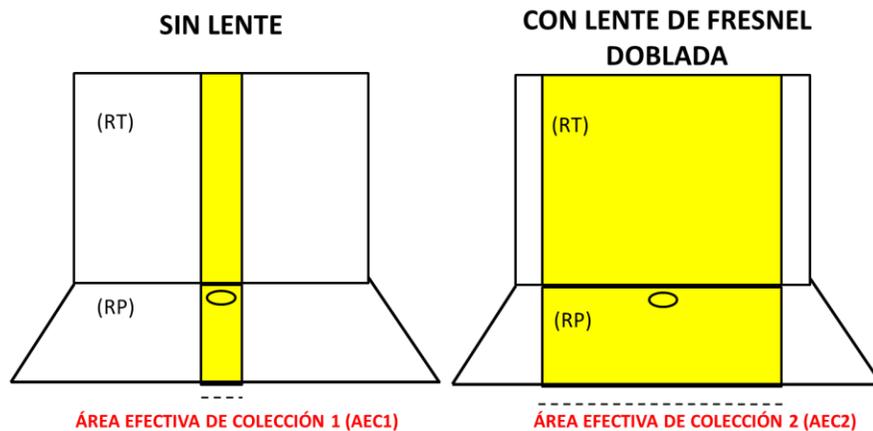
**Figura 4.6. Prototipo del sistema de colección de luz indirecta con lente de fresnel curva.**

Se colocó el montaje que se muestra en la Figura 4.3 en el cuarto oscuro. Bajo estas condiciones se probó con la lente de fresnel añadida al RT y al RP a  $30^\circ$ .

Cuando RT y RP no tienen la lente sólo se aprovecha una porción del área del RT y del RP. Como se muestra en la Figura 4.7, al agregarse la lente de fresnel curva,

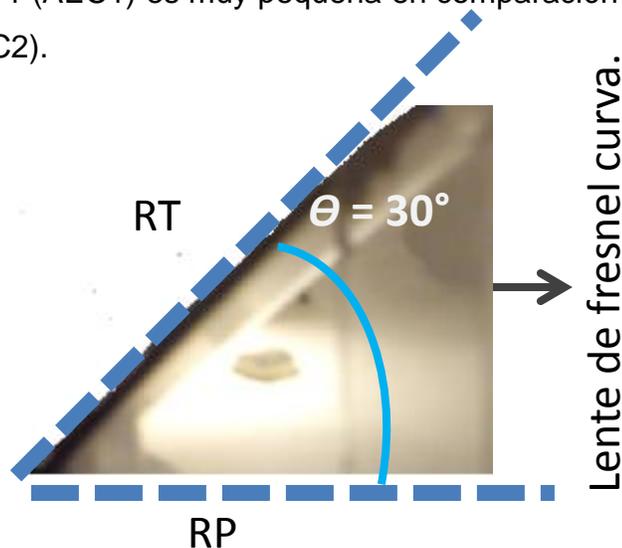
los rayos incidentes se direccionan a la zona central del vértice entre el RT y el RP (este efecto se ilustra en la Figura 4.8), aumentando así la colección del flujo lumínico.

El aumento de  $F_c$  con esta mejora se registró en 1.62 [nW], a diferencia del sistema sin la lente, es decir dos superficies difusas solamente, RT y RP a  $30^\circ$ , fue de 0.82 [nW] (Tabla 4.2). Esto representa un incremento en el flujo lumínico de colección ( $F_c$ ) del 97.56 %.



**Figura 4.7. Comparación del efecto de la lente de fresnel en el RT y RP. Vista frontal.**

Como se puede observar en la Figura 4.7, cuando no se tiene la lente, el área efectiva de colección 1 (AEC1) es muy pequeña en comparación con tener la lente de fresnel curva (AEC2).



**Figura 4.8. Efecto de iluminación en el prototipo del sistema de colección de luz indirecta con la lente de fresnel curva.**

Hasta este punto hemos abordado la naturaleza de la luz disponible en una fuente no direccional de laboratorio, también se desarrolló la parte de colección y concentración en el prototipo de un sistema de colección de luz no direccional. Ahora trataremos de la etapa de transporte del flujo lumínico colectado.

#### **4.2 Transporte del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta.**

Para este fin existen diversos métodos propuestos en la literatura, éstos pueden ser un arreglo de espejos, tubos de luz (tubos huecos con materiales reflejantes), o bien guías de onda hechas de vidrio o polímeros. Sin embargo dado que el sistema propuesto se planea sea instalado en edificios ya construidos con la mínima alteración de su estructura se prefirió usar un manajo de varios hilos de fibra óptica (FO) que mostraron tener grandes ventajas mecánicas en los montajes experimentales. Así como tener una gran capacidad de coleccionar luz por si sola.

Para el armado de estos manajos de fibra, conocidos como *bundles* de FO, se utilizó fibra multimodal, plástica, de 2 [mm] de núcleo. Este tipo de fibra tiene una apertura numérica (N.A.) de 0.5, lo que indica que el ángulo de aceptación es bastante amplio ( $35^\circ$ ) como para captar una porción importante de los rayos provenientes del sistema colector. Además, es una de las opciones de guías de luz más baratas del mercado.

Se utilizaron 43 fibras de este tipo para construir el bundle 1 (B1), y 49 fibras en el bundle 2 (B2). Primero se cortaron de un carrete todas las fibras al mismo largo (15 cm) y se pegaron con un pegamento epóxico, finalmente se pulieron ambas caras de los manajos de fibra. El proceso de pulido es una etapa que requiere de mucho cuidado ya que se tienen que pulir al mismo nivel cada hilo de fibra en el bundle.

En la Figura 4.9 se muestra una fotografía de los manajos de fibra armados donde se puede apreciar que un hilo de fibra de B1 está dañado. Cabe mencionar que no pudimos fabricar más manajos porque ya no se tenía fibra disponible.



**Figura 4.9. Bundle 1 (B1) y Bundle 2 (B2) de F.O. Vista de un extremo.**

Como ya se mencionó anteriormente, los bundles por sí mismos colectan bastante flujo lumínico. Se midió el flujo lumínico de la lámpara de halógeno (con un luxómetro marca Steren modelo HER -410) en el cuarto oscuro. Se obtuvo que al nivel de la mesa de trabajo, llegan 70 [lx] de la lámpara de halógeno al fotodetector del luxómetro. Y con B1, por sí mismo sólo apuntando a la lámpara de halógeno e iluminando en el otro extremo el fotodetector del luxómetro, se colectan 12 [lx] con B1, lo cual es bastante flujo lumínico considerando el diámetro de los bundles es de 1 [cm], (17% del total de flujo lumínico disponible).

#### **4.2.1 Estimación de pérdidas en los manojos de fibra óptica.**

También se realizaron las pruebas pertinentes para cuantificar las pérdidas en cada bundle y obtener el factor de pérdida entre ellos.

Para cuantificar las pérdidas se realizaron esencialmente tres pruebas. Primero se colocó el detector de la esfera integradora (Figura 4.10) enfrente de un láser compuesto de He -Ne de 10 [mW] a una longitud de onda  $\lambda = 632$  [nm], de la marca Melles Griot, el valor de esta primera medición será utilizado como referencia (9 [mW]). Las dos siguientes mediciones se hicieron poniendo B1 y luego B2 en la misma posición en que se puso el detector y se midió la potencia al final de cada bundle (Tabla 4.3). Para esta medición se colocaron las fibras a una distancia (3 [cm]) tal que el haz láser iluminará toda el área de los bundles.

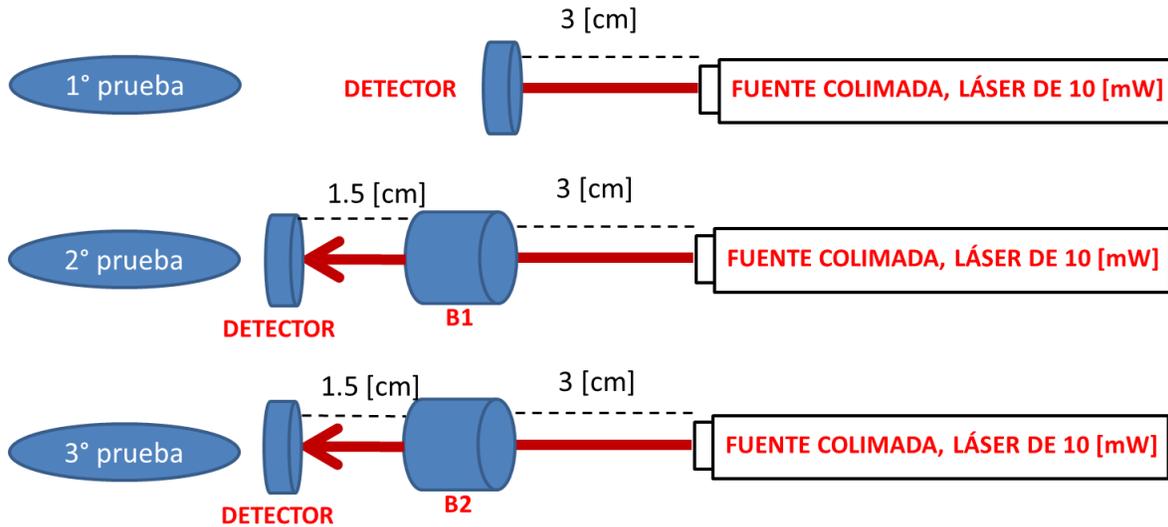


Figura 4.10. Esquema de las diferentes pruebas realizadas a los bundles de F.O.

El montaje que se usó para estas pruebas se muestra en la Figura 4.11. Se tuvo especial cuidado en respetar las distancias y alinear cuidadosamente el haz del láser para todas las mediciones. Todas estas pruebas se realizaron en un cuarto oscuro para evitar el ruido ambiental de otras fuentes de iluminación.

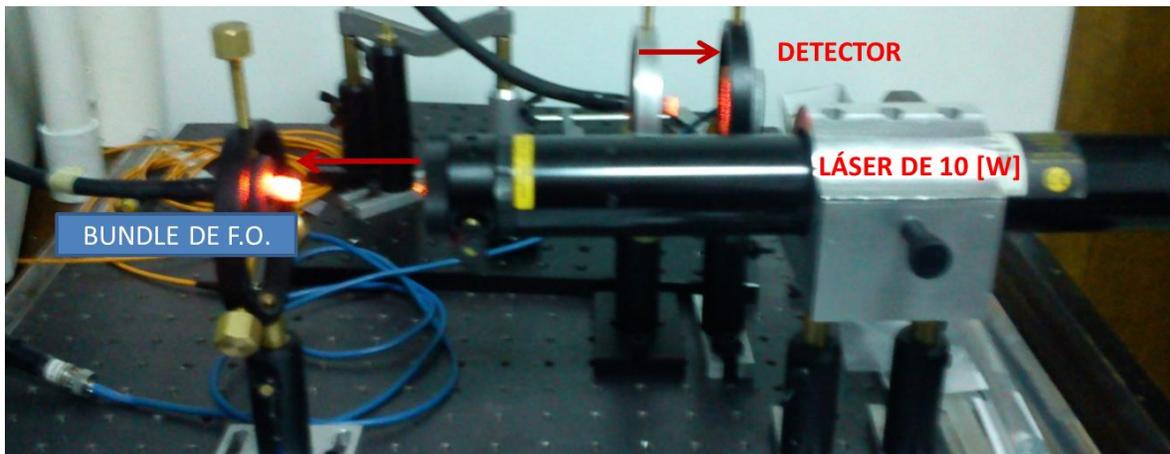


Figura 4.11. Montaje de laboratorio para la prueba de pérdidas en el bundle de F.O.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de estas pruebas. La referencia se midió con el detector a 3 [cm] del láser, se registró un valor de 9 [mW] ( $F_i$ ). A la misma distancia se colocó B1 (iluminando completamente su área) y se midió el flujo lumínico al final de B1 ( $F_{fb} = 6.26$  [mW]). De la misma forma se repitió este proceso con B2 registrando un flujo lumínico al final de B2 de  $F_{fb} = 6.15$  [mW]. Con

estas mediciones se calcularon el porcentaje de pérdidas en el transporte de cada bundle (Ecuación 4.1) y el factor entre bundles (Ecuación 4.2).

$$L = \frac{Fr - Ffb}{Fr} \quad (4.1)$$

$$F = |LB1 - LB2| \quad (4.2)$$

**Tabla 4.3. Resultados de las pruebas experimentales de pérdidas realizadas en los bundles de F.O.**

Bundle	$F_{fb}$ [mW]	L[%]	F
B1	6.15	31.5	1.1
B2	6.26	30.4	1.1

El factor de pérdida registrado en B1 fue de 31.5% y en B2 fue de 30.4%. Valores muy similares, porque como ya se mencionó, ambos medios tienen un comportamiento muy similar, el factor entre ambos bundles fue  $F=1.1$ .

Estas pérdidas en los bundles son altas, considerando que cada bundle tiene una longitud de 15 [cm], esto se debe a que el proceso de armado de los bundles presentó algunos problemas ya que se elaboraron de manera manual. No se pudieron armar más bundles para mejorar los anteriores; pero con los bundles B1 y B2, se pudieron hacer las mediciones correspondientes del sistema propuesto en condiciones de iluminación natural (capítulo 4).

A manera de conclusión, podemos resaltar los principales resultados obtenidos en este capítulo. Se construyeron reflectores traseros (RT) y reflectores primarios (RP) con una alta reflectividad. Se realizaron pruebas para obtener el ángulo entre ambas superficies (RT y RP) donde el flujo lumínico fue máximo, este ángulo encontrado fue de  $\theta = 30^\circ$  con  $F_c = 0.82$  [mW]. Para incrementar aún más  $F_c$ , se introdujo en el prototipo una lente de fresnel flexible. Un resultado importante de este capítulo fue encontrar que al doblar la lente de fresnel, los rayos de las partes laterales que sin la lente no son aprovechados, se direccionan al centro del

sistema donde se encuentra el bundle. Con esta lente se registró un aumento en el flujo lumínico del 95%.

También este capítulo trató la parte de transporte de luz, para lo cual se fabricaron 2 bundles de F.O. Se hicieron pruebas para sacar un factor que igualara ambos bundles, pero se encontró que ambos medios tienen las mismas condiciones de transmisión. Se realizaron pruebas para cuantificar las pérdidas en los bundles de 15 [cm]. Se registraron pérdidas alrededor del 30%, las cuales son altas; sin embargo, se espera que este sea un aspecto a mejorar en estudios futuros.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados finales de caracterización del sistema en condiciones de luz natural en la fachada del edificio del CCADET.

# Capítulo 5

En el capítulo anterior, se obtuvo con base en experimentos hechos en el laboratorio, un sistema de captación de luz indirecta, con dos reflectores difusos (RT y RP), con un ángulo de inclinación óptimo encontrado entre ellos de  $\theta = 30^\circ$ . Se incluyó una lente de fresnel curva para aumentar la colección, y un bundle de fibra óptica para el transporte de flujo lumínico.

## 5 Caracterización del prototipo en condiciones de luz natural.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de diversas pruebas hechas en la fachada del edificio del CCADET, con las condiciones propias de luz no direccional que tiene dicha fachada. Se realizaron cinco experimentos en cinco días. Se midió a lo largo de un período de 8 horas en cada día (de 9:00 AM – 5:00 PM), tomando muestras cada 15 minutos del flujo lumínico. De manera paralela se midió este flujo lumínico en un sistema de colección de luz indirecta, y el flujo lumínico en diferentes sistemas de referencia (como son un sistema de referencia con superficies especulares, un luxómetro y un bundle sin ningún tipo de reflectores) a manera de comparación.

El montaje de los elementos utilizados para estas pruebas se muestra en la Figura 5.1.a. El montaje real se muestra en la Figura 5.1.b.

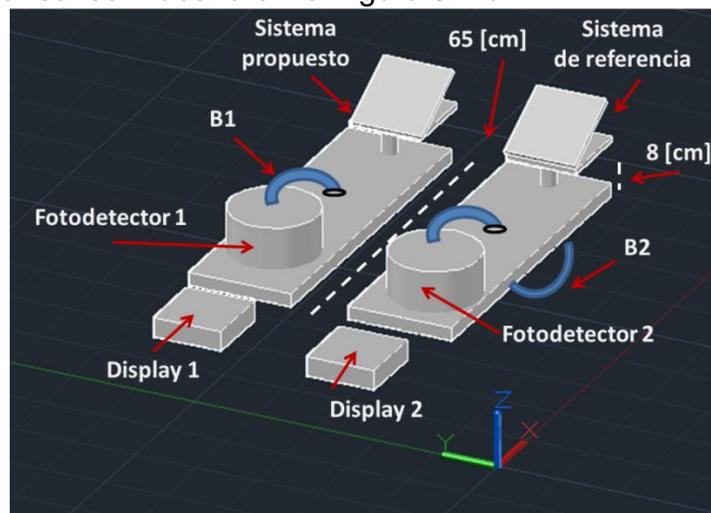


Figura 5.1.a. Esquema del montaje de los elementos empleados en las pruebas en condiciones de luz natural.



**Figura 5.1.b. Montaje real de los elementos empleados en las pruebas de medición en condiciones de luz natural.**

Para el montaje de estas pruebas se utilizaron dos tablas de 65 [cm] de largo por 15 [cm] de ancho, ambas tablas montadas en una ventana de 1.2 [m] de ancho por 0.7 [m] de alto. Se perforaron las tablas en ciertos puntos para fijar los sistemas que se pusieron a prueba y los sensores de los luxómetros utilizados (los dos idénticos, marca Steren modelo HER-410). Las perforaciones en cada tabla ayudaron a fijar los sistemas en el mismo lugar, así como los sensores, para poner los sistemas en igualdad de condiciones en cada prueba.

Como ya se mencionó en el Capítulo 2, el valor de las unidades del flujo lumínico, dependen directamente del área del sensor, el cual debe estar completamente iluminado, para que el luxómetro arroje un valor certero. Este aspecto se tuvo en cuenta en el montaje de estas pruebas, se muestra un esquema de cómo se montaron los sensores de los luxómetros en la Figura 5.2.

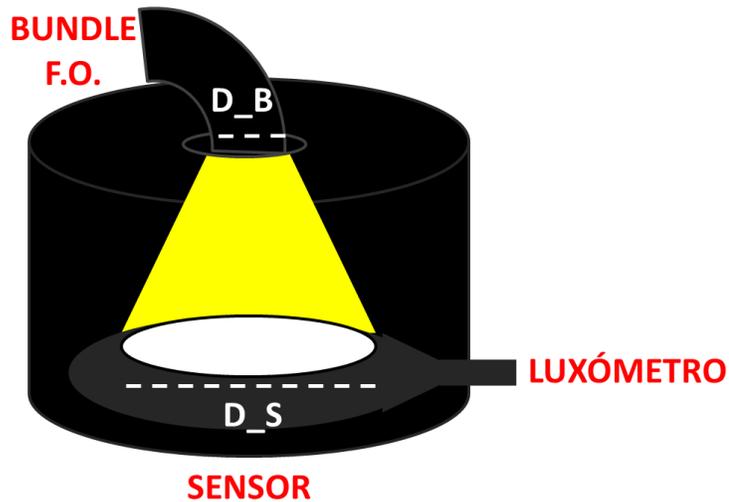


Figura 5.2. Esquema del montaje de los sensores.

En la Figura 5.2.  $D_B$  se refiere al diámetro de los bundles que es de 1 [cm]. Y  $D_S$  es el diámetro del sensor (4.5 [cm]).

Como ya se mencionó anteriormente, las condiciones de luz en la fachada del laboratorio son dadas por luz no direccional, en su mayoría son rayos provenientes de varias reflexiones y no directamente del Sol. Estas condiciones de luz las llamaremos luz no direccional, se muestra un esquema simple en la Figura 5.3.

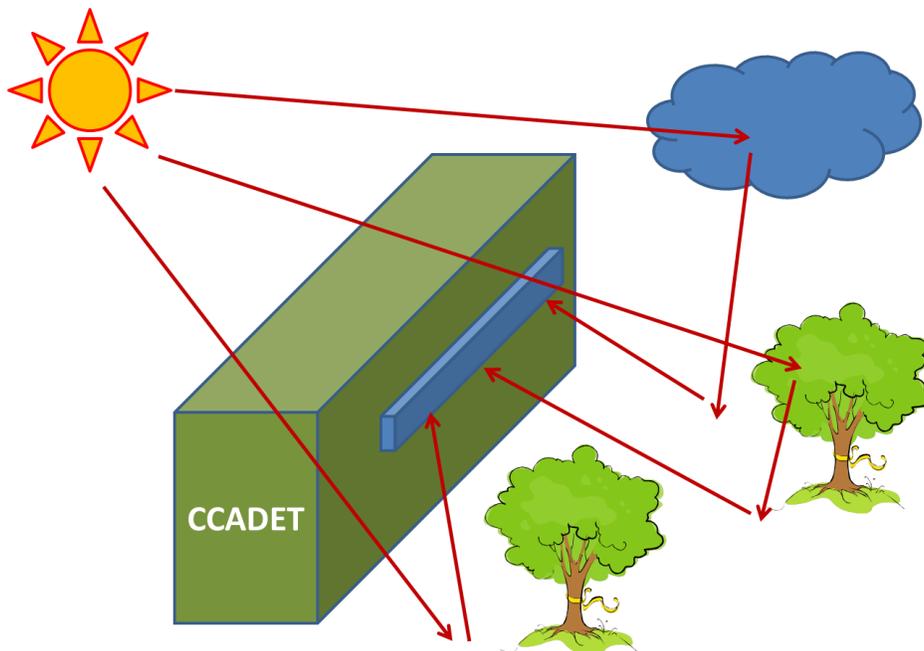


Figura 5.3. Condiciones de luz indirecta en la fachada del CCADET.

En estas condiciones, los rayos llegan con una menor potencia debido a las múltiples reflexiones durante su camino a la fachada del edificio. Cuando se tiene

un día nublado por ejemplo, las nubes actúan como superficies difusas que reflejan el rayo incidente en varios rayos con menor potencia y que se esparcen en todas las direcciones.

Durante los días en que se realizaron las pruebas se tuvieron días parcialmente soleados, días parcialmente nublados, días soleados y días nublados. La Figura 5.4 muestra la vista desde la ventana del laboratorio en un día nublado.



**Figura 5.4. Vista de un día nublado desde la ventana del Laboratorio de Sensores Ópticos y Eléctricos del CCADET.**

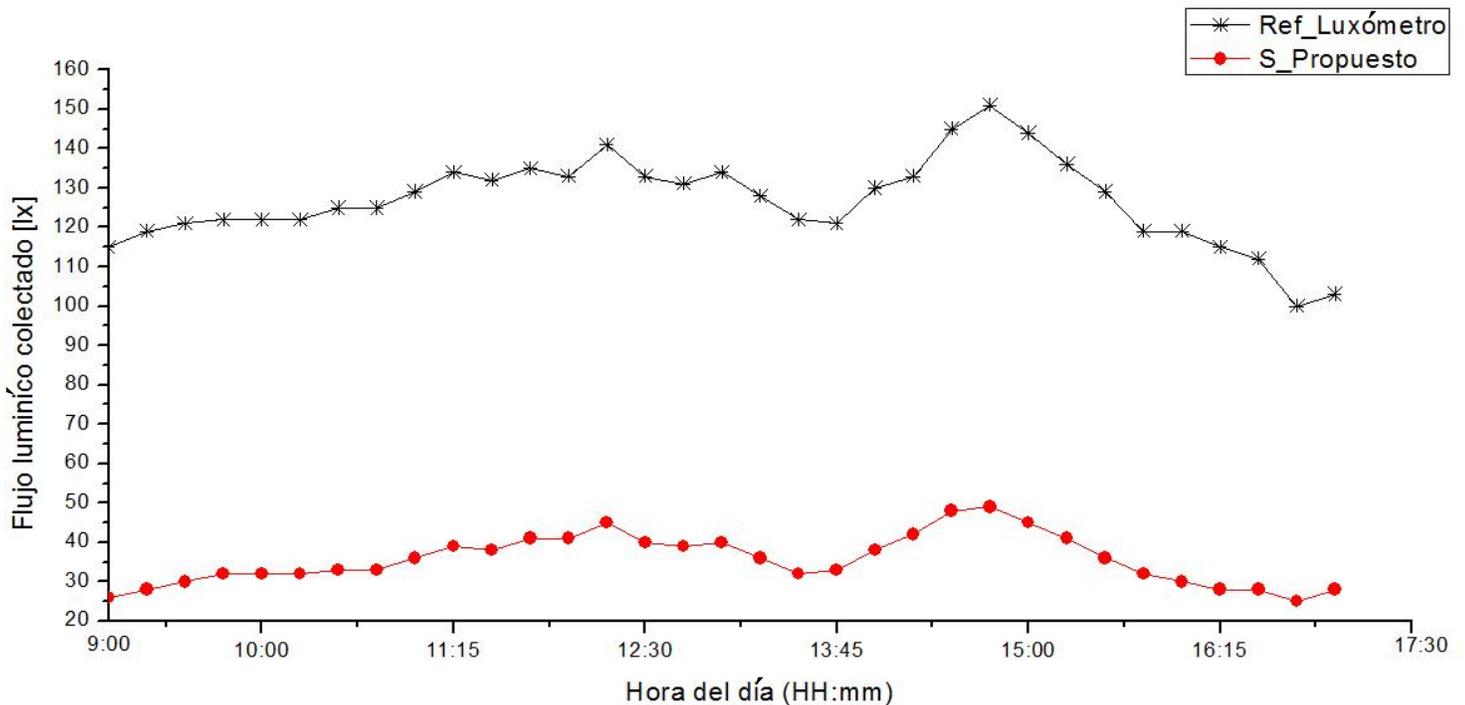
### **5.1 Resultados obtenidos de las mediciones con el sistema de colección de luz indirecta y varios sistemas de referencia.**

La primera prueba se realizó con el fin de conocer de manera cuantitativa cuál es la cantidad de flujo lumínico disponible en la fachada del edificio a lo largo del día. Esta prueba fue la única que se realizó con un montaje diferente, ya que en este caso, el fotodetector del luxómetro 2, se dejó al aire libre. Es decir, directamente el fotodetector 2 fue el sistema de referencia, dicho fotodetector se instaló en la fachada del laboratorio al lado del sistema de colección de luz indirecta.

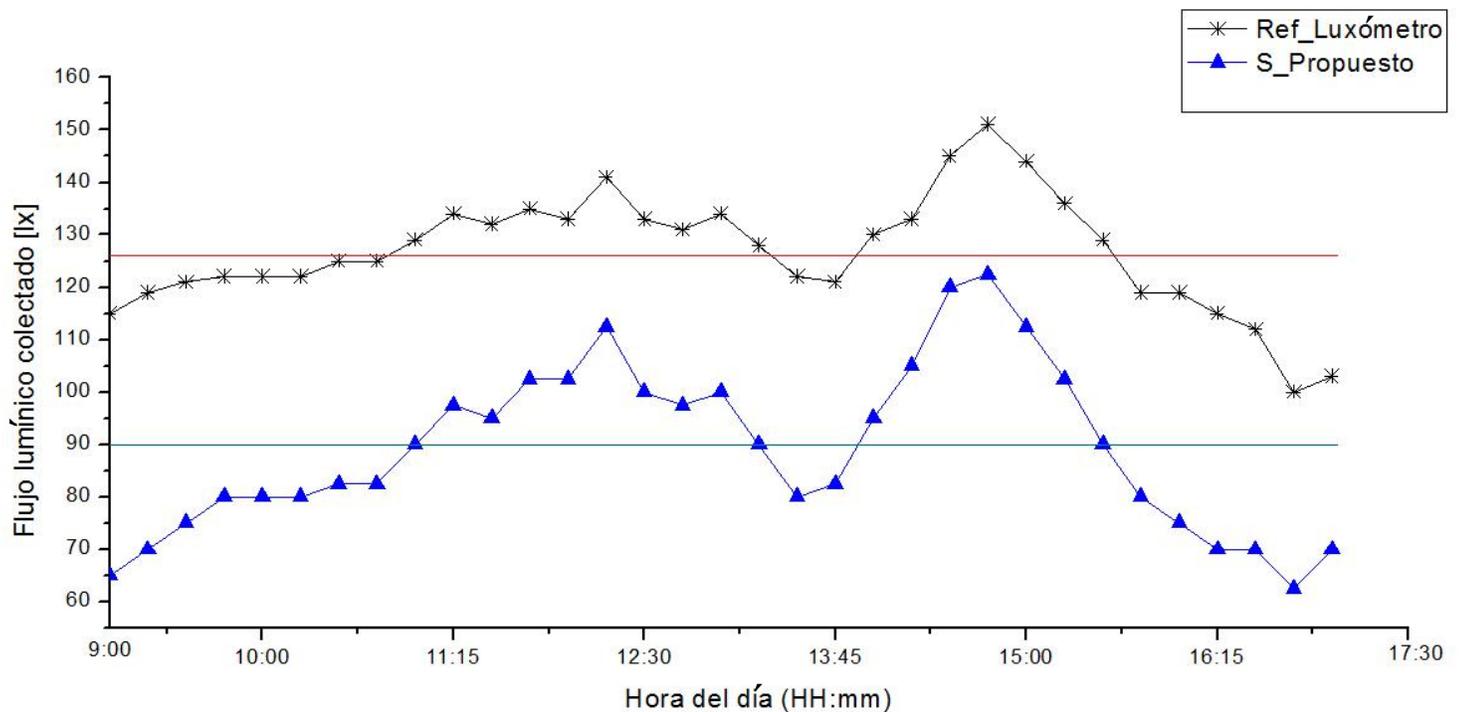
En la Figura 5.5 se muestra la gráfica obtenida a lo largo de este día, si observamos la gráfica con cruces (sistema de referencia), se ve que en algunos momentos del día se llega a más de 140 [lx], cabe resaltar que en este caso el luxómetro de referencia (luxómetro 2) depende del área del fotodetector 2 y el luxómetro usado para medir el sistema de colección de luz indirecta (luxómetro 1),

depende del área del bundle de fibra (así como del sistema de colección propuesto), que es 4.5 veces menor.

En la gráfica de la Figura 5.5 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es el flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado con el luxómetro 2 usado como referencia. Sus unidades están dadas en luxes (lx). Un resultado importante que hay que resaltar de la gráfica mostrada en la Figura 5.5 es que se muestra cuánto flujo lumínico hay disponible en la fachada del edificio, que podría ser aprovechado por el sistema propuesto. Si bien el sistema difuso se encuentra aproximadamente con una diferencia de 90 [lx] aproximadamente con respecto a la referencia, esto se debe a la diferencia de áreas entre el bundle B1 y el fotodetector 2 del luxómetro 2 (del cual su área es 4.5 veces mayor). Si usamos este factor de corrección de áreas, es decir si pudiéramos tener un bundle 4.5 veces mayor, se observa que la diferencia disminuye considerablemente (Figura 5.6).



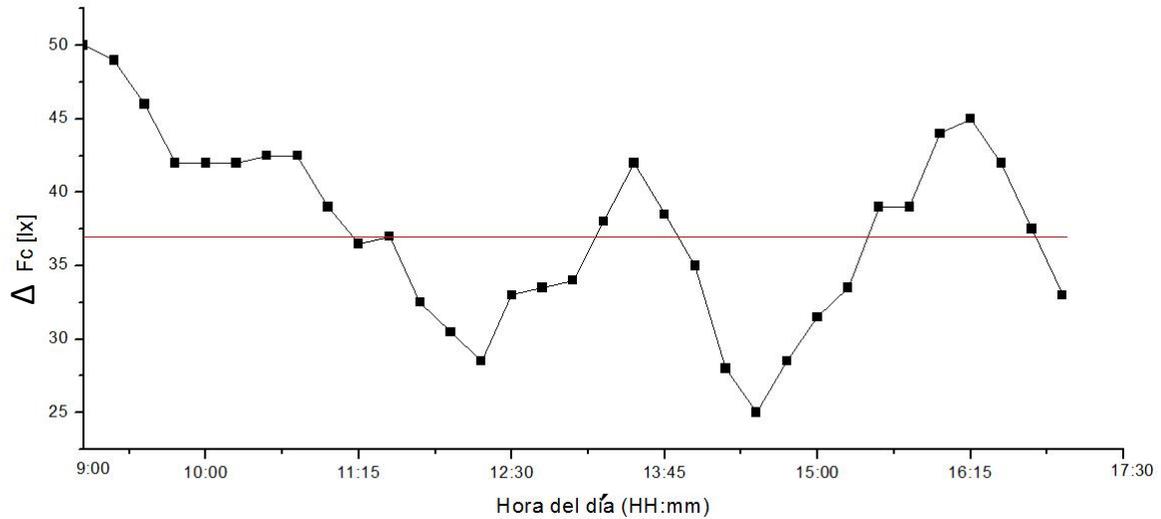
**Figura 5.5. Gráfica del flujo lumínico del sistema de colección de luz indirecta (puntos) y un luxómetro 2 como referencia (cruces). Las condiciones de iluminación natural las dio un cielo parcialmente nublado.**



**Figura 5.6. Gráfica del flujo lumínico colectado con un factor de corrección de áreas en el sistema de colección de luz indirecta y en el luxómetro 2 como referencia.**

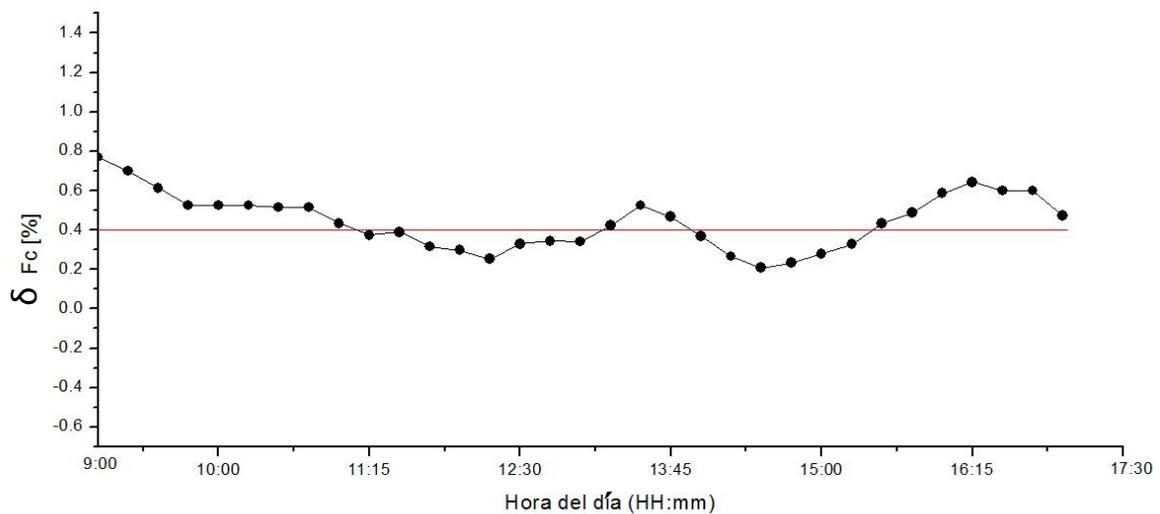
En la gráfica de la Figura 5.6 se tiene como eje X, la hora del día, (HH:mm). El eje Y es el flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta con el factor de corrección de áreas y el flujo colectado por el luxómetro 2 usado como referencia. Sus unidades están dadas en luxes (lx). La media del luxómetro 2 (cruces) es de 124 [lx] y la del sistema propuesto (triángulos) es de 90 [lx]. Se tiene una diferencia promedio de 34 [lx] entre ambos sistemas.

Se puede observar de la gráfica (Figura 5.6), que con el factor de corrección de áreas la diferencia entre el flujo disponible en la fachada y el flujo colectado en el sistema de luz indirecta disminuye, esto quiere decir que si aumentáramos el área del bundle B1 y el sistema de reflectores RT y RP, podríamos aprovechar de mejor manera el flujo lumínico disponible en la fachada. Como ya se mencionó anteriormente, esta diferencia se reduce de gran manera con el factor de corrección entre áreas, esta diferencia tiene una media de 34 [lx] entre ambos sistemas, como se muestra en la Figura 5.7. Lo cual se reduciría considerablemente añadiendo más sistemas con reflectores difusos y un bundle de FO independiente.



**Figura 5.7. Gráfica de la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de colección de luz indirecta y el luxómetro como referencia.**

En la gráfica de la Figura 5.7 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y, es la diferencia del flujo lumínico colectado ( $\Delta F_c$ ) en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado con el luxómetro usado como referencia.  $\Delta F_c$  se define en la ecuación 5.1. Se observa que la diferencia entre el sistema propuesto y el flujo disponible en la fachada es de 34[lx]. En porcentaje ( $\delta F_c$ ) esta diferencia es del 40% (Figura 5.8).  $\delta F_c$  se define en la ecuación 5.2.



**Figura 5.8. Gráfica de la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el**

**sistema de colección de luz indirecta y el luxómetro como referencia, mostrado en porcentaje.**

En la gráfica de la Figura 5.8 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado con el luxómetro 2 usado como referencia, mostrado en porcentaje ( $\delta Fc$ ). Se observa que la diferencia entre el sistema propuesto con el factor de corrección de áreas y el flujo disponible en la fachada es del 40%. Lo cual es un resultado alentador para el trabajo futuro en el desarrollo del sistema propuesto. Ya que si aumentáramos el área del bundle B1 y el sistema de reflectores RT y RP, podríamos aprovechar de mejor manera el flujo lumínico disponible en la fachada. Además de contar con un 40% de flujo adicional disponible.

La ecuación 5.1 muestra la diferencia del flujo lumínico colectado ( $\Delta Fc$ ), la cual está definida como la diferencia entre el flujo colectado en el sistema de colección de luz indirecta y el flujo colectado en el sistema de referencia. La ecuación 5.2 muestra esta misma diferencia en términos de porcentaje:

$$\Delta Fc = |Fc_{dif} - Fc_{ref}| \quad (5.1)$$

$$\delta Fc = \frac{|Fc_{dif} - Fc_{ref}|}{Fc_{ref}} \quad (5.2)$$

La segunda prueba se realizó comparando un sistema especular (referencia) con un sistema de colección de luz indirecta (Figura 5.9). El sistema especular cuenta con dos reflectores con un ángulo de 30° de inclinación entre ellos, el reflector especular trasero (RT\_especular) es un espejo de 55 [cm] \* 30[cm] y el reflector especular primario (RP\_especular) es un espejo de 30 [cm] \* 30 [cm]. Con el fin de verificar cómo es la colección de flujo lumínico por ambos sistemas. Ambos sistemas se encuentran bajo las mismas condiciones, con el mismo ángulo de inclinación en el RT (30°). Y con B1 y B2 respectivamente, los cuales como ya se mostró en el Capítulo 3, ambos bundles se comportan de manera muy similar.

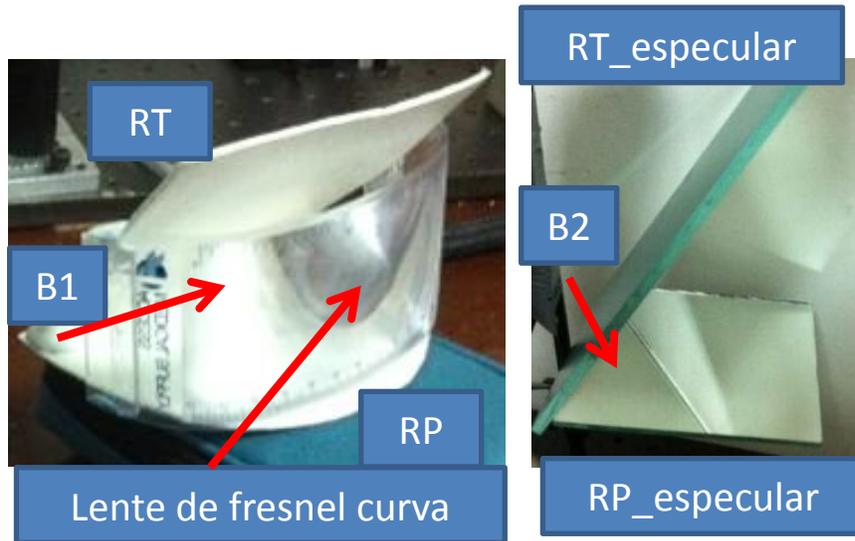


Figura 5.9. Sistema de colección de luz indirecta y sistema especular.

En la Figura 5.10 se muestran los resultados de esta segunda prueba. La gráfica con puntos (sistema de luz indirecta) siempre se encuentra por encima de la referencia, que es un sistema especular (gráfica con cuadros). Se registran valores máximos a las 11:45 AM y 12:30 AM con un valor de 50 [lx]. La media del sistema propuesto se encuentra en 37 [lx] y la media del sistema especular en 22 [lx].

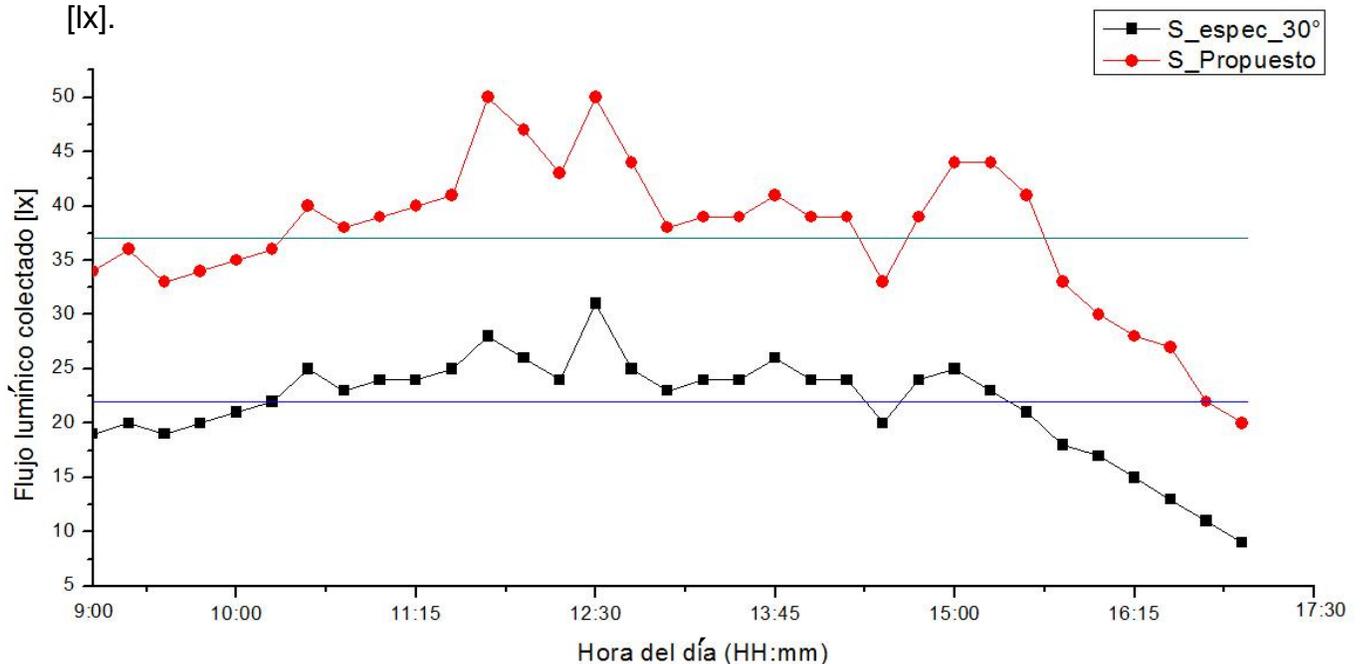


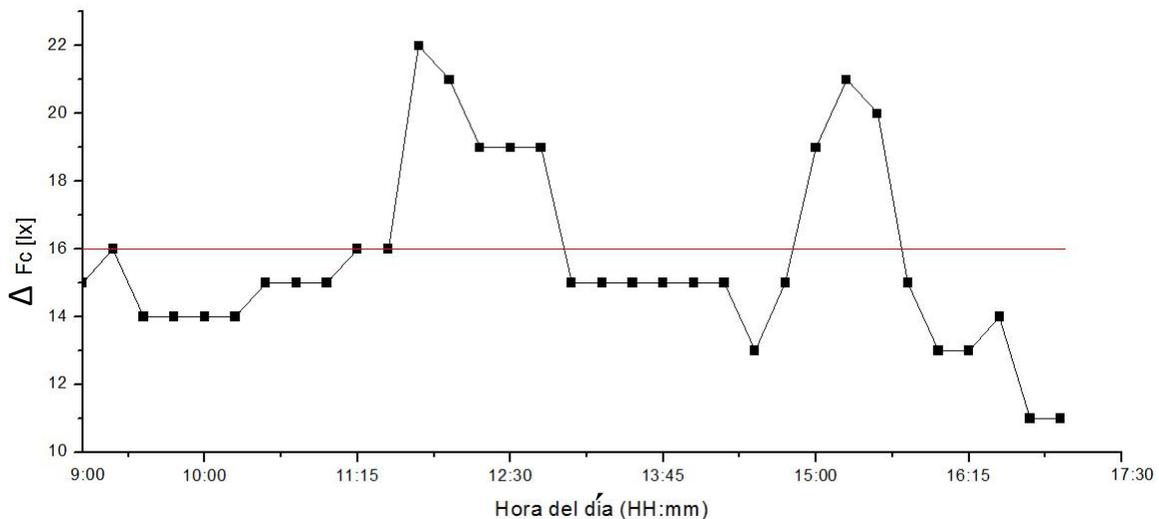
Figura 5.10. Gráfica del flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta (puntos) y el flujo colectado en un sistema especular como referencia (cuadros). Las condiciones de iluminación natural, las dio un cielo parcialmente nublado.

En la gráfica de la Figura 5.10 se tiene como eje X, el tiempo, en unidades HH:mm. El eje Y es el flujo lumínico colectado por el sistema de luz indirecta y el flujo colectado por un sistema especular usado como referencia.

La diferencia que existe entre ambos sistemas ronda entre los 12 [lx] – 24 [lx] con una media de 16 [lx] a lo largo del día (Figura 5.11), en este caso esta diferencia ya es considerable, porque ambos fotodetectores de los luxómetros 1 y 2 dependen de la misma área de colección (B1 y B2). Se observa que el sistema propuesto colecta aproximadamente el doble de flujo lumínico que un sistema formado por superficies especulares.

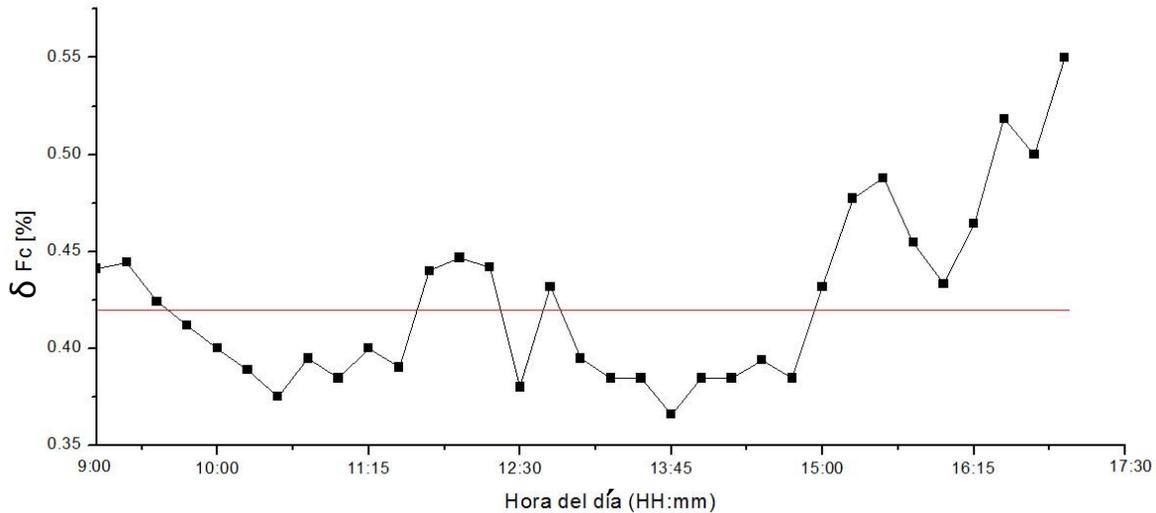
La diferencia entre ambos sistemas se aprecia mejor con la razón de diferencia porcentual (Figura 5.12). Se observa que esta diferencia es del 35 % – 55% a lo largo del día. El sistema de luz indirecta tiene una colección del 42% mayor (considerando la media) a un sistema especular en las mismas condiciones.

Los resultados de esta segunda prueba son relevantes porque muestran que bajo condiciones de luz no direccional, las superficies difusas en un sistema de colección de luz tienen un incremento del 42% al que se tendría en un sistema de colección con superficies especulares.



**Figura 5.11. Gráfica de la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado en un sistema especular usado como referencia.**

En la gráfica de la Figura 5.11 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es la diferencia del flujo lumínico en el sistema de luz indirecta y en un sistema especular usado como referencia.



**Figura 5.12. Gráfica de la razón de diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y un sistema especular como referencia.**

En la gráfica de la Figura 5.12 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta y el flujo lumínico colectado en un sistema especular usado como referencia.

## **5.2 Resultados obtenidos de las mediciones con F.O y el sistema de colección de luz indirecta.**

La tercera prueba que se realizó, consistió en ver el comportamiento del sistema de colección de luz indirecta, frente al bundle de F.O. B2 puesto a  $0^\circ$  (Figura 5.13) como sistema de referencia. La razón de esto, es porque se tiene la hipótesis de que bajo condiciones de iluminación difusa, las superficies especulares no ayudan significativamente a la colección del flujo lumínico en el bundle de F.O. Además como se mencionó en el capítulo 4, los bundles de FO por sí mismos colectan una gran cantidad de flujo lumínico. Bajo condiciones de luz indirecta, la máxima contribución a la colección de flujo lumínico está dada por los rayos que llegan al propio bundle de FO.

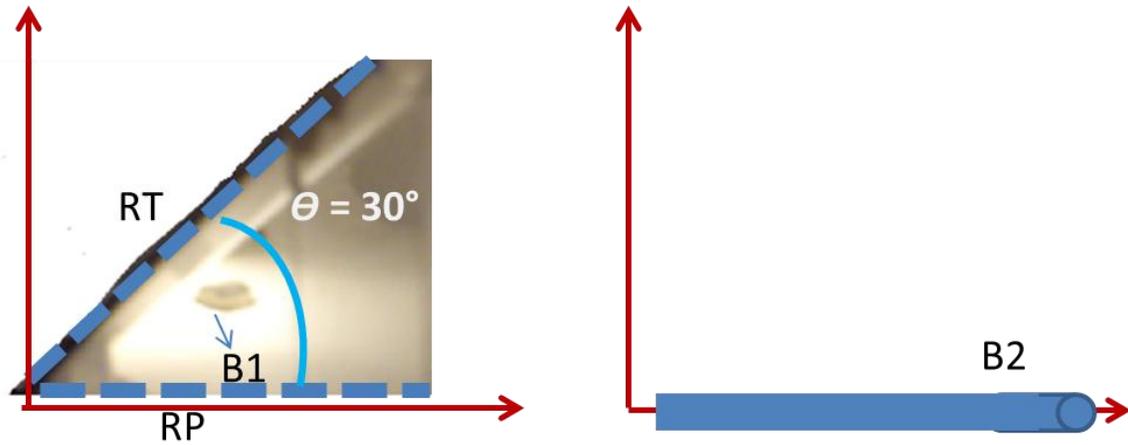


Figura 5.13. Sistema de colección de luz indirecta y el bundle de fibra óptica B2 a 0°.

Como se observa en la Figura 5.14, la gráfica del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta (gráfica de cruces) al igual que en la prueba anterior (Figura 5.10), el sistema de luz indirecta siempre se mantiene arriba de la referencia a lo largo del día.

La referencia es B2 puesto a 0°, se tuvo con una media de alrededor de 15 [lx] a lo largo del día. Con estos resultados se concluye que bajo las condiciones de iluminación con una fuente de luz indirecta, las superficies reflectoras difusas, mejoran un 54% - 55% la colección de flujo lumínico.

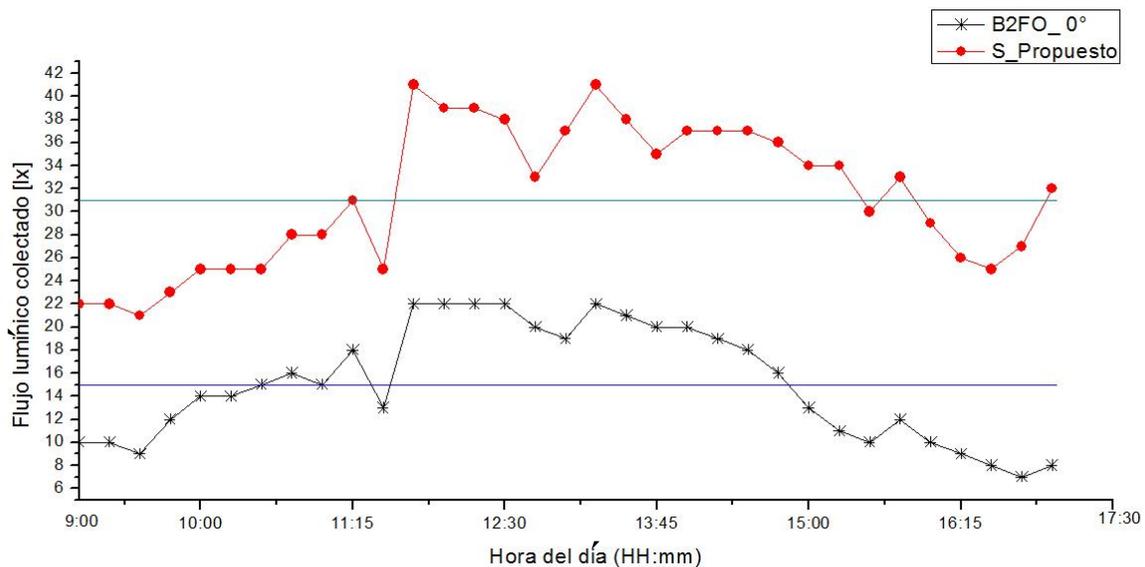
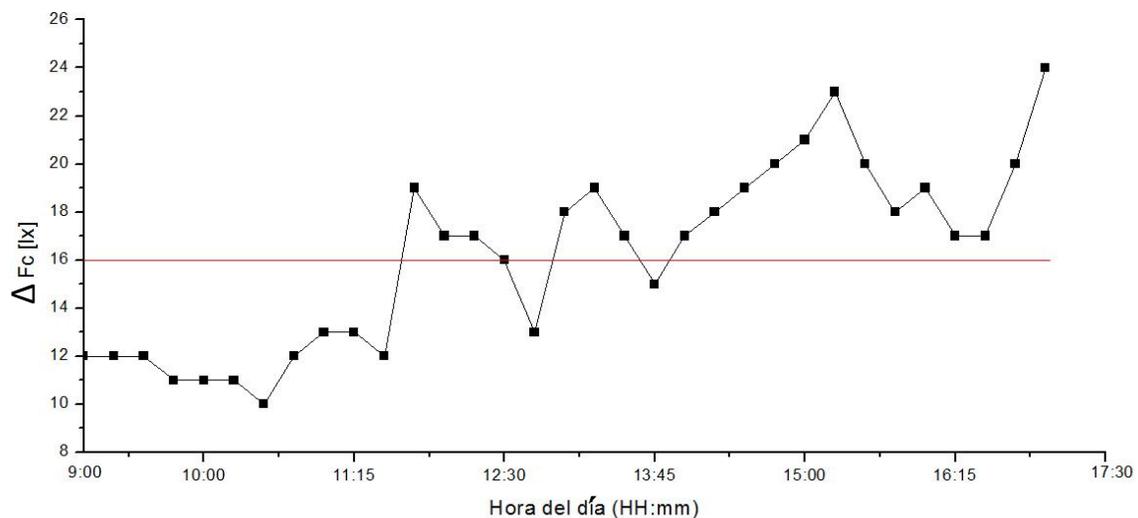


Figura 5.14. Gráfica del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta (puntos) y en el B2 a 0° usado como referencia (cruces). Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.

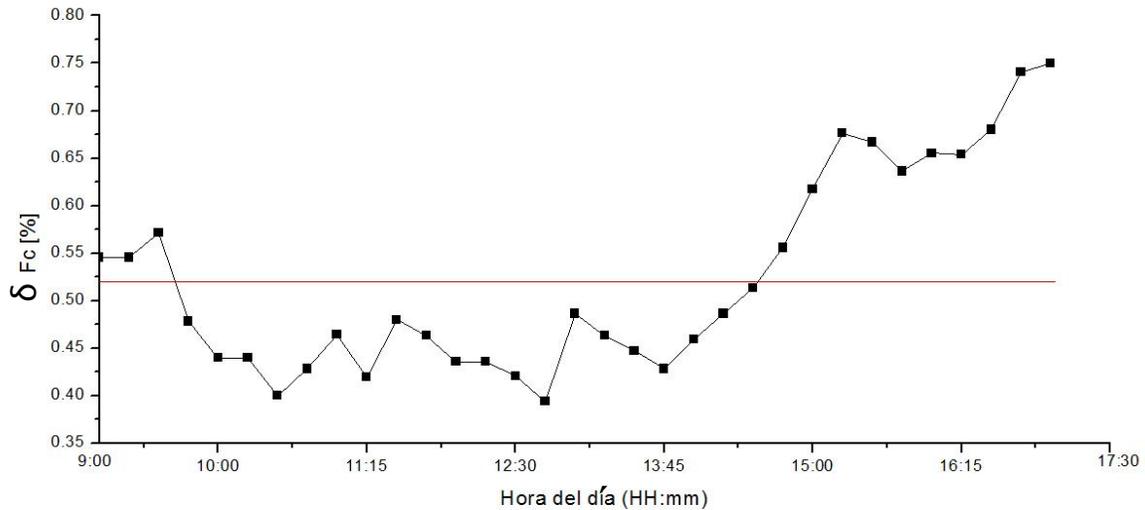
En la gráfica de la Figura 5.14 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es el flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y el flujo colectado por el bundle B2 de F.O a 0° usado como referencia. Como en las pruebas anteriores, se observa que el sistema de colección de luz indirecta varía entre 25 [lx] – 42 [lx] a lo largo del día. Si observamos la gráfica 5.15, la media de la diferencia de colección entre el sistema propuesto y el bundle B2 de FO es de 16 [lx]. La cual es la misma diferencia que se obtuvo entre el sistema propuesto y el sistema especular (Figura 5.11). Si lo vemos en porcentaje (Figura 5.16), el sistema propuesto colectó 52% más flujo lumínico que el bundle de FO.

El hecho de que la diferencia es prácticamente la misma con el sistema especular y el bundle B2 de FO puesto a 0°, indica que bajo las condiciones de iluminación de luz no direccional, las superficies especulares no ayudan considerablemente en la colección de dicha luz.

Este resultado es importante ya que se encontró prácticamente el mismo resultado (en flujo luminoso) si hay superficies especulares o no las hay. La mayor contribución a la colección en el sistema especular es por el propio bundle B2 de FO.



**Figura 5.15. Gráfica de la diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.**



**Figura 5.16. Gráfica de la razón de diferencia entre flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.**

En la Figura 5.15 se tiene en el eje X la hora del día (HH:mm). En el eje Y se tiene la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y el bundle B2 de FO puesto a 0° usado como referencia. En unidades de luxes (lx).

En la Figura 5.16 se tiene en el eje X la hora del día (HH:mm). En el eje Y se tiene la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y el bundle B2 de FO puesto a 0° usado como referencia. Mostrado como porcentaje.

La cuarta prueba realizada, es muy similar a la tercera, sólo que en este caso el bundle B2 de referencia se colocó con una inclinación de 30°. (Figura 5.17).

Lo interesante de esta prueba, fue que las condiciones climáticas cambiaron, ya que hasta ahora todas las condiciones habían sido dadas por un cielo parcialmente nublado. En este caso se tuvo un día bastante soleado y despejado.

Aunque las condiciones perfectas de luz difusa, son esencialmente las de un día nublado, esta prueba sirve para mostrar que el sistema de colección de luz indirecta propuesto, también funciona en condiciones de un día soleado.

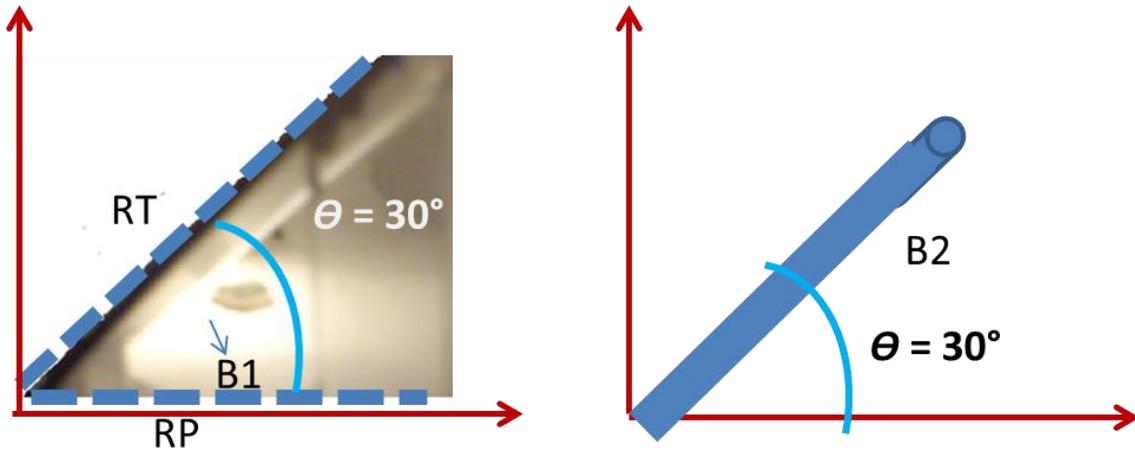


Figura 5.17. Sistema de colección de luz indirecta y el bundle de fibra óptica B2 a 30°.

En la Figura 5.18 se muestran dos gráficas, la gráfica con puntos, representa el sistema de colección de luz indirecta, el cual siempre se encuentra por encima de la referencia (gráfica con cruces). A las 2:00 PM se registró un máximo de 100 [Ix], el valor máximo registrado en todas las pruebas hechas en la fachada. El cual es aproximadamente 50% más que en todas las pruebas realizadas en condiciones de un día parcialmente nublado. El sistema de luz indirecta (gráfica con puntos) varía de 40 [Ix] – 100 [Ix] a lo largo del día. Y la referencia varía de 25 [Ix] – 50 [Ix], lo que coincide con los resultados anteriores, en los que el sistema colecta aproximadamente el doble de flujo lumínico que la referencia utilizada.

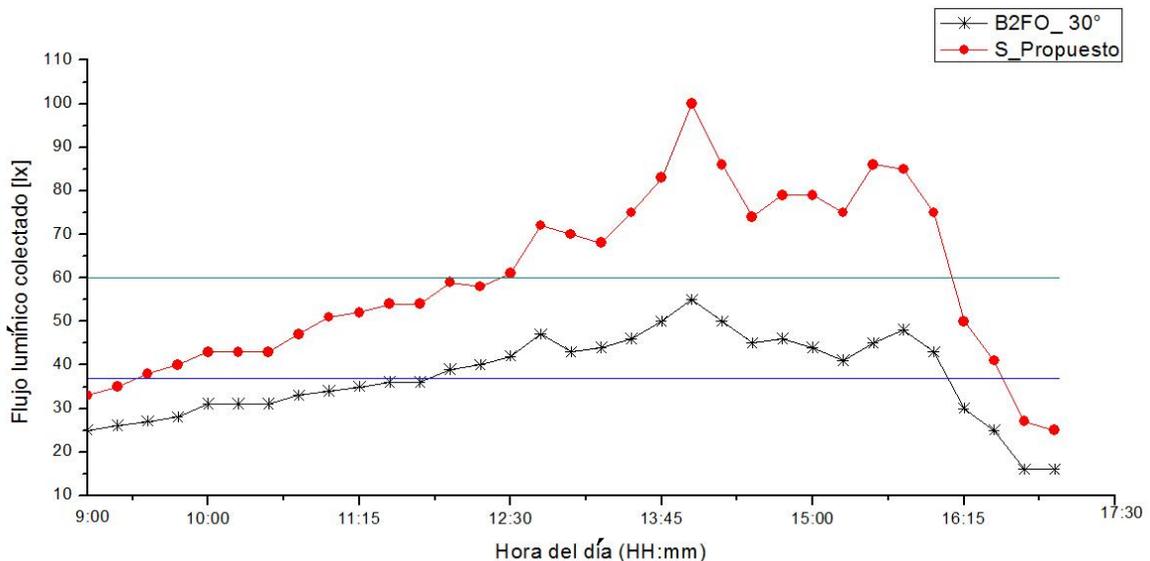
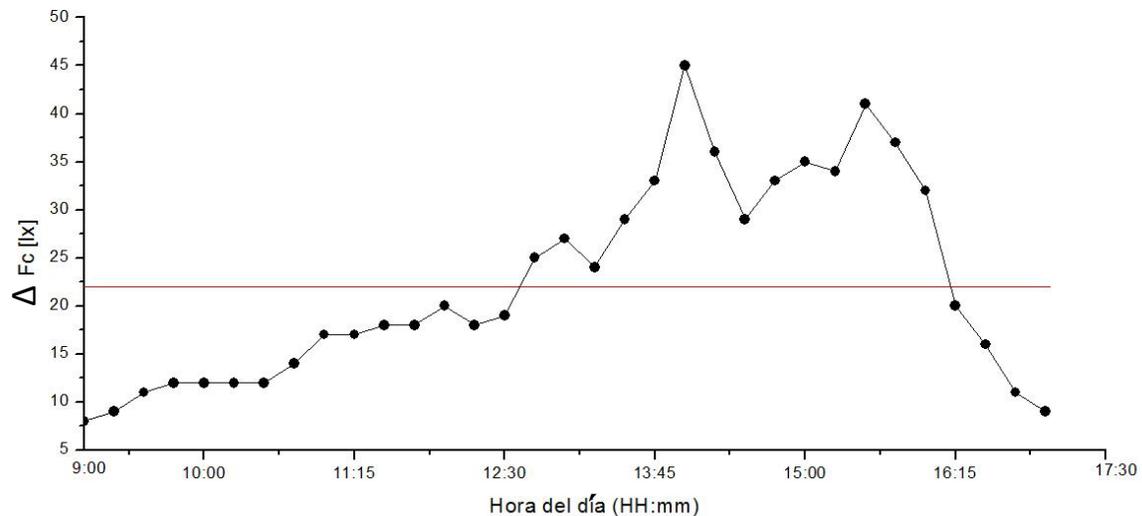


Figura 5.18. Gráfica del flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta (cruces) y B2 como referencia a 30° (puntos). Las condiciones de iluminación natural las dio un cielo soleado.

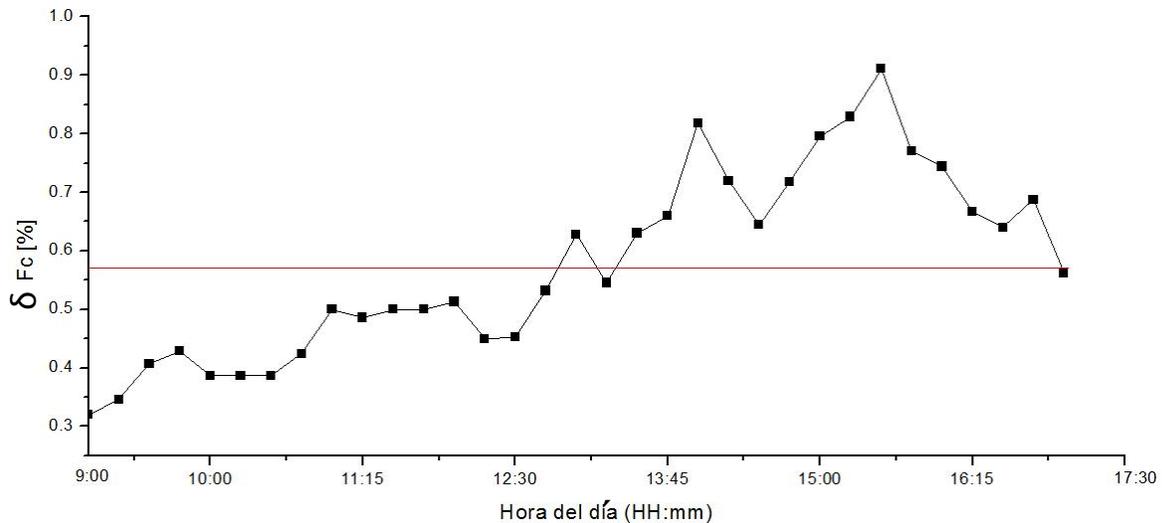
En la gráfica de la Figura 5.18 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es el flujo lumínico colectado en el sistema de luz indirecta y en el bundle B2 de F.O a 30° usado como referencia.

La media de la diferencia de colección entre ambos sistemas fue de 22 [lx] a lo largo del día (Figura 5.19). Vista como porcentaje esta diferencia fue del 55% (Figura 5.20). Resultados muy similares a los de la prueba anterior. Sin embargo hay que recalcar que en este caso las condiciones climáticas cambiaron, si comparamos la gráfica de la Figura 5.18 (día soleado), con la gráfica de la Figura 5.14 (día nublado), se observa que la respuesta del sistema propuesto en un día soleado es mucho más homogénea, es decir el flujo lumínico se mantiene con menos variaciones a lo largo de la mayor parte del día.

Es importante resaltar que en esta prueba el sistema propuesto de colección de luz indirecta, no sólo colecta luz difusa (en un día nublado), también colecta de manera muy eficiente luz indirecta y directa de un día soleado.



**Figura 5.19. Gráfica de la diferencia del flujo lumínico entre el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 0° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.**



**Figura 5.20. Gráfica de la razón de diferencia entre flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta y en el B2 a 30° usado como referencia. Las condiciones del día las dio un cielo parcialmente nublado.**

En la Figura 5.19 se tiene en el eje X la hora del día (HH:mm). En el eje Y se tiene la diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y el bundle B2 de FO puesto a 30° usado como referencia. En unidades de luxes (lx).

En la Figura 5.20 se tiene en el eje X la hora del día (HH:mm). En el eje Y se tiene la razón de diferencia del flujo lumínico colectado en el sistema propuesto y el bundle B2 de FO puesto a 30° usado como referencia. Mostrado como porcentaje.

Finalmente en la quinta prueba realizada, se montaron dos sistemas de colección de luz indirecta, uno a 30° como en todas las pruebas anteriores y uno a 40° (Figura 5.21). El fin de esta prueba fue verificar que el sistema propuesto es escalable si introducimos más colectores traseros y reflectores primarios en sistemas independientes. Cabe resaltar que el día en que se realizó esta prueba, el cielo estaba completamente nublado.

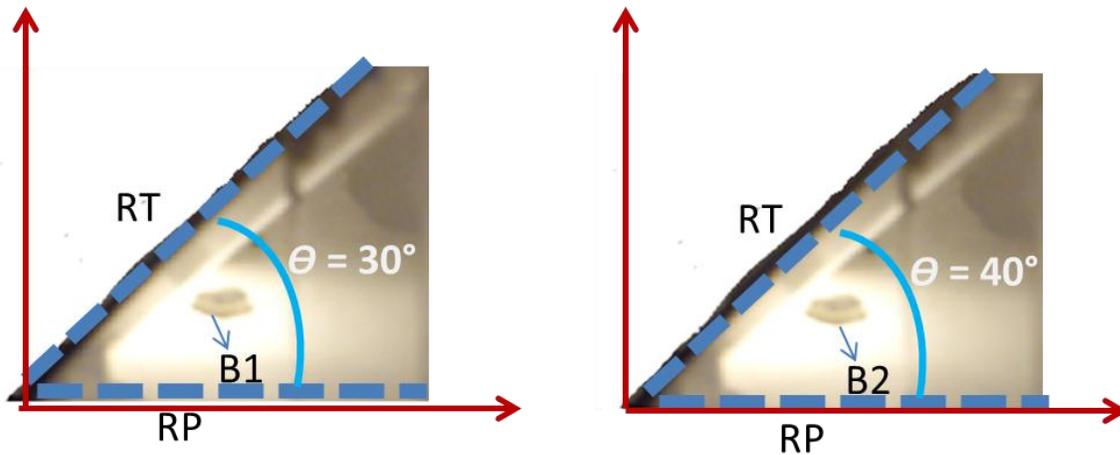


Figura 5.21. Sistemas de colección de luz indirecta con colectores difusos, uno a 30° y otro a 40°.

Los resultados que arrojó esta prueba se muestran en la Figura 5.22, en este caso se observa que ambas gráficas (cruces y puntos), se mantienen muy cercanas a lo largo del día. Un resultado muy importante que arrojó esta prueba es la forma muy plana que se tiene en las gráficas. Podemos observar que aproximadamente del período de las 12:00 AM a las 3:00 PM, ambas gráficas se mantuvieron con muy poca variación a 42 [lx]. A diferencia de otras pruebas, en este día el cielo se mantuvo completamente nublado, lo que significa flujo lumínico con menor intensidad. Aun así, los sistemas tuvieron un comportamiento inclusive mejor en estas condiciones que en las condiciones de cielo parcialmente nublado.

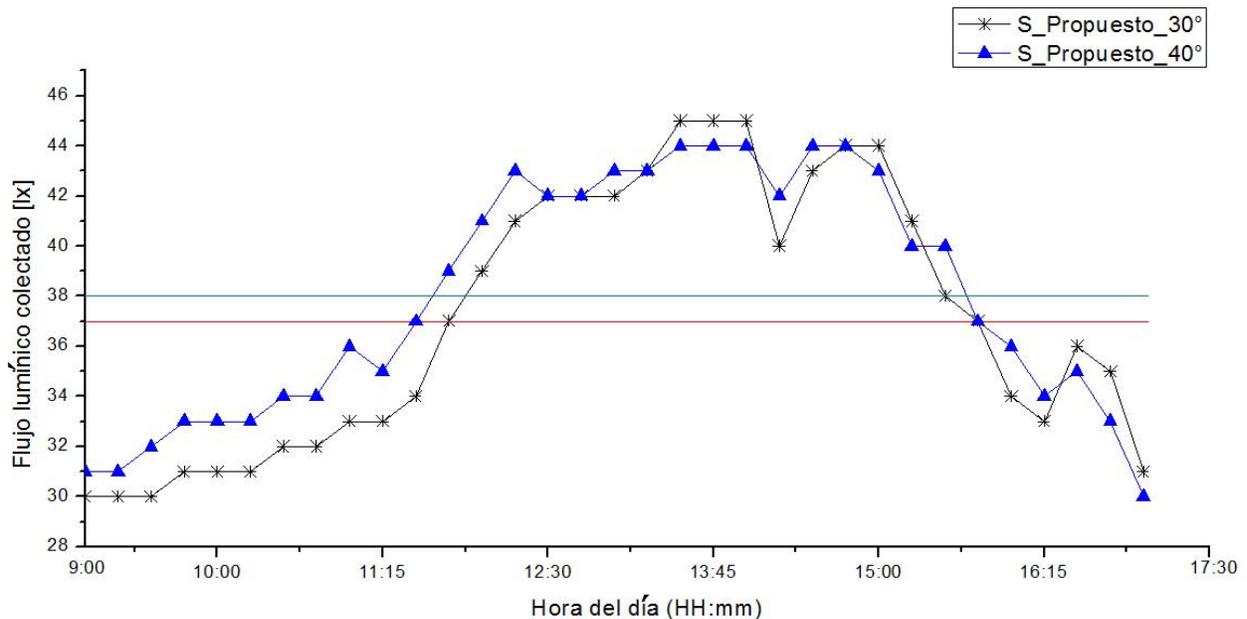
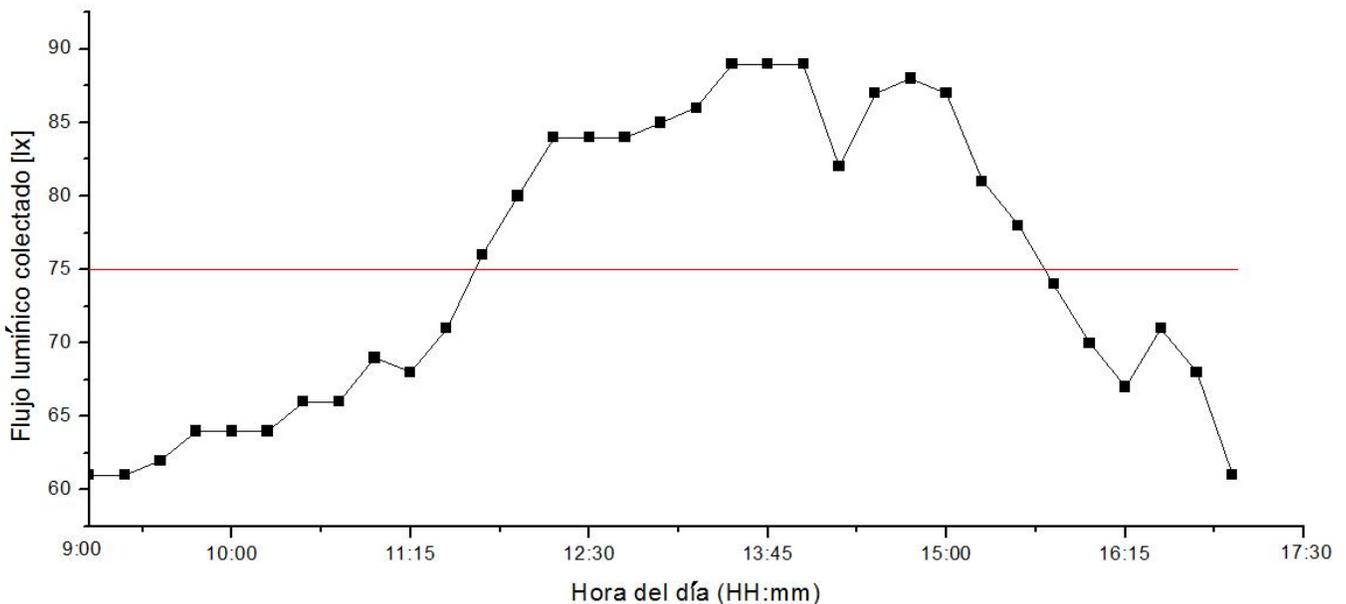


Figura 5.22. Gráfica del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta a 30° (cruces) y un sistema de colección de luz indirecta a 40° (triángulos). Condiciones de iluminación natural dadas por un cielo completamente nublado.

En la gráfica de la Figura 5.22 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y es el flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta a 30° y el flujo colectado en un sistema de luz indirecta a 40°. Se verifica la escalabilidad y se observa que prácticamente no hay diferencia entre un sistema de 30° o 40°. Finalmente si se suman los valores obtenidos de ambas gráficas, se obtiene un resultado bastante alentador (Figura 5.23).

La gráfica de la Figura 5.23 varía entre 60 [lx] – 90 [lx] a lo largo del día, este es uno de los resultados más importantes, ya que se demuestra que es posible tener un sistema de colección de luz indirecta que cumpla con los estándares mínimos de iluminación del organismo regulador CIE [11]. El cual indica que para un cuarto habitación, el mínimo valor de flujo lumínico que debe haber en dicho cuarto es 100 [lx].



**Figura 5.23. Gráfica de la suma del flujo lumínico en el sistema de colección de luz indirecta a 30° y en el sistema de colección de luz indirecta a 40°.**

En la gráfica de la Figura 5.23 se tiene como eje X, la hora del día (HH:mm). El eje Y (es la suma del flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta a 30° y el flujo lumínico colectado en un sistema de luz indirecta a 40°).

En este capítulo, se comparó un sistema especular con un sistema difuso. Se encontró que las superficies difusas son 50% más eficientes en coleccionar flujo lumínico que las superficies especulares, bajo condiciones de iluminación no direccional. En todas las pruebas el sistema de luz indirecta se mantuvo por encima. Uno de los aspectos más importantes en este capítulo es el comportamiento que muestra el sistema de luz indirecta en todas sus gráficas. El cual es homogéneo a lo largo de todo el período muestreado en el día. Esto es justamente una necesidad que se pretende cubrir con el sistema propuesto.

La última prueba demostró que el sistema puede escalarse, con lo que se logró obtener un período de las 12:00 AM a las 15:00 PM con un flujo lumínico de 75 [lx] a 90 [lx], lo que indica que es factible que el sistema propuesto pueda cumplir el estándar de la CIE de 100 [lx] para iluminación de interiores.

---

# Conclusiones.

---

En este trabajo se estudió la naturaleza de la luz proveniente de las fachadas, con base en este análisis se propuso un sistema de colección usando reflectores difusos. Se encontró con base en simulaciones numéricas hechas en el software de traza de rayos ZEMAX, que el ángulo óptimo de colección de luz indirecta entre dos superficies difusas está entre  $\theta = 30^\circ - 50^\circ$ . Otro resultado importante de estas simulaciones, fue que la zona en el reflector trasero (RT) y el reflector primario (RP) donde se concentra la mayor cantidad de flujo lumínico es en el vértice entre ambos reflectores difusos.

Después se verificó de manera experimental, en condiciones controladas de laboratorio, que el ángulo  $\theta$  donde se colecta mayor flujo lumínico está en  $\theta = 30^\circ$  entre RT y RP. Para mejorar aún más esta colección, se incluyó una lente de fresnel curva con foco de 10 cm. Con esta mejora se registró un incremento en la colección del flujo lumínico de 96%. En este capítulo también se presentó la parte de transporte, con dos manojos de fibra óptica, B1 y B2, los cuales registran pérdidas de propagación del 30%, debidas al proceso de armado de los manojos en el laboratorio.

Con base en los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas y la caracterización en el laboratorio se desarrolló un sistema de colección de luz difusa e indirecta. Finalmente en el capítulo 5 se presentaron los resultados del comportamiento del sistema propuesto comparándolo con otros sistemas de referencia. Los resultados arrojaron que el sistema propuesto tiene un comportamiento con una buena colección en un período largo de tiempo (6 horas), también se encontró que el sistema propuesto se aumenta un 50% la colección del flujo lumínico que un sistema con superficies especulares. De hecho la mayor contribución en la colección de luz que se tiene en un sistema especular proviene de los rayos que inciden directamente en el bundle de fibra óptica y no por las superficies especulares.

En la última prueba si se suma el flujo colectado en el sistema de colección de luz indirecta a 30° y a 40° (Figura 5.23). Esta gráfica tuvo una media de 75 [lx] a lo largo del día, y en el período de 11:00 – 15:30 aproximadamente, se alcanzó una colección de 90 [lx] por ambos sistemas. Este resultado indica que es posible escalar el sistema propuesto con más reflectores independientes, para alcanzar los requerimientos de los estándares de iluminación. 100 [lx] para un cuarto habitación según el estándar del CIE.

Cabe resaltar que el sistema propuesto no afecta la estructura del edificio, está pensado para instalarse fácilmente en las fachadas de éstos.

El sistema propuesto, es un sistema pasivo, de costo muy bajo y de dimensiones muy pequeñas comparado con otros sistemas de colección de luz solar. Además de funcionar con luz solar indirecta, colectando flujo lumínico incluso en días nublados. Estas características le dan una ventaja muy grande frente a muchos sistemas de colección de luz solar que existen actualmente.

---

# Perspectivas.

---

Este trabajo usó superficies lambertianas, con la idea de usar este tipo de superficies en un sistema de colección pasivo, se dio un buen avance en la etapa de colección (reflector trasero y un reflector primario con un ángulo  $\theta = 30^\circ$  entre ambos) y en la etapa de concentrar dicha luz colectada en un punto, mediante una lente de fresnel. Se propone el uso de CPC (Compound Parabolic Collector) por su amplio ángulo de aceptación para mejorar la etapa de colección. Sin embargo el costo del sistema se elevaría por el alto costo de este componente.

En la etapa de transporte será necesario estudiar otros medios y mejorar las pérdidas que se registraron en este trabajo (30%). Se propone el uso de tubos de acrílico usados como guías de luz. Se propone acrílico por ser un material con una relativa buena transparencia, es un material de fácil maquinado y de bajo costo. También se propone escalar acumulando la colección con varios sistemas como el propuesto puestos en paralelo. Ya que la mayor concentración de flujo lumínico se registró en la zona del vértice entre los reflectores. Se propone poner una guía de luz (*taper*) a lo largo de todo el vértice entre reflectores y de igual dimensión que dichos reflectores, con esto se pretende sustituir el bundle de fibra óptica y aprovechar completamente la zona del vértice. Se espera con esta mejora sea más eficiente el transporte de la luz colectada hacia el interior de un recinto.

Finalmente también se debe estudiar cómo esparcir la luz de la mejor manera, para poder crear una sensación de bienestar con una correcta iluminación en el espacio de los ocupantes de un recinto.

---

# Referencias.

---

- [1] Ruck N., Aschehoug Ø. Aydinli S. *Daylight in buildings*. International Energy Agency. Washington, D.C. 2009.
- [2] 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.
- [3] Parans®, Parans - SP3, Suiza, 2004. [Fecha de consulta: septiembre del 2013.] <<http://www.parans.com/eng/about/>>
- [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.
- [5] Solar Tube®, Products, USA, 2001. [Fecha de consulta: septiembre del 2013.] <<http://www.solartube.com/>>.
- [6] 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.
- [7] F. Linhart ; S. K. Wittkopf ; M. Münch and J. L. Scartezzini. *Recent research on anidolic daylighting systems: highly reflective coating materials and chronobiological properties*. SPIE Vol. 7423 74230K-2 2010.
- [8] Walsh J. *Photometry*. New York. Dover Publications. 1958. pp. 136-152.

- [9] Winston R., Miñano J. Benítez P. *Non-imaging optics*. University of California. Merced, California. 2005. pp. 43-67
- [10] García Cadena, Carlos A. *Colector de luz solar indirecta para la iluminación de interiores*. Tesis de maestría. Posgrado de Ingeniería Eléctrica, UNAM. México D.F. 2013.
- [11] *CIE S 010/E:2004. The CIE System of Physical Photometry*. Commission Internationale de l'Eclairage. Vienna 2004.
- [12] Gieck K. *Manual de fórmulas técnicas*. 18a Edición. Representaciones y Servicios de Ingeniería, 1981. T1-T2.
- [13] J. Walsh. *Photometry*. New York. Dover Publications. 1958. pp. 136-52.
- [14] 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.
- [15] A. E. Mills. *Heat Transfer*. New Jersey. Prentice Hall. 1999. pp. 538-591.
- [16] J. F. Blinn. *Models of light reflection for computer synthesized pictures*. Proceedings: Computer graphics and interactive techniques. ACM. New York. pp. 192-198.
- [17] K. E. Torrance, E. M. Sparrow. *Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*. 1967. JOSA. Vol. 57 Iss. 9. pp. 1105-1112.
- [18] L. Hisen-Che, E. J. Breneman. *Modeling light reflection for computer color vision*. 1990. IEEE. Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 12. Iss. 4.

[19] F. Grum. *Optical radiation measurements*. New York. Academic Press. 1979. pp.37-101.

[20] García Cadena Carlos, Sánchez-Pérez Celia, García-Valenzuela Augusto, Cuevas Cardona Salvador., CCADAET, UNAM. "Indirect light collector for interior lighting". ISES Solar World Congress, 2013.

[21] N. Knighton, B. Bugbee. *Mixture of Barium sulfate and White Paint is a low-cost substitute reflectance standard for Spectralon®*. Utah State University. 2000.