



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**AREA TÉCNICA**

TITULACIÓN DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

**Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación  
natural usando fibra óptica**

**TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

**AUTOR:** León Guarnizo, Cristian Javier

Veintimilla Ludeña, Juan Carlos

**DIRECTOR:** Jaramillo Pacheco, Jorge Luis, Ing.

**LOJA - ECUADOR**

**2013**

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

Ingeniero.

Jorge Luis Jaramillo Pacheco.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de fin de titulación: "Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación natural usando fibra óptica", realizado por León Guarnizo Cristian Javier y Veintimilla Ludeña Juan Carlos, ha sido orientado y revisado durante su ejecución por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, diciembre de 2013

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, León Guarnizo Cristian Javier y Veintimilla Ludeña Juan Carlos, declaramos ser autores del presente trabajo de fin de titulación: Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación natural usando fibra óptica, de la Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco, director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. ....

Autor: León Guarnizo Cristian Javier

Cédula: 1104740327

f. ....

Autor: Veintimilla Ludeña Juan Carlos

Cédula: 1104000763

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes con su gran espíritu de bondad y fortaleza fueron mi motivación para el desarrollo de esta investigación, y a mi pequeño sobrino Joaquín cuyas noches de desvelo creó el escenario justo para inspirarme.

Cristian Javier León Guarnizo

A Dios por su soplo de vida, a mis padres y hermanos, por haber esperado mis logros desde que nací, a mi esposa por su preocupación diaria y especialmente a mi hijo Luis Gabriel a quien le ofrezco mi esfuerzo continuo por ver su superación.

Juan Carlos Veintimilla Ludeña

## AGRADECIMIENTO

A nuestros padres y hermanos que estuvieron apoyándonos en cada etapa de nuestra formación académica y espiritual, y que sobretodo nos han acompañado en el proceso de desarrollo de este trabajo.

Un extenso agradecimiento a los docentes de la Titulación de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones por compartir con nosotros sus conocimientos y sabias experiencias profesionales y personales, en especial al Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco por ser un guía fundamental, y dedicar su tiempo y paciencia para el desarrollo de este trabajo de fin de titulación.

A todos nuestros amigos y compañeros de la titulación por haber formado parte de este proceso que involucra nuestro desarrollo personal.

Cristian.

Agradecer es una palabra que trae consigo un cúmulo de sensaciones, tantas personas buenas a nuestro alrededor que es difícil nombrarlos uno a uno; pero trataré de resumir lo más posible el agradecimiento a cada persona que de una u otra manera ha contribuido a mi formación profesional y personal.

De la manera más adecuada empezaré agradeciendo creyentemente a Dios, por haberme dado el soplo de vida y proporcionado unos Padres maravillosos Matilde y Luis, responsables y entregados a cada paso en mi formación desde mis primeros años hasta hoy, indudablemente nuestras familias han influido también para ser quienes somos, el agradecimiento sincero a mis hermanos por haber estado ahí cuando más los he necesitado Jorge y Jaime.

Los últimos años de mi vida fui bendecido con una esposa maravillosa Mariuxi, gracias por tu entrega diaria y preocupación por mi carrera; sin duda también a nuestro hermoso hijo Luis Gabriel, gracias por tus sonrisas diarias que nos dan la fuerza para continuar, y sin dudarle gracias a todos los docentes por haber impartido sus conocimientos y experiencias; por otro lado mil gracias a mi director de tesis Ing. Jorge Luis Jaramillo por su paciencia y conocimientos impartidos para la culminación de este documento.

Gracias, Por siempre Gracias

Juan Carlos.

## INDICE DE CONTENIDOS

CARATULA .....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE DE CONTENIDOS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABLAS.....	xii
OBJETIVOS .....	4
CAPÍTULO 1.....	4
ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA EMPLEADA EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL, QUE APROVECHAN LA LUZ SOLAR .....	4
1.1.    Introducción .....	5
1.2.    Sistemas de Iluminación Natural .....	5
1.2.1.    Nociones generales de luminotecnia.....	5
1.2.1.1.    Flujo Luminoso. ....	5
1.2.1.2.    Iluminancia. ....	5
1.2.2.    Clasificación de los sistemas de iluminación .....	6
1.2.3.    Sistemas de iluminación natural.....	7
1.2.4.    Arquitectura de los sistemas de iluminación natural .....	9
1.2.4.1.    Colector o concentrador .....	9
1.2.4.2.    Transportador .....	10
1.2.4.3.    Extractor o emisor de luz.....	11
1.2.5.    Sistemas de iluminación tipo SIFO.....	12
1.3.    Características funcionales de los sistemas de iluminación natural tipo SIFO .....	12
1.3.1.    Concentrador basado en lentes de Fresnel .....	12
1.3.2.    Transportador de fibra óptica .....	13
1.3.3.    Extractores, difusores, o, terminales .....	14
CAPÍTULO 2.....	16
DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR EXPERIMENTAL PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL CON FIBRA ÓPTICA, BASADO EN LA UTILIZACIÓN DE LENTES DE FRESNEL.....	16
2.1.    Introducción .....	17
2.2.    Generalidades de los concentradores solares empleados en sistemas de iluminación natural.....	17
2.2.1.    Sobre los concentradores solares .....	17

2.2.2.	Parámetros básicos de los concentradores .....	18
2.2.2.1.	Capacidad de recolección .....	18
2.2.2.2.	Relación de concentración .....	18
2.2.2.3.	Distancia focal .....	19
2.2.3.	Lentes de Fresnel .....	19
2.2.4.	Materiales empleados en la fabricación de lentes de Fresnel .....	21
2.2.4.1.	Acrílico .....	22
2.2.4.2.	Vinilo rígido .....	22
2.2.4.3.	Polycarbonato .....	23
2.2.5.	Concentradores basados en la utilización de lentes de Fresnel .....	23
2.3.	Seguidores solares .....	24
2.3.1.	Tipos de seguidores solares .....	25
2.3.1.1.	Seguidor solar pasivo .....	25
2.3.1.2.	Seguidor solar activo .....	25
2.3.1.2.1.	Seguidor solar de un eje, azimutal. ....	26
2.3.1.2.2.	Seguidor solar de un eje, horizontal. ....	26
2.3.1.2.3.	Seguidor solar de un eje, polar. ....	27
2.3.1.2.4.	Seguidor solar de dos ejes. ....	27
2.3.2.	Métodos de seguimiento solar .....	28
2.3.2.1.	Seguimiento por sensores .....	28
2.3.2.2.	Seguimiento por reloj solar .....	28
2.3.2.3.	Seguimiento por coordenadas calculadas .....	28
2.4.	Diseño del concentrador solar .....	29
2.4.1.	Criterios de diseño de un colector solar .....	29
2.4.2.	Selección de la lente de Fresnel .....	29
2.4.3.	Determinación de la distancia focal .....	30
2.4.4.	Diseño del seguidor solar .....	32
CAPÍTULO 3 .....		34
DISEÑO DE TERMINALES PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL, APROVECHANDO LUZ SOLAR .....		34
3.1.	Introducción .....	35
3.2.	Terminales de iluminación acoplables a líneas de fibra óptica .....	35
3.2.1.	Puerto óptico .....	35
3.2.2.	Dispensor de luz .....	36
3.2.3.	Lente de amplificación .....	37
3.3.	Diseño de prototipos de terminales y análisis de desempeño .....	37
3.3.1.	Prototipo A .....	38
3.3.2.	Prototipo B .....	39
3.3.3.	Prototipo C .....	40

3.3.4. Prototipo D.....	41
3.3.5. Optimización del diseño .....	42
CAPÍTULO 4.....	45
IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA SOLAR Y LENTES DE FRESNEL .....	45
4.1. Introducción .....	46
4.2. Implementación del sistema experimental.....	46
4.2.1. Diagrama funcional del sistema .....	46
4.2.2. Implementación del sistema .....	47
4.3. Valoración del desempeño del sistema experimental .....	50
4.3.1. Valoración del desempeño del prototipo del concentrador-seguidor de Fresnel ..	51
4.3.2. Valoración del desempeño del arnés de fibra óptica .....	52
4.3.3. Difusor .....	53
CONCLUSIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXO 1 .....	59
PAPER 1: Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación natural usando fibra óptica .....	59
I. Introducción .....	60
II. Generalidades de los sistemas de iluminación .....	60
A. Sistemas de iluminación natural .....	60
B. Arquitectura de los sistemas de iluminación natural .....	61
Colector o concentrador .....	61
Transportador .....	61
Extractor o emisor de luz.....	61
C. Sistemas de iluminación tipo SIFO .....	61
III. Diseño de un sistema experimental tipo SIFO .....	62
IV. Diseño de un concentrador solar .....	62
A. Lentes de Fresnel .....	62
B. Criterios de diseño de un colector solar .....	62
C. Selección de la lente de Fresnel.....	62
D. Diseño del seguidor solar .....	63
V. Generalidades de los terminales para sistemas de iluminación natural .....	63
A. Puerto óptico .....	63
B. Dispensor de luz .....	64
C. Lente de amplificación .....	64
VI. Diseño experimental de un terminal de iluminación por fibra óptica.....	64
A. Prototipos de los terminales .....	64

Prototipo A.....	64
Prototipo B.....	64
Prototipo C.....	64
Prototipo D.....	65
B. Optimización del terminal.....	65
VII. Implementación experimental del sistema .....	66
A. Diagrama funcional del sistema.....	66
B. Elementos del SIFO experimental .....	66
VIII. Valoración del desempeño del sistema experimental .....	68
A. Valoración del desempeño del prototipo del concentrador-seguidor de Fresnel .....	68
B. Valoración del desempeño del arnés de fibra óptica.....	69
C. Valoración del desempeño del arnés del difusor.....	69
IX. Conclusiones .....	69
X. Referencias .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. The difference between lux and lumens. ....	6
Figura 1.2. Iluminación solar en espacios interiores. ....	7
Figura 1.3. Sistema de transporte de luz natural con colector de Fresnel y tubo líquido de luz. .	9
Figura 1.4. Ilustración de 1) Lente de Fresnel y 2) Lente convexa. ....	13
Figura 1.5. Ilustración del enfoque de una lente de Fresnel y de una lente convexa. ....	13
Figura 2.1. Concentradores de rayos solares: 1) concentrador solar reflectante, y, 2) concentrador solar refractante. ....	17
Figura 2.2. Perfil de un lente de Fresnel. ....	19
Figura 2.3. Fabricación de una lente de Fresnel. a) Lente rebanada, b) desechado de material, c) lente resultante. ....	20
Figura 2.4. Grosor correspondiente a cada uno de los anillos que forman una lente de Fresnel. ....	21
Figura 2.5. Tramitancia del acrílico de propósito general en función de la longitud de onda, grosor (3.2 mm) nominal. ....	22
Figura 2.6. Tramitancia del vinilo rígido en función de la longitud de onda, grosor (0.76 mm) nominal. ....	23
Fuente: .....	23
Figura 2.7. Tramitancia del Policarbonato en función de la longitud de onda, grosor (3.2 mm) nominal. ....	23
Figura 2.8. Comparación fotovoltaica convencional seguidores solares, una optimización de la energía solar. ....	24
Figura 2.9. Seguidor pasivo. ....	25
Figura 2.10. Seguidores solares, una optimización de la energía solar. ....	26
Figura 2.11. Seguidor solar de un eje azimutal. ....	26
Figura 2.12. Seguidor solar de un eje horizontal. ....	27
Figura 2.13. Seguidor solar de un eje polar. ....	27
Figura 2.14. Seguidor solar de un eje polar. ....	28
Figura 2.15. Lente de Fresnel 3M (11 x 11 pulgadas). ....	30
Figura 2.16. Perfil de un lente de Fresnel, .....	30
Fig 17. Representación gráfica $so - 1$ vs $si - 1$ .....	32
Figura 2.18. Recta de ajuste mediante mínimos cuadrados. ....	32
Figura 2.19. Esquema del seguidor solar propuesto. ....	33
Fuente: Diseño de los autores. ....	33
Figura 2.20. Conector de FO. ....	33
Figura 3.1. Estructura genérica de un puerto óptico. ....	36
Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de una lente divergente bicóncava. ....	37
Figura 3.3. Prototipo A de un terminal. ....	38
Figura 3.4. Prototipo B de un terminal. ....	39
Figura 3.5. Medición de la potencia luminosa del prototipo B. ....	40
Figura 3.6. Prototipo B de un terminal. ....	40
Figura 3.7. Medición de la potencia luminosa del prototipo C. ....	41
Figura 3.8. Prototipo B de un terminal. ....	41
Figura 3.9. Medición de la potencia luminosa del prototipo D. ....	42
a) .....	43
b) .....	43
c) .....	43
Figura 3.10. Prototipo optimizado de terminal. Fotografías de los autores. a - plafón común de iluminación eléctrica preparado para servir de base al prototipo optimizado de terminal. b - terminal completamente ensamblado. c - prueba de desempeño del terminal. ....	43
Figura 3.11. Medición de la potencia luminosa del prototipo optimizado. ....	44
Figura 4.1. Esquema funcional del SIFO implementado. ....	47

Figura 4.2. Concentrador solar diseñado y construido. ....	48
Figura 4.3. Difusor diseñado y construido.....	48
Figura 4.4. Experimento de propagación de luz en fibra óptica suelta. ....	49
Figura 4.5. Implementación de una cámara oscura para la valoración de la propagación de la luz en la fibra. ....	49
Figura 4. 6. Sistema SIFO implementado. ....	50
Figura 4.7. Problemas presentados en el arnés de fibra óptica debido a la alta energía focalizada por el concentrador. ....	51
Figura 4.9. Uso de película radiográfica sobre el concentrador solar.....	52
Figura 4.10. Inyección de luz, desde el concentrador solar hacia el arnés de fibra óptica. ....	52
Figura 4.11. Estructura del arnés de fibra óptica utilizado en este proyecto. ....	53
Figura 4.12. Luz solar en el difusor. ....	53

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Valores comunes de iluminancia .....	6
Tabla 1.2. Sistemas comerciales de iluminación y transporte de luz natural .....	8
Tabla 1.3. Colectores concentradores de luz natural disponibles en el mercado .....	10
Tabla 1.4. Elementos de transporte de luz natural .....	11
Tabla 1.5. Elementos extractores de luz natural.....	15
Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de los concentradores de luz natural que utilizan fibra óptica, disponibles en el mercado.....	18
Tabla 2.2. Propiedades Físicas de Materiales de Lentes de Fresnel Technologies Inc.....	22
Tabla 2.3. Características de Lentes de Fresnel .....	29
Tabla 2.4. Distancias objeto e imagen en la lente 3M .....	31
Tabla 3.1. Evaluación cualitativa de los prototipos de terminales. ....	39
1 – malo, 2 – regular, 3 – bueno, 4 – muy bueno .....	39
Tabla 4.1. Características técnicas del concentrador solar diseñado y construido. ....	47
Tabla 4.2. Características técnicas del difusor diseñado y construido. ....	48
Tabla 4.3. Características de la fuente utilizada como luz puntual.....	49
Tabla 4.5. Características de transmisión de las fibras exploradas para ser utilizadas como elemento de transporte de luz.....	50

## RESUMEN

El presente trabajo describe el estado de desarrollo tecnológico de los sistemas de iluminación natural que utilizan fibra óptica, conocidos como SIFO.

Explica los principios fundamentales del funcionamiento de los concentradores solares empleados en los SIFO, y, detalla el proceso de diseño de un concentrador experimental basado en la utilización de lentes de Fresnel.

Presenta el estado actual en el diseño de difusores de iluminación natural, utilizados con fibra óptica solar, y, se explica el diseño y análisis de desempeño de prototipos experimentales de difusores.

Finalmente, se explica los resultados preliminares de la implementación de un sistema experimental, y, se identifica los trabajos futuros en la investigación.

**PALABRAS CLAVES:** sistemas de iluminación, sistemas no convencionales de iluminación, sistemas de iluminación natural, sistemas de iluminación natural con fibra óptica.

## ABSTRACT

This paper describes the state of technological development of fiber optic daylighting systems, which are known as SIFO.

It describes the basic principles of the operation of the solar concentrator employed in the SIFO, and details the process to design an experimental concentrator based on Fresnel lenses.

It presents the current status in the design of diffusers for fiber optic daylighting systems, and explains the design and performance analysis about experimental prototypes of diffusers.

It explains the preliminary results at the experimental implementation of the system, and define the future works for research.

**KEYWORDS:** lighting systems, unconventional lighting systems, lighting systems, daylighting systems with fiber optics.

## **INTRODUCCIÓN**

El presente proyecto está orientado a la explicación del diseño y operación de los sistemas de iluminación natural que usan fibra óptica, conocidos como SIFO. Los SIFO se presentan como una tecnología emergente en el área de la iluminación, y, proponen el aprovechamiento de la luz solar como fuente inagotable para iluminación.

Los sistemas SIFO están formados por tres componentes principales, cuyo funcionamiento y características principales se describen en este trabajo. Al establecer la línea base, se obtuvo información suficiente para diseñar y construir prototipos experimentales de un concentrador solar y de un difusor.

Para la evaluación del desempeño del sistema, se empleó una metodología netamente experimental. Los resultados obtenidos mostraron la viabilidad de construir y operar un sistema SIFO, identificando los problemas futuros a resolver, relacionados al comportamiento óptico de los elementos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Diseñar e implementar un sistema experimental de iluminación natural que emplea fibra óptica (SIFO).

### **Objetivos específicos**

- Definir constructivamente los elementos óptimos de un sistema SIFO.
- Diseñar y construir un concentrador solar para sistemas SIFO.
- Diseñar y construir un difusor para SIFO.
- Determinar las limitaciones operacionales de un sistema SIFO.

**CAPÍTULO 1**  
**ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA EMPLEADA EN SISTEMAS DE**  
**ILUMINACIÓN NATURAL, QUE APROVECHAN LA LUZ SOLAR**

## **1.1. Introducción**

La problemática energética actual ha impulsado el apareamiento de diversas iniciativas de I+D+I, orientadas al aprovechamiento de fuentes de energía renovable o no convencional. En este contexto, un lugar muy importante ocupan las iniciativas para el aprovechamiento del recurso solar en formato fotovoltaico, térmico, o, luz visible.

En este trabajo, se aproxima una descripción al funcionamiento de los sistemas de iluminación natural que aprovechan la luz visible del Sol, bajo el ejemplo de los sistemas de iluminación solar empleando fibra óptica, conocidos como sistemas SIFO.

## **1.2. Sistemas de Iluminación Natural**

### **1.2.1. Nociones generales de luminotecnia**

El uso de diversas unidades fotométricas, permite caracterizar el desempeño de un sistema de iluminación.

#### **1.2.1.1. Flujo Luminoso.**

El flujo luminoso describe la potencia lumínica de una fuente luminosa. En un principio, se podría registrar el flujo luminoso como energía expresada en términos de vatios (W). Sin embargo, esta aproximación no describe acertadamente la influencia de la radiación total de una fuente luminosa, sobre la sensibilidad espectral del ojo humano. Al incluir en el análisis de la calidad de la iluminación, la sensibilidad espectral del ojo, se opera entonces en lúmenes (lm). Un flujo radiante definido en el valor máximo de la sensibilidad espectral ocular fotópica (555 nm), de 1 W, produce un flujo luminoso de 683 lm. El mismo flujo radiante, definido en márgenes de frecuencia de menor sensibilidad, produce flujos luminosos correspondientemente más pequeños.

#### **1.2.1.2. Iluminancia.**

La iluminancia es la medida de la densidad del flujo luminoso. Se define como la relación del flujo luminoso que cae sobre una superficie, y, el área de la misma. La iluminancia no está sujeta a una superficie real, y, se puede determinar en cualquier lugar del espacio, derivándose de la intensidad luminosa. La iluminancia se mide en luxes.

La iluminancia disminuye en función del cuadrado de la distancia medida desde la fuente de luz (ley fotométrica de distancia) [1].

La Figura 1.1 explica gráficamente, la diferencia conceptual entre las unidades lumen y lux, mientras que la Tabla 1.1 muestra los niveles de iluminancia en diversos escenarios [1].

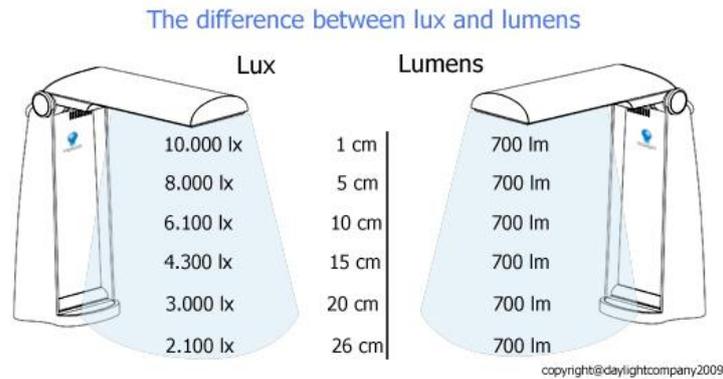


Figura 1.1. The difference between lux and lumens.  
Fuente: <http://uk.daylightcompany.com/information/lumens-lux/>

Tabla 1.1. Valores comunes de iluminancia

Condición	E (lux)
Luz solar	100 000
Cielo cubierto	10 000
Iluminación en puesto de trabajo	1 000
Iluminación en zona de circulación	100
Alumbrado calles	10
Luz lunar	1

Fuente: [http://www.erco.com/download/data/30\\_media/20\\_handbook/es\\_erco\\_lichtplanung.pdf](http://www.erco.com/download/data/30_media/20_handbook/es_erco_lichtplanung.pdf)

### 1.2.2. Clasificación de los sistemas de iluminación

En general, un sistema de iluminación es un conjunto de dispositivos y equipos destinados a proporcionar el nivel de iluminación requerido para realizar ciertas actividades específicas [2].

Los sistemas de iluminación se clasifican en dos grupos: *convencionales* y *no convencionales*.

Los sistemas convencionales de iluminación emplean lámparas incandescentes, lámparas de arco, lámparas de filamentos de carbono, ó, lámparas fluorescentes. Debido a la naturaleza de las luminarias, sólo una parte de la energía eléctrica consumida se transforma en energía luminosa, por lo que los sistemas convencionales se consideran ineficientes. Existen también sistemas convencionales de alta eficacia energética, que utilizan balastos para mantener un flujo estable de corriente [3].

Los sistemas no convencionales de iluminación se desarrollaron para iluminación ambiental, decorativa, puntual, funcional, entre otras. Estos sistemas incorporan luminarias de un alto nivel de eficiencia, de baja potencia, y, de intensidad lumínica aceptable.

### 1.2.3. Sistemas de iluminación natural

A partir del 3500 AC, en Egipto, existen referencias sobre el uso de espejos para iluminación natural de lugares poco profundos [4]. Alrededor del 1200 DC, era frecuente el uso de espejos y ductos solares para calentar agua o encender antorchas. En 1767, el suizo Horace de Saussure, inventó el primer colector solar [5]. A finales del siglo XIX, la invención de la lámpara eléctrica y el desarrollo de la provisión de energía eléctrica confiable y barata, desplazó a la luz natural como forma primaria de iluminación. La iluminación artificial, la ventilación forzada, y, la calefacción, posibilitaron la independencia del hombre respecto de su entorno.

El redescubrimiento de la iluminación natural en la arquitectura de los años 1970, y, la crisis energética y la conciencia ambiental actual, llevaron al apareamiento entre los sistemas no convencionales de iluminación, de la idea de utilizar sistemas de iluminación natural. Esta iniciativa se fortaleció en los últimos años, con logros tecnológicos como la introducción del concepto de barra de iluminación solar (2002), parte importante de los actuales sistemas de iluminación natural basados en fibra óptica [6].



Figura 1.2. Iluminación solar en espacios interiores.

Fuente: <http://verdecafe.wordpress.com/natura/il-sole/>

Los sistemas comerciales de iluminación natural, son adaptaciones aplicadas a las aberturas laterales o cenitales de las edificaciones, con el objetivo de optimizar la cantidad y distribución de luz en espacios interiores. Estos sistemas operan bajo distintos principios de funcionamiento (reflexión, refracción, filmes holográficos, fibras

ópticas, etc); y, están constituidos por elementos fijos o móviles, de operación manual o con cierto margen de automatización [7] (ver Figura 1.2). La Tabla 1.2, resume las características más importantes de una serie de soluciones comerciales de iluminación natural.

Tabla 1.2. Sistemas comerciales de iluminación y transporte de luz natural

<b>NOMBRE COMERCIAL</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>BENEFICIOS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
HIMAWARI	Sensor solar, Motor de pasos, Conjunto de Lentes de Fresnel. Transporte a través de FO. Modelos de 6 a 198 lentes.	Máximo aprovechamiento del sol. Tipología de emisión similar a las de focos eléctricos.	Tecnología y mantenimiento de costo muy elevado. Consumo eléctrico.
SOLUX	Lente de Fresnel. Dirige la luz con guías líquidas.	Máximo aprovechamiento del sol. Tipología de emisión similar a las de focos eléctricos.	El líquido se filtra por las guías. Las bajas temperaturas congelan el líquido.
LIGHTTRON	Sistema de espejos, motor de pasos.	Máximo aprovechamiento del sol. Ilumina grandes áreas interiores o exteriores.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Consumo eléctrico. Alto grado de exposición al clima
KUZEIKA	Sistema de espejos, motor de pasos.	Máximo aprovechamiento del sol. Ilumina grandes áreas interiores o exteriores.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Consumo eléctrico. Alto grado de exposición al clima
SOLAR TRACKER	Espejo con motor de pasos.	Máximo aprovechamiento del sol. Ilumina grandes áreas interiores o exteriores.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Alto grado de exposición al clima
SOLARIS	Cúpula acrílica con láminas giratorias.	Máximo aprovechamiento del sol. Reflector protegido. Fácil instalación	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. Alto grado de exposición vandálica.
HELIOBUS	Concentrador parabólico giratorio, conducto transportador reflexivo.	Máximo aprovechamiento del sol. Rigidez estructural. Buena distribución interior de luz.	Necesidad de mantenimiento de piezas móviles. Consumo eléctrico.
SOLATUBE	Cúpula acrílica con pantalla reflectora interna con conducto reflexivo.	Rigidez estructural, fácil instalación, costo accesible.	Rendimiento moderado, distancia de transmisión corta
LITRA CON	Bloques o paneles de FO compacta de propiedades translúcidas.	Solución a la iluminación natural de espacios desde la estructura misma de la arquitectura.	Alto impacto sobre la imagen arquitectónica, puede perjudicar la sensación de intimidad.

Fuente:

<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&directio n=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>

#### **1.2.4. Arquitectura de los sistemas de iluminación natural**

De acuerdo a la arquitectura propuesta por el Institut für Licht und Bautechnik, de Colônia en Alemania [8], los sistemas de iluminación natural obtienen luz solar para iluminación, al captar o receptor la luz radiada por medio de un módulo que concentra la luz en un solo punto [3]. Estructuralmente, constan de tres bloques: colector, transportador, y, extractor o difusor de luz.

##### **1.2.4.1. Colector o concentrador**

El colector puede estar conformado por un espejo (generalmente cóncavo), lentes Fresnel, un sistema rotativo de doble placa prismática, un helióstato, o, simplemente una cúpula transparente. La función principal del colector es captar, y, eventualmente concentrar, la radiación solar directa. La Tabla 1.3 resume las características principales de algunos tipos de colectores disponibles en el mercado. La figura 1.3 muestra una vista panorámica de una versión primera de un concentrador tipo Fresnel.



Figura 1.3. Sistema de transporte de luz natural con colector de Fresnel y tubo líquido de luz.  
Fuente: <http://gaia.lbl.gov/iea21/>

Tabla 1.3. Colectores concentradores de luz natural disponibles en el mercado

NOMBRE	DESCRIPCION	BENEFICIOS	DESVENTAJAS
Concentrador de Fresnel	Lente obtenido a partir del rebaje con cortes de una lente en anillos concéntricos consecutivos.	Amplifica la potencia de luz solar. Peso y espesor reducidos	Alta transmisión de calor. El ángulo de incidencia determina el rendimiento. Movimiento mecánico
Laser Cut Panel	Panel acrílico con micro cortes colocado entre dos vidrios. Los cortes funcionan como espejos que redireccionan la luz.	Peso y espesor reducidos. Alto rendimiento	Rendimiento según la profundidad de los cortes y ángulo de incidencia.
Panel prismático	Panel acrílico moldeado con una cara plana y una cara con prismas o cuñas triangulares	Peso y espesor reducidos. Buen rendimiento. Aprovechamiento de la luz difusa	Costo de instalación elevado. El ángulo de incidencia solar determina el rendimiento
Microláminas reflexivas	Laminas transversales y vertical que reflejan la luz. Fabricadas en plástico con metalización de aluminio.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Exclusión del calor.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. El grado de incidencia solar determina el rendimiento
Espejo direccionador (Heliostático)	Sistema de espejos metálicos que direcciona la luz hacia espacios interiores o abiertos.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Iluminación de grandes áreas.	Tecnología y mantenimiento de costo elevado. El grado de incidencia solar determina el rendimiento
Colector parabólico	Plano metálico de curvatura doble parabólica que concentra la luz captada en distintos puntos según el ángulo de incidencia.	Aprovechamiento de la luz directa y difusa. Buena relación costo rendimiento.	A mayor superficie mayor captación, elevado peso, acabado pulido de alto costo.
Concentrador anhidólico	Sistema de espejos y lentes que concentran la luz elevando el rendimiento de la radiación disponible	Amplifica la potencia de luz solar.	Altas exigencias de precisión en la instalación.

Fuente:

<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>

#### 1.2.4.2. Transportador

El transportador tiene como función encaminar la luz colectada, a una distancia determinada. La Tabla 1.4 resume las características principales de una serie de transportadores disponibles en el mercado.

La eficiencia de un buen sistema puede superar el 25 %, medida desde la luz incidente en el colector, hasta el emisor de luz en la habitación [9].

Tabla 1.4. Elementos de transporte de luz natural

NOMBRE	DESCRIPCION	BENEFICIOS	DESVENTAJAS
Fibra óptica	Conjunto de hebras de vidrio o plástico con diámetro de 50 a 125 micras con un revestimiento que rodea y protege al núcleo.	Alto coeficiente de transmitancia, filtro selectivo de longitudes, buen rendimiento de color. Versatilidad de aplicaciones.	Alto costo, fragilidad del sistema instalado
Guías de luz líquidas	Similares a las fibras ópticas plásticas, pero con su interior lleno de líquido.	Muy bajas pérdidas de transmisión lumínica.	El líquido se filtra por las guías y las bajas temperaturas lo congelan.
Guías acrílicas sólidas	Prismas o cilindros sólidos de material plástico translúcido que transmite la luz por el principio de reflexión total interna.	Alto coeficiente de transmitancia, transmisión de altos flujos de luz según diámetro, rigidez estructural	Dificultad de instalación, baja resistencia mecánica alto costo, fragilidad del sistema
Ductos reflexivos	TUBO - Conductos de acero inoxidable pulido espejo en su interior. Se conforman a medida según la instalación.	Buen coeficiente de transmitancia, buen rendimiento de color.	Proceso de pulido de alto costo
	GUIA SOLIDA DE PERIMETRO PRISMATICO.- sección cuadrada o cilíndrica de acrílico con micro-secciones prismáticas.	Alto coeficiente de transmitancia, buen rendimiento de color.	Dificultad de instalación, baja resistencia mecánica alto costo, fragilidad del sistema
Sistemas aéreos	Conjunto de lentes o parábolas enfocadas a la distancia.	Baja intervención arquitectónica para la instalación, transmite grandes flujos de luz.	Requiere precisión en la orientación de las parábolas para minimizar pérdidas por mal enfoque.

Fuente:

<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>

### 1.2.4.3. Extractor o emisor de luz

El extractor es el elemento que se encarga de distribuir la luz proporcionada por el sistema de transporte dentro del espacio a iluminar.

El emisor es similar a una luminaria empleada para iluminación eléctrica, y, según la tarea visual puede ser directo, semi-directo, difusor, semi-indirecto o totalmente indirecto.

### **1.2.5. Sistemas de iluminación tipo SIFO**

Un SIFO recoge la luz solar por medio de un concentrador solar, y, la lleva a través de una red de fibras ópticas a los puntos elegidos, en los espacios interiores.

La utilización de la luz solar en los SIFO, reduce el costo de energía entre un 20 y 25%, y, reduce la emisión de gases de efecto invernadero entre el 10 y 15% [10]. Los SIFO también permiten regular el calor en los espacios arquitectónicos, por cuanto transmiten sólo el espectro visible de la luz.

Los SIFO más avanzados, se construyen como sistemas híbridos que combinan el uso de luz solar y de lámparas eléctricas convencionales. Estos sistemas incluyen bloques de control que permiten el trabajo conjunto de ambas fuentes de luz, regulando la intensidad luminosa de las lámparas eléctricas, en función de la intensidad de la luz del Sol. Como valor agregado, una correcta arquitectura del SIFO, permite cambiar el color de la iluminación sin necesidad de cambiar de lámparas [11].

## **1.3. Características funcionales de los sistemas de iluminación natural tipo SIFO**

### **1.3.1. Concentrador basado en lentes de Fresnel**

Los SIFO disponibles en el mercado, utilizan como concentrador sistemas montados en base a lentes de Fresnel, ya que presentan mayor rendimiento y adaptación a la fibra óptica. Estos colectores amplifican la potencia de la luz solar sin emplear dispositivos electrónicos, son de poco peso, y, tienen dimensiones reducidas en comparación a los colectores parabólicos construidos de metal y que requieren de una gran superficie de incidencia de luz.

Entre los factores adversos al uso de colectores basados en lentes de Fresnel, se cita la alta capacidad de transmisión de calor al bloque de transporte. Este calor, provocado por la componente infrarroja de la luz natural, afecta la vida útil de la fibra óptica del transportador [5].

Los colectores basados en lentes Fresnel disponibles en el mercado, se diferencian entre sí por la capacidad de concentración de luz. Modelos como el Himawari de Kei Mori [12], proporcionan un flujo luminoso de hasta 1920 lm por fibra, a partir de un

nivel de iluminación directa del Sol de 98 000 lux. El modelo SP3 de Parans, tiene la capacidad de captar 6000 lm, y, entregar a la salida de los terminales 3700 lm, luego de haber recorrido 10 m de distancia.

Las lentes de Fresnel son vidrios tallados o plásticos fabricados, diseñados para que los rayos de luz que las atraviesen, se comporten como rayos en una lente plana convexa (ver Figura 1.4 y figura 1.5) [13]. Una lente de Fresnel tiene las mismas características de focalización que una lente convexa, pero sus dimensiones y peso son similares a las de una lente plana.

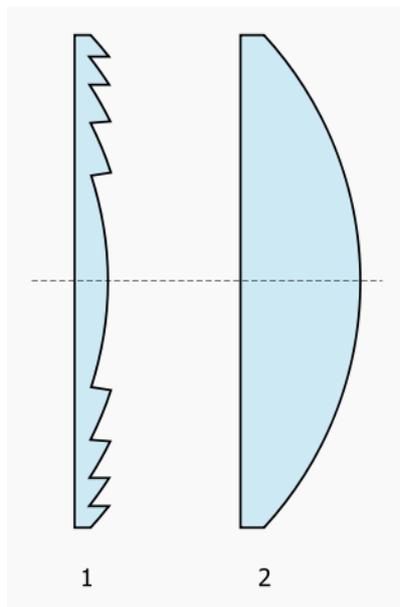


Figura 1.4. Ilustración de 1) Lente de Fresnel y 2) Lente convexa.  
Fuente: <http://refrigeracion.files.wordpress.com/2011/04/lentes-de-fresnel.pdf>

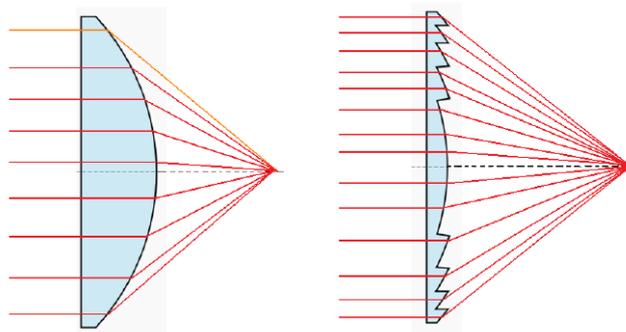


Figura 1.5. Ilustración del enfoque de una lente de Fresnel y de una lente convexa.  
Fuente: <http://refrigeracion.files.wordpress.com/2011/04/lentes-de-fresnel.pdf>

### 1.3.2. Transportador de fibra óptica

El transporte de la luz a través de un arnés de fibra óptica se basa en los fenómenos ópticos de refracción y reflexión [14]. La fibra óptica empleada en este tipo de sistema,

proviene de la industria de la telecomunicaciones, y, se caracteriza por poseer un coeficiente de transmisión alto, una flexibilidad aceptable, y, un costo bajo.

También es importante mencionar la posibilidad de implementar un filtrado selectivo de longitudes de onda a través de la manipulación de las propiedades geométricas y ópticas de la fibra. Esta propiedad es atractiva desde la perspectiva de limitar el ancho de banda de la luz del Sol, suprimiendo las componentes IR y UV.

Las pérdidas de la propagación de la luz en la fibra óptica, son derivadas de la absorción, de la dispersión (scattering), y, de la radiación perdida hacia el exterior. La absorción se debe únicamente al material de la fibra, mientras que la dispersión y la radiación perdida dependen del material y de las imperfecciones estructurales que puedan existir en la guía óptica. En términos generales, las pérdidas en un transportador se determina al medir la potencia óptica,  $P_e$ , a la entrada de la fibra, y, la potencia a la salida,  $P_s$ , tras haber recorrido una cierta distancia  $L$ . Entonces, la atenuación  $\alpha$  se expresa con la ecuación (1.1), en términos de decibelios por kilómetro,

$$\alpha_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_e}{P_s} \quad (1.1)$$

### **1.3.3. Extractores, difusores, o, terminales**

La luz concentrada admite diversas opciones de difusión, como las descritas en la Tabla 1.5 [15].

Las fibras ópticas de iluminación puntual, emiten luz solar en uno de los extremos de la fibra. El transportador óptico está compuesto por múltiples hilos de fibra, cubiertos por una funda protectora, opaca, ignífuga, y, flexible. Este tipo de fibras se combinan con accesorios ópticos para obtener la distribución deseada de luz. Los lentes de Fresnel negativos divergentes son los elementos más usados para difusión, en este tipo de aplicaciones.

Las fibras ópticas de iluminación lateral, son similares a las fibras ópticas comunes, y, permiten la difusión de luz natural a lo largo de la fibra, debido a que su cubierta exterior transparente, permite ver la luz que escapa de la fibra.

Las guías de luz de hueco, clasificadas anteriormente como una técnica de transmisión de luz, son también empleadas para difusión. Una varilla de difusión, se puede utilizar dentro de la guía de luz, para proporcionar la direccionalidad a la

transmisión, a través de las paredes de la guía. Lentes, prismas, y, otros dispositivos ópticos, se emplean para difundir la luz concentrada por heliostatos.

El tipo de difusión a elegir, depende del propósito de la iluminación de luz natural. La iluminación de lugares de trabajo o mostradores requiere de haces de luz concentrados y paralelos; mientras que la iluminación de una habitación, podría emplear luz difusa y no tan concentrada.

Tabla 1.5. Elementos extractores de luz natural

NOMBRE	DESCRIPCION	BENEFICIOS	DESVENTAJAS
Fibra óptica	Conjunto de hebras de vidrio o plástico con diámetro de 50 a 125 micras con un revestimiento que rodea y protege al núcleo.	Posibilidad de aplicaciones tipo spot, líneas de luz periféricas, ramificación de puntos iluminados.	Dificultad para la iluminación de grandes áreas, alto costo.
Difusores	Pueden ser plásticos, de cristal, o metálicos tipo louver, cromados, mate o blancos.	Funciona como una luminaria convencional, pero alimentada por luz natural.	Durante periodos de baja colección reduce considerablemente el nivel de luz emitida
Extractores	Sistema de espejos que refleja un porcentaje de la luz incidente, dejando pasar el resto.	Ayuda a Mantener niveles de uniformidad en interiores de grandes dimensiones.	Durante periodos de baja colección reduce considerablemente el nivel de luz emitida

Fuente:

<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>

## **CAPÍTULO 2**

### **DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR EXPERIMENTAL PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL CON FIBRA ÓPTICA, BASADO EN LA UTILIZACIÓN DE LENTES DE FRESNEL**

## 2.1. Introducción

Una creciente conciencia hacia el aprovechamiento de los recursos naturales, con una mínima generación de residuos o emisiones, ha convertido a los sistemas de iluminación natural que aprovechan la luz solar transmitida por fibra óptica, en una tecnología emergente.

En este trabajo, se describe los principios fundamentales del funcionamiento de los concentradores solares, uno de los elementos que conforman los sistemas de iluminación natural con fibra óptica, y, se explica el proceso de diseño de un concentrador experimental basado en la utilización de lentes de Fresnel.

## 2.2. Generalidades de los concentradores solares empleados en sistemas de iluminación natural

### 2.2.1. Sobre los concentradores solares

En general, se conoce como concentradores solares (colectores), a elementos capaces de recolectar luz solar, concentrarla, y, dirigirla.

Se distinguen 2 grupos de concentradores: los de tipo reflectante (que usan espejos), y, los de tipo refractivo (que usan lentes de transmisión) (ver Figura 2.1) [16].

Constructivamente, un colector puede incluir un espejo (generalmente cóncavo), lentes Fresnel, sistemas rotativos de doble placa prismática, helióstatos, o simplemente, una cúpula transparente.

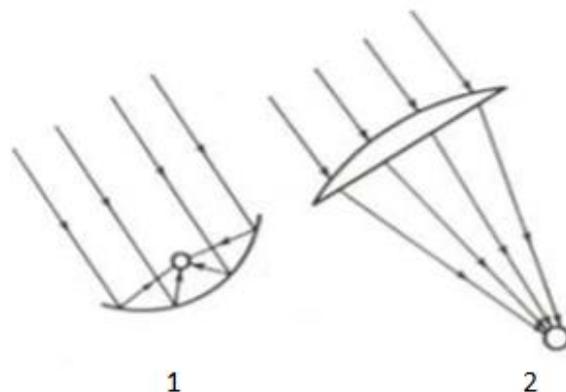


Figura 2.1. Concentradores de rayos solares: 1) concentrador solar reflectante, y, 2) concentrador solar refractivo.

Fuente:

<http://www.luqentia.es/hosting/masterenergiasrenovables/mh/material/Sistemas%20Solares%20de%20Concentraci%C3%B3n/Dossier%20Sistema%20CES%20-%20Heliocom%20Sistemas%20Solares.pdf>

En un trabajo anterior, se describió las características más importantes de algunos de los concentradores existentes en el mercado. En este trabajo, el análisis se limita a aquellos concentradores empleados en sistemas que utilizan fibra óptica para transmisión (concentradores de Fresnel, y, paneles prismáticos), cuyas ventajas y desventajas se detallan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de los concentradores de luz natural que utilizan fibra óptica, disponibles en el mercado

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	BENEFICIOS	DESVENTAJAS
Concentrador de Fresnel	Lente obtenido a partir del rebaje, con cortes, de una lente en anillos circulares concéntricos consecutivos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplifica la potencia de luz solar.</li> <li>• Peso y espesor reducidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta transmisión de calor.</li> <li>• El ángulo de incidencia determina el rendimiento</li> <li>• Movimiento mecánico</li> </ul>
Panel prismático	Panel acrílico moldeado con una cara plana, y, una cara con prismas o cuñas triangulares	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso y espesor reducidos.</li> <li>• Buen rendimiento.</li> <li>• Aprovechamiento de la luz difusa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de instalación elevado.</li> <li>• El ángulo de incidencia solar determina el rendimiento</li> </ul>

Fuente:

<http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>

## 2.2.2. Parámetros básicos de los concentradores

Los concentradores se caracterizan por la capacidad de recolección, la relación de concentración, y, la distancia focal.

### 2.2.2.1. Capacidad de recolección

El área de la superficie del concentrador influye en la cantidad de luz recogida, relacionada a la radiación solar sobre la superficie que, en términos de luminotecnica, se denomina iluminancia, y, que en el sistema internacional de unidades, se mide en luxes.

### 2.2.2.2. Relación de concentración

La relación de concentración se determina como la relación de la cantidad de energía captada por unidad de superficie en el concentrador, y, la cantidad de energía captada por unidad de superficie en el punto focal.

### 2.2.2.3. Distancia focal

La distancia focal corresponde a la distancia más corta entre la superficie del concentrador, y, el punto en el que convergen los rayos de luz recolectados.

### 2.2.3. Lentes de Fresnel

Las lentes de Fresnel se fabrican de vidrio tallado o de plástico, y, se diseñan para que los rayos de luz que las atraviesen, se comporten como rayos en una lente plana convexa (ver Figura 2.2) [13].

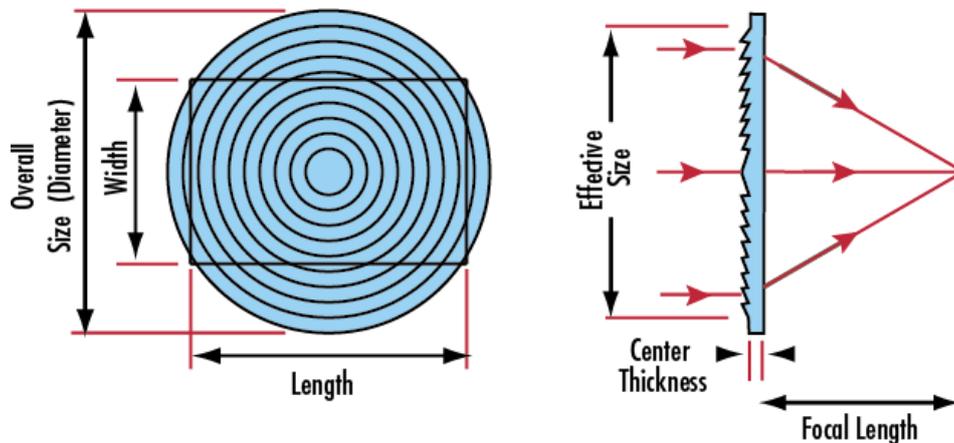


Figura 2.2. Perfil de un lente de Fresnel

Fuente: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/2040>

La lente de Fresnel surge como una variación de la lente convexa esférica, gracias a una serie de ranuras concéntricas moldeadas en la superficie de la lente. Teóricamente, cada una de las ranuras se muestra como un prisma. El ángulo de cada ranura se ajusta de manera tal que, los rayos de un frente de onda plano pasen a través de ella y sean refractados hacia el punto focal [17]. Debido a su grosor, en un modelo idealizado de una lente de Fresnel, muy poca luz se pierde por absorción [18].

Una lente de Fresnel se puede construir de plástico, en aproximaciones sucesivas. Una lente simple o plano convexa (PCX) se divide en rebanadas de un mismo grosor, se retira el material restante formando anillos, y, se pliega los anillos en un mismo plano (ver Figura 2.3). La superficie obtenida, de base esférica con simetría rotacional, se describe (de forma transversal) por una sección cónica, cuya ecuación característica se expresa por la ecuación (2.1) [19]:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} \quad (2.1)$$

En dónde,

$r$ , es la distancia radial desde el eje óptico, [m]

$z$ , es la distancia a lo largo del eje óptico en  $r$ , [m]

$c$ , es la curvatura de la superficie de la lente [adimensional].

Para lentes fabricadas con mayor precisión, a la ecuación básica se puede agregar un polinomio (ver expresión (2.2)). La inclusión de términos de orden superior, entre 6 y 8, permiten obtener resultados similares al desempeño de una lente real.

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 \quad (2.2)$$

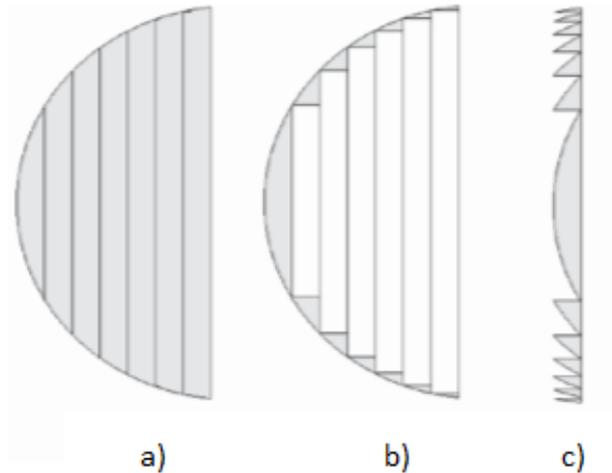


Figura 2.3. Fabricación de una lente de Fresnel. a) Lente rebanada, b) desecho de material, c) lente resultante.

Fuente: <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo3t30.pdf>

A partir de la ecuación (2.1), se obtiene una función que describe la relación entre el semidiámetro de la lente y el grosor, tal como lo muestra la expresión (2.3) y lo ilustra la Figura 2.4:

$$r = \sqrt{\frac{2z}{c} - z^2} \quad (2.3)$$

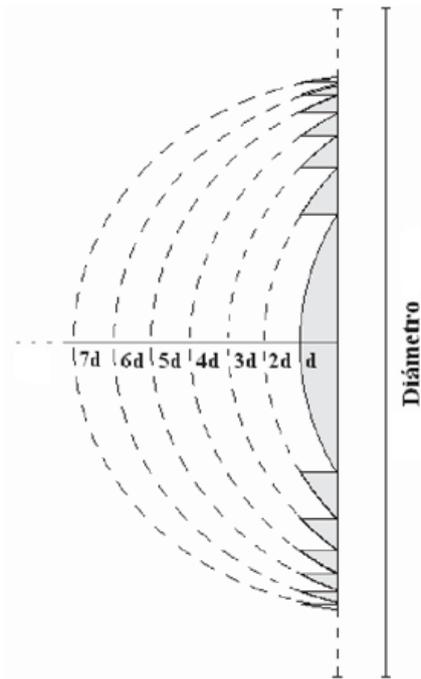


Figura 2.4. Grosor correspondiente a cada uno de los anillos que forman una lente de Fresnel.  
 Fuente: <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo3t30.pdf>

La relación de concentración de una lente de Fresnel, se determina de forma experimental, aplicando principios de óptica, calculando la razón del tamaño de la imagen  $s'$ , con respecto al tamaño del objeto  $s$ , tal como lo muestra la expresión (2.4) [20]:

$$M = \frac{s'}{s} \quad (2.4)$$

En dónde,

$s'$ , es la distancia a la imagen, [m]

$s$ , es la distancia al objeto, [m].

#### 2.2.4. Materiales empleados en la fabricación de lentes de Fresnel

Los principales materiales empleados en la construcción de lentes para aplicaciones relacionadas con luz visible son acrílico, policarbonato, y vinilo rígido [21]. La elección del material para la construcción de la lente de Fresnel, parte de que el material pueda operar en el rango visible del espectro de luz. Otras consideraciones incluyen espesor, rigidez, temperatura de servicio, y otras propiedades físicas, que figuran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades Físicas de Materiales de Lentes de Fresnel Technologies Inc.

	<b>Acrílico</b>	<b>Vinilo rígido</b>	<b>Polycarbonato</b>
<b>Índice de refracción</b>	1.49	1.54	1.586
<b>Módulo de tracción (103 PSI)</b>	325 - 470	350 - 600	345
<b>Módulo de flexión (103 PSI)</b>	390 - 470	300 - 500	340
<b>Expansión térmica (10<sup>-6</sup> /°C)</b>	76	76	68
<b>Temperatura de Operación (°C)</b>	80	70	120
<b>Peso Específico</b>	1.19	1.45	1.20
<b>Efecto exposición solar</b>	ninguno	color amarillo	Bajo color amarillo

Fuente: <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>

#### 2.2.4.1. Acrílico

Por su calidad óptica, el acrílico es un material de propósito general, para en cualquier aplicación dentro del rango de luz visible (ver Figura 2.5).

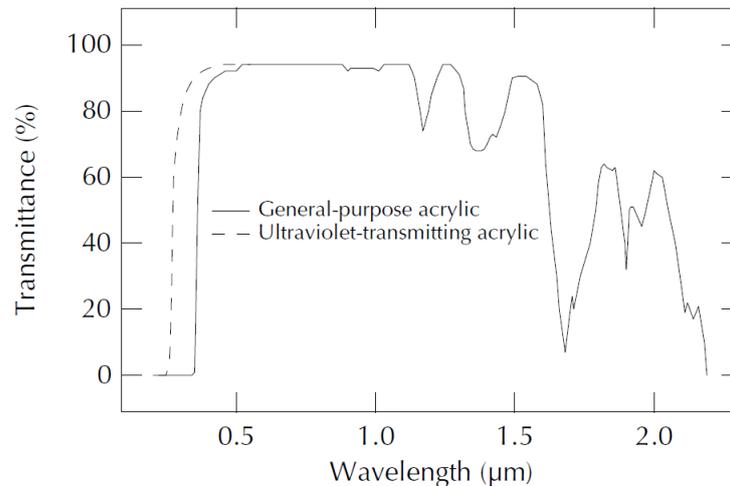


Figura 2.5. Transmittancia del acrílico de propósito general en función de la longitud de onda, grosor (3.2 mm) nominal.

Fuente: <http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>

#### 2.2.4.2. Vinilo rígido

El vinilo rígido tiene una serie de características que lo hacen asequible y adecuado para ciertas aplicaciones. Tiene un alto índice de refracción, puede ser troquelado, y, es naturalmente ignífugo (ver Figura 2.6).

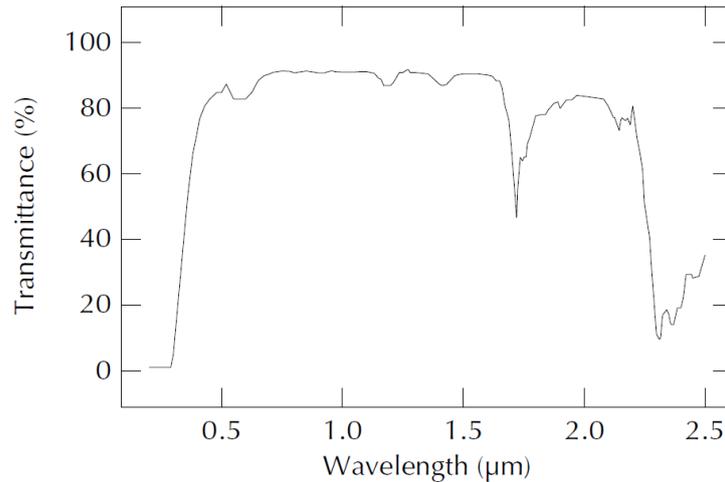


Figura 2.6. Transmittancia del vinilo rígido en función de la longitud de onda, grosor (0.76 mm) nominal.

Fuente: <http://www.fresneltech.com/pdf/Fresnellenses.pdf>

### 2.2.4.3. Policarbonato

El policarbonato es espectralmente similar al acrílico, pero es útil a temperaturas más altas, y, tiene una resistencia al impacto superior al acrílico y al vinilo (ver Figura 2.7).

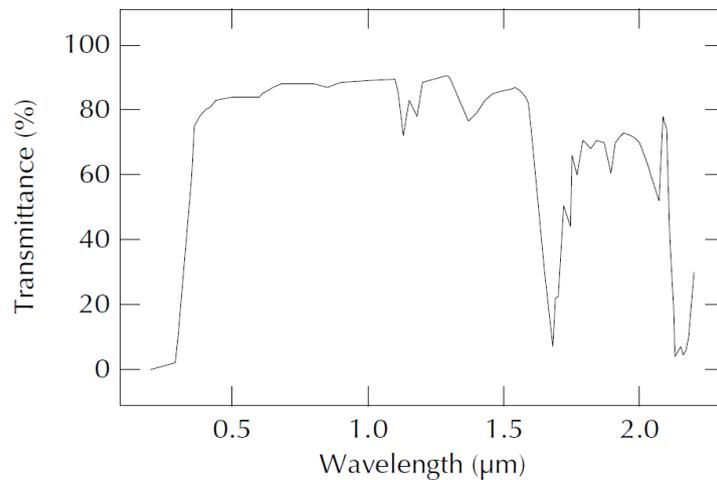


Figura 2.7. Transmittancia del Policarbonato en función de la longitud de onda, grosor (3.2 mm) nominal.

Fuente: <http://www.fresneltech.com/pdf/Fresnellenses.pdf>

### 2.2.5. Concentradores basados en la utilización de lentes de Fresnel

Los SIFO disponibles en el mercado, utilizan lentes de Fresnel como concentrador, ya que en comparación a los colectores parabólicos, presentan mayor rendimiento, son de fácil adaptación a la fibra óptica, tienen menor peso, y, menor tamaño.

La oferta de mercado, se diferencia entre sí por la capacidad de concentración de luz. Modelos como el Himawari de Kei Mori [12], proporcionan un flujo luminoso de hasta

1920 lm por fibra, a partir de un nivel de iluminación directa del Sol de 98 000 lux, y, contienen un sistema de seguimiento solar. El modelo SP3 de Parans, tiene la capacidad de captar 6000 lm, y, entregar a la salida de los terminales 3700 lm, luego de haber recorrido 10 m de distancia.

Entre los factores adversos al uso de colectores basados en lentes de Fresnel, se cita la alta capacidad de transmisión de calor al bloque de transporte. Este calor, provocado por la componente infrarroja de la luz natural, afecta la vida útil de la fibra óptica del transportador [13].

### 2.3. Seguidores solares

La incidencia de los rayos solares sobre un plano fijo, difiere a lo largo del día y reduce la eficiencia en la captación de luz. Es posible corregir este efecto, utilizando un seguidor solar que oriente la superficie que aprovecha la energía del Sol, en la posición más adecuada.

En estudios de campo, el uso de seguidores solares ha reportado un incremento del 35% en la eficiencia, en relación a los sistemas fijos. El seguidor solar sigue la trayectoria aparente del Sol, ocasionada por los movimientos de la Tierra respecto al Sol (ver Figura 2.8) [22].

De forma general un seguidor se define por el tipo de seguidor y el método de seguimiento.

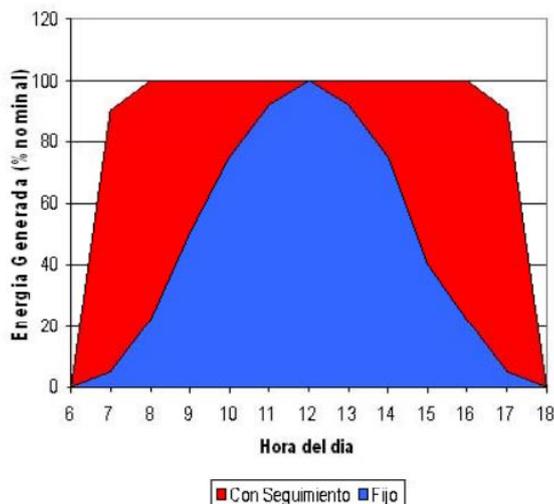


Figura 2.8. Comparación fotovoltaica convencional seguidores solares, una optimización de la energía solar.

Fuente:

[http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER\\_seguidores\\_solares.pdf](http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf)

### 2.3.1. Tipos de seguidores solares

Existen dos tipos de seguidores solares, en función de los elementos que lo integran: pasivos y activos. En el caso de los seguidores activos, existe una subclasificación según su rango de movimiento: de uno y dos ejes.

#### 2.3.1.1. Seguidor solar pasivo

El seguidor solar pasivo, es un seguidor de un eje polar que, carece de un control electrónico para su funcionamiento. Su trabajo se basa en el cambio de densidad de un líquido de bajo punto de ebullición, regularmente freón. El líquido se encuentra en dos tanques alineados de este a oeste, e, interconectados entre sí. Cuando el sistema recibe los rayos solares, el líquido contenido se evapora, y, la diferencia de peso en cada uno de los tanques provoca el movimiento. Los paneles se colocan de manera que el peso este balanceado, y, se utiliza amortiguadores hidráulicos para contrarrestar la fuerza del viento (ver Figura 2.9) [23].

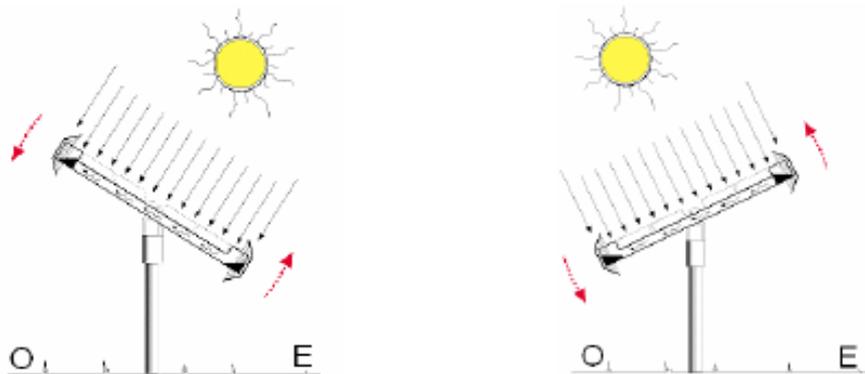


Figura 2.9. Seguidor pasivo.

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktro/submenus/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>

#### 2.3.1.2. Seguidor solar activo

Estos seguidores utilizan un control electrónico para moverse en dirección a la posición del Sol. Este control se retroalimenta a base de sensores o cálculos numéricos, y, utiliza actuadores para realizar el movimiento del seguidor (ver Figura 2.10).

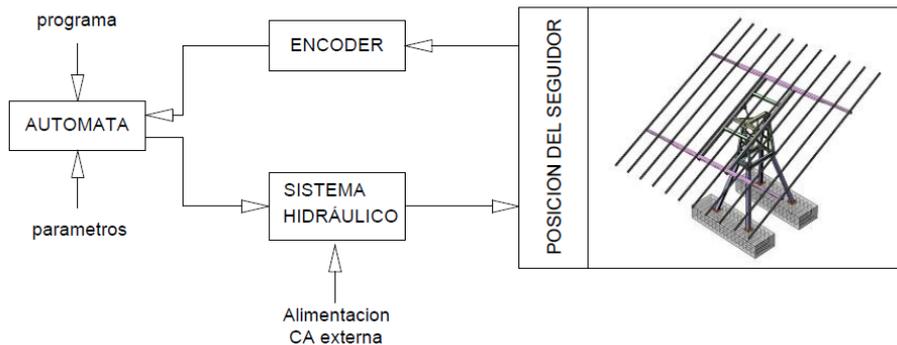


Figura 2.10. Seguidores solares, una optimización de la energía solar.

Fuente:

[http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER\\_seguidores\\_solares.pdf](http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf)

### 2.3.1.2.1. Seguidor solar de un eje, azimutal.

El seguidor solar azimutal gira sobre un eje vertical, y, la superficie de los módulos tiene una inclinación igual a la latitud del lugar. El movimiento es determinado directamente por el valor del ángulo de azimut del Sol (ver Figura 2.11) Su diseño suele ser el más simple, por lo que su uso se ha extendido entre los fabricantes.

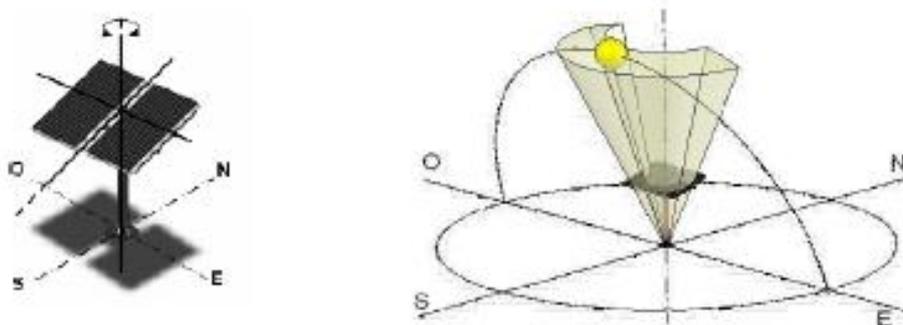


Figura 2.11. Seguidor solar de un eje azimutal.

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktro/submenus/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>

### 2.3.1.2.2. Seguidor solar de un eje, horizontal.

El seguidor solar gira sobre un eje horizontal norte-sur, y, los módulos son colocados de manera paralela al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a oeste, perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene (ver Figura 2.12).

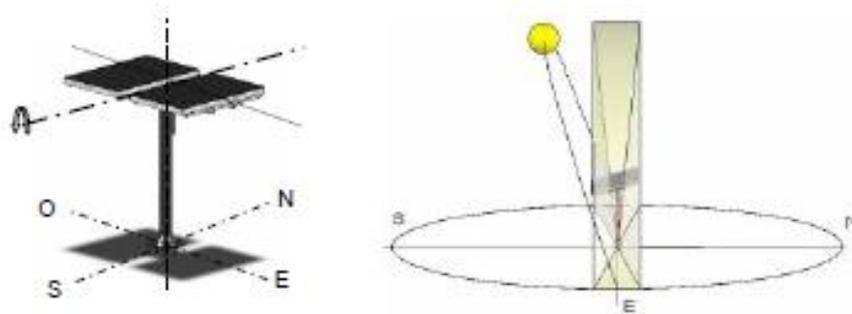


Figura 2.12. Seguidor solar de un eje horizontal.

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktro/submenus/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>

#### **2.3.1.2.3. Seguidor solar de un eje, polar.**

El seguidor solar gira sobre un eje orientado en dirección norte-sur, y, con una inclinación del eje, igual a la latitud del lugar. Los módulos se colocan paralelos al eje de giro, y, la velocidad de giro es de aproximadamente 15° por hora.

Muy parecido al seguidor horizontal, con una inclinación que provee una mejor ganancia por año corrigiendo la declinación de la trayectoria del Sol, presenta un diseño más elaborado (ver Figura 2.13).

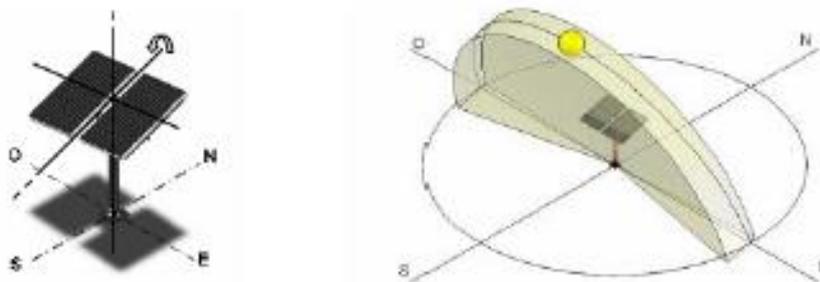


Figura 2.13. Seguidor solar de un eje polar.

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktro/submenus/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>

#### **2.3.1.2.4. Seguidor solar de dos ejes.**

El seguidor solar de dos ejes realiza dos movimientos automatizados, para cumplir con el seguimiento del Sol en dos ángulos. Son los únicos en los que, la superficie de los módulos siempre es perpendicular al Sol, todo el día, todo el año (ver Figura 2. 14).

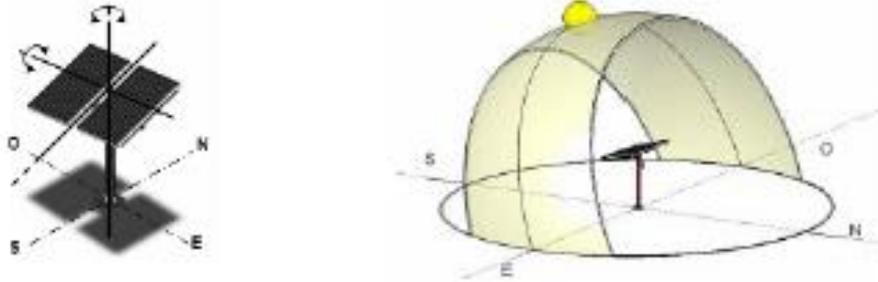


Figura 2.14. Seguidor solar de un eje polar.

Fuente: <http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktro/submenu/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>

## 2.3.2. Métodos de seguimiento solar

Existen tres métodos de seguimiento solar: por sensores, por reloj solar, y, por coordenadas calculadas [24].

### 2.3.2.1. Seguimiento por sensores

La posición de los sensores y la de un separador de barrera entre los sensores, como principio de comparación y búsqueda de la radiación [25], permite al sistema detectar el ángulo correcto entre la radiación solar y la superficie de captación, el cual debe ser de  $90^\circ$  para un mejor rendimiento.

### 2.3.2.2. Seguimiento por reloj solar

Este tipo de seguimiento está sujeto a la unidad de tiempo de 24 horas, variando su posición respecto al ciclo día de esta unidad, con un seguimiento efectivo de 12 horas, sin considerar cambios de condiciones climáticas repentinas puesto que no se apega a un estudio preliminar del clima.

### 2.3.2.3. Seguimiento por coordenadas calculadas

Los métodos de seguimiento del sol por coordenadas calculadas, obtienen la posición del Sol mediante el cálculo de su trayectoria astronómica, y, no precisan la presencia física de los rayos solares. Se utilizan frecuentemente en los sistemas de aprovechamiento de energía solar que requieren un seguimiento indirecto del Sol, como en el caso de campos de heliostatos en las centrales solares de tipo térmico.

## 2.4. Diseño del concentrador solar

### 2.4.1. Criterios de diseño de un colector solar

La búsqueda del diseño adecuado para un concentrador solar con fines de iluminación, parte del volumen del concentrador, y, de la necesidad de aprovechar la mayor cantidad de horas Sol.

Sobre estas premisas, para este proyecto, se planteó establecer un modelo en el que, el elemento principal, la lente de Fresnel, posea una distancia focal reducida, y, en el que exista un sistema de seguimiento solar.

### 2.4.2. Selección de la lente de Fresnel

Primeramente, se analizó la posibilidad de fabricar localmente una lente. El proceso se reduce a elaborar un molde, y, a partir de éste producen la lente [26]. Una apreciación aproximada de costos de producción, mostró que esta opción representaría la potencial inversión de unos USD 9000, lo que escapa al financiamiento disponible.

Entonces, se decidió adquirir una lente de mercado. La Tabla 2.3 muestra las principales características, de algunas de las lentes de Fresnel disponibles en el mercado, lente 3M [27], lente de Edmund Optics [28], y, matriz de lentes de Probright. Considerando sus prestaciones, costo, y, tiempo de importación, se decidió emplear una lente proporcionada por 3M, de 11 x 11 pulgadas (ver Figura 2.15).

Tabla 2.3. Características de Lentes de Fresnel

Fabricante	3M	EdmundOptics	Probright
Ubicación	USA	USA	TAIWAN
Dimensiones	280 x 280 mm	127 x 127 mm	120 ± 0,5 mm
Grosor de Lente	3 mm	3 mm	3,2 ± 0,5 mm
Distancia focal	--	127 mm	200 mm
Material	Acrílico	PMMA	SOG
Índice de refracción	1,49	1,492	1,492
# de lentes	1	1	2 X 4
Costo	\$ 35,00	\$ 49,50	\$ 80,00
Tiempo de entrega	3 semanas	2 meses	3 meses



Figura 2.15. Lente de Fresnel 3M (11 x 11 pulgadas).  
Fuente: Fotografía de los autores.

### 2.4.3. Determinación de la distancia focal

La hoja técnica de la lente adquirida, no contenía información sobre la distancia focal, por lo que fue necesario definir una metodología para su determinación.

La revisión bibliográfica mostró la existencia de una metodología particularmente aplicable en este caso, basad exclusivamente en medidas geométricas y cálculos matemáticos [29]. Primero, se determina las distancias objeto e imagen,  $s_o$  y  $s_i$  para diferentes posiciones (ver Figura 2.16).

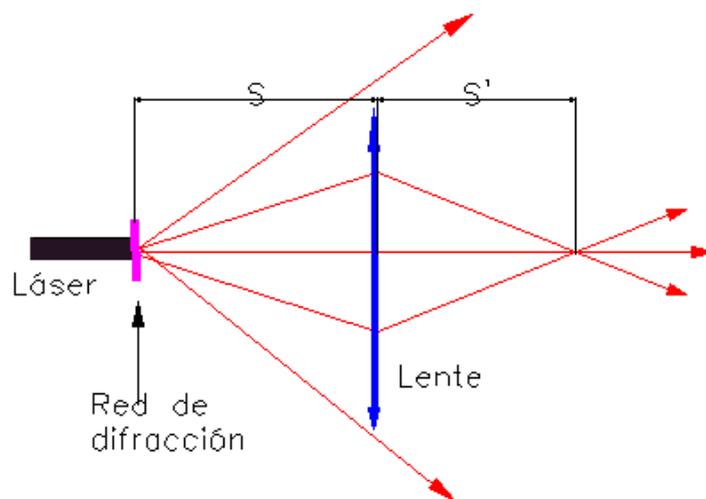


Figura 2.16. Perfil de un lente de Fresnel,  
Fuente: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/2040>

La distancia  $s_o$ , es la medida entre el punto de la red de difracción donde emergen los rayos (punto objeto) y la lente L. Esta distancia se considera negativa, puesto que el punto objeto se halla a la izquierda de la lente.

La distancia  $s_i$ , es la que media entre la lente L y el punto donde convergen los rayos (punto imagen). Esta distancia se considera positiva, al encontrarse a la derecha de la lente.

Se introduce entonces un cambio de variable, tal como lo muestran las expresiones (2.5) y (2.6). Con este cambio, se formula de denominada ecuación de Gauss.

$$X = \frac{1}{s_o} \quad (2.5)$$

$$Y = \frac{1}{s_i} \quad (2.6)$$

La ecuación de Gauss (2.7), relaciona las dos distancias en la lente, en forma de una ecuación de una recta (2.8):

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (2.7)$$

$$X + Y = \frac{1}{f} \quad (2.8)$$

Utilizando la lente seleccionada, y, el esquema mostrado en la Figura 2.16, se obtienen y ordenan en una tabla (ver Tabla 2.4) pares  $s_o$ ,  $s_i$ . Luego de convertir la información a pares X,Y, estos se representan en una gráfica (ver Figura 2.17). Con ayuda de Mathematica, se realizó un ajuste de la gráfica por mínimos cuadrados, obteniendo como recta de ajuste (ver Figura 2.18) a la expresión (2.9):

$$Y = 8.35716 + 1.92703X \quad (2.9)$$

Tabla 2.4. Distancias objeto e imagen en la lente 3M

$s_o$ (m)	$s_i$ (m)
-0,757	0,167
-1,1	0,159
-1,606	0,14
-2,35	0,132
-2,47	0,130

Fuente: Generado por los autores.

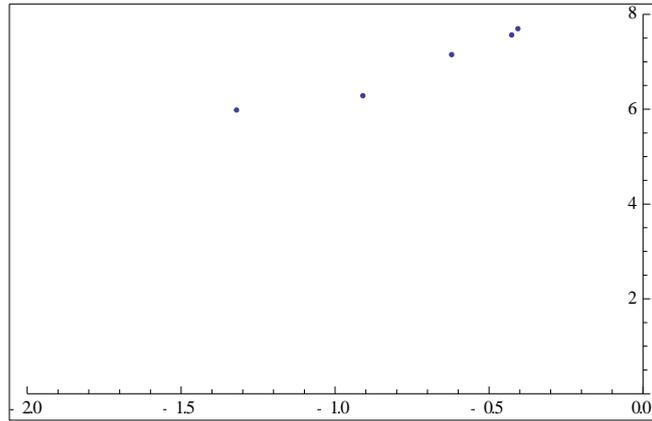


Fig 17. Representación gráfica  $(s_o^{-1})$  vs  $(s_i^{-1})$  .  
Fuente: Elaboración de los autores.

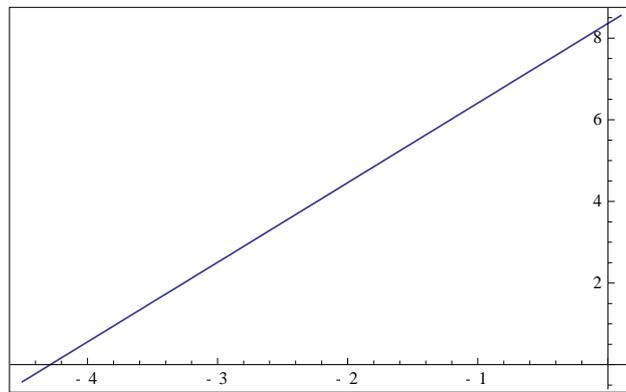


Figura 2.18. Recta de ajuste mediante mínimos cuadrados.  
Fuente: Elaboración de los autores.

A partir de (2.9), la distancia focal de la lente, se expresa como:

$$f = \frac{1}{8.35832} m = 0,119641 m \approx 12 \text{ cm}$$

#### 2.4.4. Diseño del seguidor solar

Para el diseño mecánico del seguidor solar, se consideró las condiciones del emplazamiento, y, la existencia en el mercado de los materiales requeridos, reduciendo costo y tiempo de fabricación.

Con un propósito experimental, se propuso utilizar un seguidor de dos ejes, con ajuste manual de la posición, cuyo esquema general se muestra en la Figura 2.19.

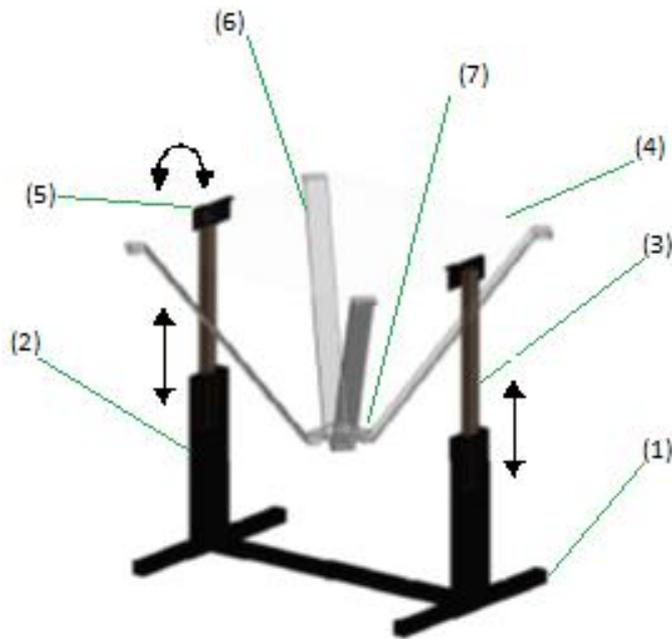


Figura 2.19. Esquema del seguidor solar propuesto.

Fuente: Diseño de los autores.

Soporte en H (1), fleje metálico fijo (2), fleje metálico regulable (3), lente de Fresnel (4), herraje en U (5), soporte para conector de FO (6) y conector de FO (7).

El soporte metálico en H, se diseñó para soportar el concentrador, mediante los flejes; y, se construyó de aluminio.

La lente se coloca sobre el soporte, a través de un elemento cuadrado (ver Figura 2.20), que facilita también la inclusión de un conector de FO.

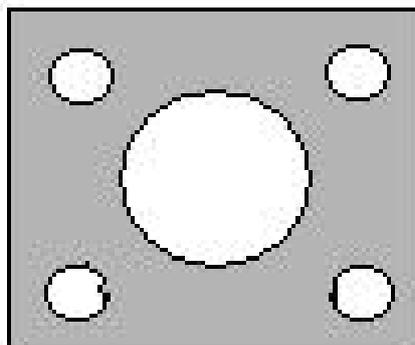


Figura 2.20. Conector de FO.

Fuente: Diseño de los autores.

**CAPÍTULO 3**  
**DISEÑO DE TERMINALES PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL,**  
**APROVECHANDO LUZ SOLAR**

### **3.1. Introducción**

La práctica de emplear luz natural para iluminar espacios interiores, es muy antigua [4]. Pero, en los últimos años ha registrado un fuerte incremento conceptual y tecnológico, lo que convierte a los sistemas de iluminación de espacios interiores basados en la utilización de luz solar, en una tecnología emergente.

Desde esta perspectiva, desde la Sección de Energía y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la UTPL, se propuso diseñar e implementar un sistema experimental de iluminación solar, que permita identificar las diversas variables que condicionan el desempeño de un sistema de estas características.

En este trabajo, se describe la estructura y operación de los denominados terminales, elementos indispensables en los sistemas de iluminación con luz solar, que emplean fibra óptica como medio de transmisión. Considerando la línea base levantada, se propone diversos prototipos experimentales, y, se selecciona la mejor opción a utilizar en el sistema experimental.

### **3.2. Terminales de iluminación acoplables a líneas de fibra óptica**

La búsqueda bibliográfica muestra que aún no existe un estándar en la industria de la fabricación de este tipo de terminales de iluminación. Sin embargo, existe una convergencia hacia la utilización de 3 elementos en el terminal: un puerto óptico, un dispersor de luz, y, una lente de amplificación.

#### **3.2.1. Puerto óptico**

El puerto óptico es un elemento mecánico que sujeta las fibras ópticas, agrupadas y centradas en el punto de proyección del rayo luminoso proporcionado por el colector o concentrador solar [30].

Un buen puerto óptico se caracteriza por la facilidad de montaje, y, una rigidez mecánica tal que, asegure una fijación estable y geométricamente correcta. Un buen puerto óptico tiene que ser capaz de ajustarse a múltiples diámetros de fibras, debe estar dotado de elementos que protejan el colector común del arnés, y, debe permitir recoger las fibras sin adhesivos [30].

Constructivamente, los puertos ópticos pueden estar constituidos por un tramo de tubería metálica pulida y brillante, capaz de sujetar al arnés de fibra, de forma tal que no cause pérdida de luz en la entrada [30] (ver Figura 3.1).

En cualquier sistema de iluminación por fibra óptica, la calidad del puerto óptico es, posiblemente, la variable más importante para el funcionamiento correcto del sistema [30].



Figura 3.1. Estructura genérica de un puerto óptico.

Fuente: Ejemplo puerto óptico [en línea] [http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-_JM)

### 3.2.2. Dispensor de luz

El dispensor de luz es un líquido y/o sólido capaz de refractar el haz de luz proporcionado por la fibra. El dispensor tiene como función, expandir el punto de luz proporcionado por la fibra, facilitando que el terminal ilumine un área mayor a la que iluminaría una fibra suelta [31].

El dispensor de luz opera bajo el principio de la refracción del haz incidente, al cambiar de medio de transmisión. Por esta razón, los resultados pueden ser diversos en función de la diversidad de medios utilizados en el dispensor. El uso de **aire** en el dispensor, no muestra dispersión del haz de luz, y, garantiza la portabilidad de color. La **silicona transparente** distribuye el haz de luz por todo el difusor, pero atenúa la señal. El uso de **agua clorada** refracta horizontalmente el haz de luz, cubriendo 360 grados, a la vez que las diminutas partículas cloro mejoran la luminiscencia [31].

La selección del dispensor de luz, depende de observaciones cualitativas y cuantitativas del desempeño del terminal en campo.

### 3.2.3. Lente de amplificación

Una lente de amplificación es un dispositivo óptico, capaz de facilitar la convergencia o divergencia de un haz de luz, transmitiendo y refractando la luz, y, aumentando la intensidad lumínica, en función del denominado coeficiente de amplificación.

Existen diversos tipos de lentes de amplificación [32], entre los cuales, por sus características, una de las más utilizadas es la lente divergente bicóncava, que mejora la dispersión del haz de luz (ver Figura 3.2).

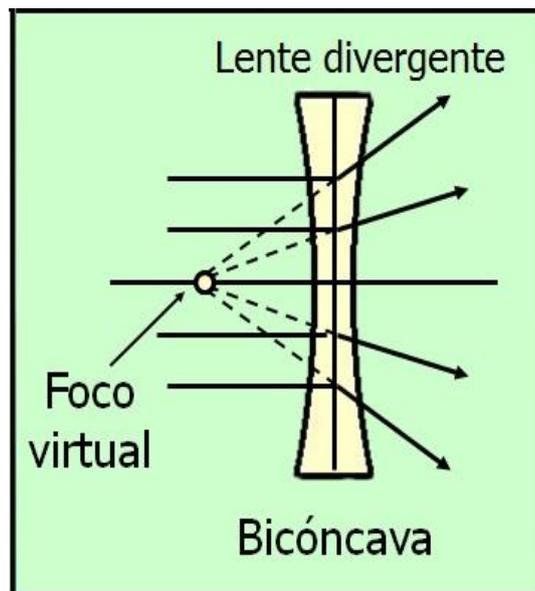


Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de una lente divergente bicóncava.

Fuente: Paul E. Tippens, Profesor de Física Southern Polytechnic State University LENTES [en línea] <  
[http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens\\_fisica\\_7e\\_diapositivas\\_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QT14YHQA&usg=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853,d.eW](http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens_fisica_7e_diapositivas_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QT14YHQA&usg=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853,d.eW)>

### 3.3. Diseño de prototipos de terminales y análisis de desempeño

Para este proyecto, se propuso la construcción de 4 prototipos de terminales de iluminación acoplados a fibra óptica, diferenciados por la utilización de diversas sustancias en el dispersor de luz.

Para analizar el desempeño de cada uno de los prototipos, se acordó emplear una metodología mixta, que caracterice a los terminales cualitativa y cuantitativamente.

Para reducir la subjetividad en la valoración cualitativa, se planteó “calificar” las características lumínicas del terminal, con una escala de 1 a 4, en donde 1 equivale a malo, y, 4 a muy buena.

Cuantitativamente, el terminal se caracterizó a través de la potencia luminosa medida con un luxómetro tipo MASTECH, de  $\pm 5\%$  de exactitud [33]. La medición se realizó en un cuarto oscuro, empleando un emisor puntual de luz que alumbró directamente sobre el campo activo del luxómetro a una distancia dada [34]. La potencia luminosa del emisor puntual de luz, se evaluó previamente en 229 lux.

### 3.3.1. Prototipo A

Este prototipo recuerda a una lámpara fluorescente tipo B, de 589 mm de largo, de acuerdo al estándar Trifosforo (TLD) [35]. Este tipo de terminal, permite la instalación de sistemas híbridos de iluminación, que conjugan las facilidades de los sistemas eléctricos de iluminación, con las bondades de los sistemas solares de iluminación.

El prototipo se construyó con un tubo de vidrio transparente, mecánicamente sellado en uno de sus extremos. Como refractivo se utilizó agua clorada, y, como medio de transmisión se empleó fibra óptica multimodo (ver Figura 3.3).

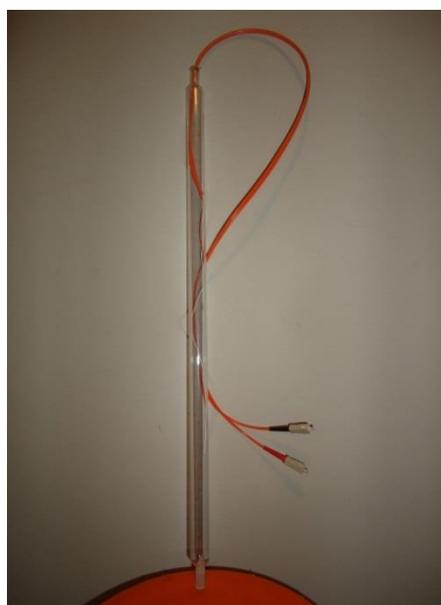


Figura 3.3. Prototipo A de un terminal.  
Fuente: Fotografía de los autores.

La evaluación cualitativa del prototipo, tanto en la transmisión como en la difusión (ver Tabla 3.1), mostró que el diseño no es funcional, a tal punto que no fue posible obtener una medida de potencia luminosa.

Tabla 3.1. Evaluación cualitativa de los prototipos de terminales.  
1 – malo, 2 – regular, 3 – bueno, 4 – muy bueno

Prototipos	Transmisión	Dispersión	Valoración general
A	2	1	3
B	2	2	4
C	NA	2	2
D	3	3	6

Fuente: Elaborada por los autores.

### 3.3.2. Prototipo B

Este prototipo tubular se construyó con un tubo de ensayo, relleno de silicona transparente, y, alimentado con fibra óptica especialmente diseñada para iluminación (ver Figura 3.4).



Figura 3.4. Prototipo B de un terminal.

Fuente: Fotografía de los autores

A pesar de que, la fibra óptica de iluminación mejoró la transmisión, la dispersión no fue la esperada (ver Tabla 3.1). La potencia luminosa medida fue del orden de 3 lux (ver Figura 3.5).



Figura 3.5. Medición de la potencia luminosa del prototipo B.  
Fuente: Fotografía de los autores

### 3.3.3. Prototipo C

Este prototipo se construyó con un recipiente de plástico transparente, relleno de aire, y, alimentado con varios hilos de fibra óptica (ver Figura 3.6).



Figura 3.6. Prototipo B de un terminal.  
Fuente: Fotografía de los autores

La valoración cualitativa del prototipo fue mala (ver Tabla 3.1), y, la potencia luminosa medida fue del orden de 3 lux (ver Figura 3.7).



Figura 3.7. Medición de la potencia luminosa del prototipo C.  
Fuente: Fotografía de los autores

#### 3.3.4. Prototipo D

Este prototipo se construyó con un tubo de cristal de 15 cm de largo, relleno de agua clorada, y, alimentado con fibra óptica cuyo tramo final está expuesto dentro del recipiente (ver Figura 3.8).



Figura 3.8. Prototipo B de un terminal.  
Fuente: Fotografía de los autores

La valoración cualitativa del prototipo mejoró considerablemente (ver Tabla 3.1), y, la potencia luminosa medida fue del orden de 5 lux (ver Figura 3.9).



Figura 3.9. Medición de la potencia luminosa del prototipo D.  
Fuente: Fotografía de los autores

### 3.3.5. Optimización del diseño

Los resultados obtenidos en la evaluación del desempeño de los prototipos de terminales, mostraron su bajo nivel de funcionalidad. Por esta razón, se decidió recuperar las mejores características de cada prototipo, y, diseñar una nueva versión.

El nuevo prototipo se construyó sobre un plafón común de iluminación eléctrica [36], despojado de la estructura interna para posibilitar la inserción de fibra óptica de iluminación, de 0,6 mm de diámetro, y, cubierta de una lente divergente bicóncava para mejorar la difusión del haz de luz (ver Figura 3.10).

La potencia luminosa del terminal optimizado, se determinó en 54 lux (ver Figura 3.11), superando ampliamente los resultados anteriores. Considerando la potencia luminosa del emisor de luz puntual, se puede afirmar entonces que la eficiencia total del terminal es del orden del 24%, valor cercano al de los terminales comerciales.



a)



b)



c)

Figura 3.10. Prototipo optimizado de terminal. Fotografías de los autores. a - plafón común de iluminación eléctrica preparado para servir de base al prototipo optimizado de terminal. b – terminal completamente ensamblado. c – prueba de desempeño del terminal.

Fuente: Fotografías de los autores.



Figura 3.11. Medición de la potencia luminosa del prototipo optimizado.  
Fuente: Fotografía de los autores

## **CAPÍTULO 4**

### **IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA SOLAR Y LENTES DE FRESNEL**

## **4.1. Introducción**

La problemática energética actual ha impulsado el apareamiento de diversas iniciativas de I+D+I, orientadas al aprovechamiento de fuentes de energía renovable o no convencional.

En este contexto, un lugar muy importante ocupan las iniciativas para el aprovechamiento del recurso solar en formato fotovoltaico, térmico, o, luz visible, áreas de interés para el equipo de trabajo de la Sección de Energía y Electrónica SEE del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica DCCE de la Universidad Técnica Particular de Loja UTPL.

En este trabajo, en base a una arquitectura piloto propuesta por los autores, se describe la implementación experimental de un sistema de iluminación natural que aprovecha la luz visible del Sol, a través de fibra óptica solar y lentes de Fresnel, sistema que corresponde a la categoría denominada SIFO; se analizan los resultados preliminares obtenidos, y, se identifican trabajos futuros a realizar, en torno a mejorar el conocimiento operativo y el diseño funcional de sistemas similares.

## **4.2. Implementación del sistema experimental**

### **4.2.1. Diagrama funcional del sistema**

En la Figura 4.1 se muestra el esquema funcional del sistema implementado. El prototipo experimental consta de un concentrador solar montado sobre la base de una lente de Fresnel, de un arnés de fibra óptica, y, de un difusor. El concentrador capta la luz solar directa y la concentra en un punto focal al inicio del arnés, el arnés transporta la luz inyectada mediante reflexión, y, el difusor dispersa en el ambiente la luz recibida.

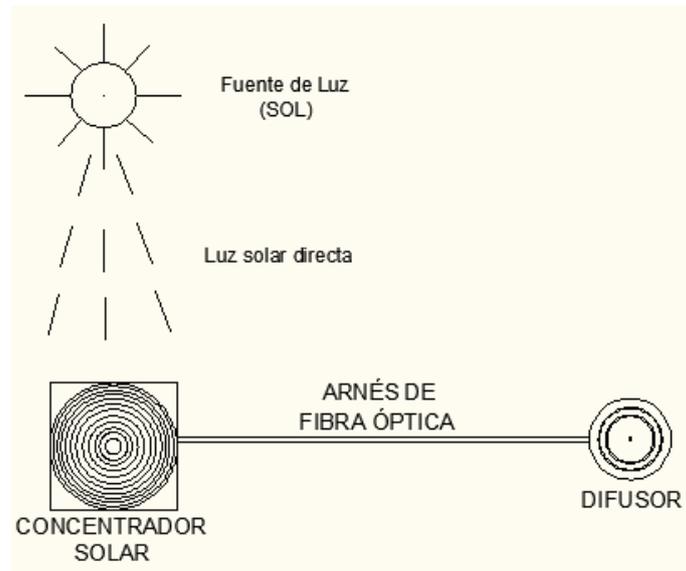


Figura 4.1. Esquema funcional del SIFO implementado.  
Fuente: Elaborado por los autores.

#### 4.2.2. Implementación del sistema

En el marco de este proyecto, inicialmente se decidió experimentar con el funcionamiento de dos de los elementos constitutivos de un sistema SIFO: el concentrador y el difusor. El diseño y construcción de estos elementos se describió en trabajos anteriores, y, sus principales características técnicas se muestran en las Tablas 4.1 y 4.2 (ver Figura 4.2 y 4.3) [37], [38].

Tabla 4.1. Características técnicas del concentrador solar diseñado y construido.

<b>Tipo de lente</b>	Lente de Fresnel - 3M
<b>Tipo del seguidor</b>	Seguidor Pasivo – Controlado manualmente
<b>Dimensiones de la lente</b>	280 x 280 mm
<b>Grosor de lente</b>	3 mm
<b>Distancia focal</b>	120 mm
<b>Material</b>	Acrílico
<b>Índice de refracción</b>	1,49
<b>Número de lentes</b>	1

Fuente: Diseño de los autores.



Figura 4.2. Concentrador solar diseñado y construido.  
Fuente: Fotografía de los autores.

Tabla 4.2. Características técnicas del difusor diseñado y construido.

<b>Tipo de difusor</b>	Plafón
<b>Lente del difusor</b>	Lente plano convexa
<b>Diámetro del difusor</b>	52,5 mm
<b>Grosor de lente</b>	13 mm
<b>Material plafón</b>	Vidrio
<b>Material lente</b>	Vidrio
<b>Eficiencia del difusor</b>	24 %

Fuente: Diseño de los autores.



Figura 4.3. Difusor diseñado y construido.  
Fuente: Fotografía de los autores.

Para la selección de la mejor opción disponible para el elemento de transporte (arnés de fibra óptica), se resolvió valorar el desempeño de dos tipos de fibras disponibles en la SEE del DCCE: hilo de pescar y fibra decorativa. El análisis comparativo, se realizó en función a la observación simple de las características de transmisión de luz en la fibra, al iluminar un extremo de las mismas con una lámpara de luz puntual (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Características de la fuente utilizada como luz puntual.

<b>Marca</b>	INTERTEK
<b>Modelo</b>	GS-C00555-LED
<b>Tipo de lámpara</b>	LED
<b>Número de LEDs</b>	24
<b>Voltaje</b>	120 V
<b>Corriente</b>	0,05 A
<b>Material plafón</b>	Vidrio
<b>Material lente</b>	Vidrio
<b>Eficiencia del difusor</b>	24 %

Fuente: Diseño de los autores.

Los experimentos con la fibra, determinaron la necesidad de construir una cámara oscura de pruebas, que facilite la apreciación de las características de transmisión de luz (ver Figura 4.4 y 4.5).



Figura 4.4. Experimento de propagación de luz en fibra óptica suelta.  
Fuente: Fotografía de los autores



Figura 4.5. Implementación de una cámara oscura para la valoración de la propagación de la luz en la fibra.  
Fuente: Fotografía de los autores.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.4. Ante los resultados obtenidos, se decidió importar un arnés de fibra óptica, construido en base a fibra óptica de iluminación, de acrílico y estireno, marca Plastruct, con una longitud de 3 m, y, que garantiza una transmisión regular de luz.

Tabla 4.5. Características de transmisión de las fibras exploradas para ser utilizadas como elemento de transporte de luz.

Tipo de fibra	Material	Longitud [m]	Transmisión de luz
Hilo de pescar (origen local)	Nylon	0,25	Nula
Fibra reciclada de lámpara decorativa (origen local)	Acrílico	0,25	Regular

Fuente: Diseño de los autores.

La Figura 4.6 muestra una imagen panorámica del sistema experimental finalmente implementado, en la que se aprecia la cámara de pruebas construida para la valoración del funcionamiento del difusor.



Figura 4. 6. Sistema SIFO implementado.

Fuente: Fotografía de los autores.

### 4.3. Valoración del desempeño del sistema experimental

La revisión bibliográfica mostró que no existe un procedimiento estandarizado para valorar el desempeño de un sistema óptico utilizado en iluminación natural. Sin embargo, existe coincidencia en la utilización de parámetros de observación simple, a través de los cuales se juzga sobre la calidad y eficiencia en la captación, transmisión, y, distribución de luz en el sistema.

Se decidió entonces, valorar el desempeño del sistema experimental, a través de una prueba de campo, programada para el sábado 23 de noviembre del 2013. En esa mañana, el clima de la ciudad de Loja correspondió plenamente a un día de verano, que de acuerdo a la bibliografía, en espacios abiertos registra una radiación solar del orden de 5,3 KWh/m<sup>2</sup>/día [39]. La valoración se realizó en independiente para cada uno de los elementos del sistema, y, para la integralidad del mismo.

#### **4.3.1. Valoración del desempeño del prototipo del concentrador-seguidor de Fresnel**

Las pruebas de campo, relacionadas a la calibración del foco del concentrador, mostraron serios problemas de sobrecalentamiento del puerto óptico a través del cual se conecta el concentrador al arnés de fibra óptica (ver Figura 4.7). Estos problemas se imputaron a la alta radiación solar en la ciudad de Loja, y, a la gran capacidad de concentración de la lente de Fresnel.

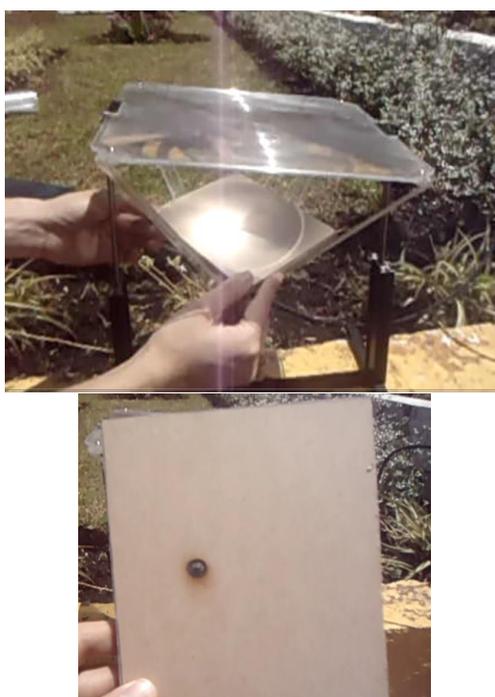


Figura 4.7. Problemas presentados en el arnés de fibra óptica debido a la alta energía focalizada por el concentrador.  
Fuente: Fotografía de los autores

Para filtrar radiación infrarroja, se decidió utilizar una capa de película radiográfica revelada, colocada sobre la lente de Fresnel (ver Figura 4.9). La utilización de este filtro, permitió determinar que mecánicamente si es factible la inyección de luz en el arnés, desde el concentrador (ver Figura 4.10).



Figura 4.9. Uso de película radiográfica sobre el concentrador solar.  
Fuente: Fotografía de los autores.



Figura 4.10. Inyección de luz, desde el concentrador solar hacia el arnés de fibra óptica.  
Fuente: Fotografía de los autores.

#### **4.3.2. Valoración del desempeño del arnés de fibra óptica**

Para conectar el concentrador al difusor, a través del arnés de fibra óptica, se colocó en cada uno de los extremos de la fibra óptica seleccionada, un puerto óptico, y, se envolvió la fibra con recubrimiento plástico de color negro, con la intención de evitar fugas de luz (ver Figura 4.11).



Figura 4.11. Estructura del arnés de fibra óptica utilizado en este proyecto.  
Fuente: Fotografía de los autores.

Las pruebas realizadas, mostraron que si es posible transmitir luz entre el concentrador solar y el extremo libre del arnés de fibra.

#### **4.3.3. Difusor**

Para las pruebas de campo, el difusor se colocó en la parte superior de la cámara de pruebas. A fin de mejorar las condiciones en la cámara de pruebas, fue necesario recubrir la superficie externa del difusor con película negra.

Las pruebas efectuadas, permitieron apreciar la difusión de la luz solar, proveniente del arnés de fibra (ver Figura 4.12).

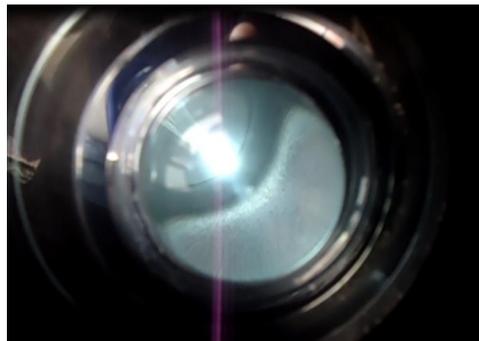


Figura 4.12. Luz solar en el difusor.  
Fuente: Fotografía de los autores.

## CONCLUSIONES

Es posible implementar sistemas de iluminación de espacios cerrados, que disminuyan notablemente la dependencia de energía eléctrica, empleando un recurso inagotable como la luz natural.

La arquitectura básica de un sistema de iluminación natural, consta de tres elementos: concentrador, transportador, y, difusor.

Para implementar un sistema de iluminación natural, es necesario establecer los requerimientos de iluminación del espacio.

Existen 2 tipos de concentradores solares empleados en sistemas de iluminación natural: de tipo reflectante, y, de tipo refractivo.

Uno de los elementos más frecuentes usado en los colectores solares para sistemas de iluminación natural con fibra óptica (SIFO) son las lentes de Fresnel, con propiedades similares a las de una lente convexa, pero más livianas y de menor tamaño.

Los sistemas basados en lentes de Fresnel, se caracterizan por la capacidad de concentración de luz, y, la distancia focal.

Uno de los materiales más empleados para la fabricación de lentes de Fresnel es el acrílico, por sus prestaciones mecánicas, y, su alta resistencia a la exposición solar.

A diferencia de los sistemas convencionales fijos de captación solar, los que emplean un seguidor, reportan hasta un 35% más de eficiencia, puesto aprovechan una mayor cantidad de radiación solar.

Existen seguidores solares de tipo pasivo (que no requieren de autoconsumo para seguir el movimiento del Sol), y, de tipo activo (que requieren de componentes electrónicos que regulen su movimiento).

En el marco de este proyecto, el inyector solar se diseñó como un seguidor de dos ejes, de activación manual.

Aunque no existe un estándar para la fabricación de terminales o difusores para sistemas de iluminación natural, existe una convergencia hacia la utilización de 3 elementos en el terminal: un puerto óptico, un dispersor de luz, y, una lente de amplificación.

El difusor de luz opera bajo el principio de la refracción del haz incidente, al cambiar de medio de transmisión. Por esta razón, los resultados pueden ser diversos en función de la diversidad de medios utilizados en el dispersor.

En este proyecto, se propuso la construcción de 4 prototipos de terminales de iluminación acoplados a fibra óptica, diferenciados por la utilización de diversas sustancias en el dispersor de luz.

Para analizar el desempeño de cada uno de los prototipos de difusores, se empleó una metodología mixta, que caracterice a los terminales cualitativa y cuantitativamente.

Los resultados obtenidos en la evaluación del desempeño de los prototipos de terminales, mostraron su bajo nivel de funcionalidad. Por esta razón, se decidió recuperar las mejores características de cada prototipo, y, diseñar una nueva versión.

El nuevo prototipo del difusor se construyó sobre un plafón común de iluminación eléctrica, despojado de la estructura interna para posibilitar la inserción de fibra óptica de iluminación, de 0,6 mm de diámetro, y, cubierta de una lente divergente bicóncava para mejorar la difusión del haz de luz.

En el marco de este proyecto, para la implementación del sistema de iluminación natural con fibra óptica, se mantuvo el esquema básico, conformado por un concentrador solar, un elemento de transporte, y, un terminal.

En este proyecto, se diseñó y construyó un concentrador solar basado en una lente de Fresnel y un difusor. Como elemento de transporte se empleó un arnés de fibra óptica adquirido.

Se realizaron pruebas de funcionamiento del SIFO experimental, en un día soleado, y, se determinó que la fibra óptica era afectada por la alta transmisión de calor. De forma empírica, se decidió emplear una película radiográfica, que permitió filtrar el calor inyectado a través del concentrador.

Se realizó una valoración general del sistema, y, se encontró problemas en la precisión de la focalización de la lente, fugas de luz en los puertos ópticos (entre el inyector y el arnés de fibra óptica, y, entre el arnés y el difusor), entre otros. Todos estos problemas deberán ser abordados en trabajos futuros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rudiger Ganslandt, Harald Hofmann. Cómo planificar con luz, Erco Edition. [en línea] <[http://www.erco.com/download/data/30\\_media/20\\_handbook/es\\_erco\\_lichtplanung.pdf](http://www.erco.com/download/data/30_media/20_handbook/es_erco_lichtplanung.pdf)> [Consultada 17 de mayo de 2013]
- [2] W. R. Ashby, An introduction to cybernetics. [en línea]. Chapman & Hall <<http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>> [Consulta: 4 abril 2010]
- [3] C. J. Carrillo. Sistemas de iluminación, eficiencia y sostenibilidad energética en la empresa. Centro Tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética. La Coruña, 2009, [en línea] <[http://www.energylab.es/fotos/091105104635\\_YTi6.pdf](http://www.energylab.es/fotos/091105104635_YTi6.pdf)>, [Consulta 23 Abril 2010]
- [4] Cómo se iluminaban los egipcios?, FORMARSE, Un sitio para crecer. [en línea] <[http://www.formarse.com.ar/enigmas/electricidad\\_en\\_el\\_antiguo\\_egipto.htm](http://www.formarse.com.ar/enigmas/electricidad_en_el_antiguo_egipto.htm)> [Consultada en 25 de abril de 2012]
- [5] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, The History of Solar, en línea: [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- [6] Construcción de Barras de cristal para iluminación solar. Fundación CRICYT. Argentina 2007
- [7] Ferrón L., Pattini A., DISPONIBILIDAD COMERCIAL DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE LUZ NATURAL, Biblioteca de Descargas de LAHV, <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>
- [8] Sistemática de los sistemas de guía de luz diurna, Publicado por Servicios de Información BINE del Instituto de Luz y Tecnología de la Construcción, Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia, Alemania. [en línea] <<http://www.bomin-solar.de/Acrobat/Systematik%20der%20Tageslichtsystemen.pdf>> [Consulta 12 abril de 2012]
- [9] Ferrón L., Pattini A., Lara A. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL. TRANSMISIÓN DE LUZ ENTRE SECCIONES DE SÓLIDOS CRISTALINOS, Biblioteca de Descargas de LAHV, <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>
- [10] Luz solar en espacios interiores. Sistemas de iluminación, basados en utilización de fibra óptica. Verde café Blog. [en línea] <<http://verdecafe.wordpress.com/natura/il-sole/>>, [Consulta 23 Abril 2012]
- [11] Chaunay. P., Puchaicela A. Iluminación de espacios arquitectónicos y luz polarizada mediante fibra óptica para la Capilla y monumento “La Cruz” del Campus San Cayetano de la UTPL. Loja 2012
- [12] Solar lighting system, Himawari, La foret Engineering CO. LTD. [en línea] <[http://www.himawari-net.co.jp/e\\_page-index01.html](http://www.himawari-net.co.jp/e_page-index01.html)> Consulta: 30 de abril de 2012
- [13] Lentes de Fresnel, Una aplicación de Energía solar térmica. [en línea] <http://refrigeracion.files.wordpress.com/2011/04/lentes-de-fresnel.pdf> [Consultada 26 de abril de 2012]
- [14] MARTIN, José. Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones. Pearson Education. Madrid 2004.
- [15] André E., Schade J., DAYLIGHTING BY OPTICAL FIBER. Department of Environment Engineering, Lulea University of Technology. [en línea] <<http://epubl.ltu.se/1402-1617/2002/260/LTU-EX-02260-SE.pdf>>, [Consulta 24 de mayo de 2012]
- [16] Condensador de Energía Solar. HELIOCOM Sistemas Solares. [En línea] <<http://www.luqentia.es/hosting/masterenergiasrenovables/mh/material/Sistemas%20Solares%20de%20Concentraci%C3%B3n/Dossier%20Sistema%20CES%20-%20Heliocom%20Sistemas%20Solares.pdf>> [Consulta 27 Mayo de 2012]
- [17] GONZÁLEZ J., CORDERO A., ALVARADO A., CASTRO G., Diseño de una lente de Fresnel de baja frecuencia. [en línea] <<http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo3t30.pdf>> [Consultado en 04 de septiembre de 2012]
- [18] Lentes de Fresnel, Edmund Optics, [en línea] <<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/2040>> [Consulta: 25 de septiembre de 2012]

- [19] Modeling of Fresnel lenses in commonly available optical software, LTI OPTICS, [en línea] <<http://www.ltioptics.com/Support/doc/BeginnerTutorial4-DesignAFresnelLens.pdf>> [Consultada en 10 de octubre de 2012]
- [20] Lentes. [En línea] <[http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF1\\_archivos/UNIDAD1TEMA6.PDF](http://www.itlalaguna.edu.mx/academico/carreras/electronica/opteca/OPTOPDF1_archivos/UNIDAD1TEMA6.PDF)> [Consulta 17 abril de 2013]
- [21] HIGH QUALITY FRESNEL LENSES IN A VARIETY OF SIZES & FOCAL LENGTHS. Fresnel Technologies Inc. [en línea] <<http://www.fresneltech.com/pdf/FresnelLenses.pdf>> [Consultada en 17 septiembre de 2012]
- [22] Seguidores Solares, una optimización de la energía solar. HISPANOTRACKER. [en línea] <[http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER\\_seguidores\\_solares.pdf](http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf)> [Consultada en 20 de mayo de 2013]
- [23] Beltrán, J., Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Solar para procesos electroquímicos, CENIDET. [en línea] <<http://www.cenidet.edu.mx/subaca/web-mktr/submenu/investigacion/tesis/40%20Jose%20Beltran%20Adan.pdf>> [Consultada en 21 de mayo de 2013]
- [24] Song JF, Yang YP, Hou HJ, Shuang MX. Configuration of daylighting system via fibers and experiments of concentrated sunlight transmission. World Renewable Energy Congress 2011 – Sweden. [en línea] <[http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol14/015/ecp57vol14\\_015.pdf](http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol14/015/ecp57vol14_015.pdf)> [Consultada en 21 de octubre de 2013]
- [25] Herrera J., Molinar N., Diseño, Análisis e implementación de un sistema de control para seguimiento solar en dos ejes. Universidad Don Bosco. [en línea] <[http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/261/1/47406\\_tesis.pdf](http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/123456789/261/1/47406_tesis.pdf)> [Consultada en 23 de mayo de 2013]
- [26] Chemisana, Daniel. Diseño y caracterización de un concentrador térmico – fotovoltaico cuasi estacionario para integración arquitectónica. Universitat de Lleida. [en línea] <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8237/Tdcv1de1.pdf?sequence=11>> [Consulta 15 Junio2013]
- [27] PLASTIC OVERHEAD PROJECTOR FRESNEL LENS 11.25" X 11.25". Tienda Electrónica EBAY, [en línea] <[http://www.ebay.com/itm/PLASTIC-OVERHEAD-PROJECTOR-FRESNEL-LENS-11-25-X-11-25-FREE-SHIPPING-/390700711476?pt=LH\\_DefaultDomain\\_0&hash=item5af793be34](http://www.ebay.com/itm/PLASTIC-OVERHEAD-PROJECTOR-FRESNEL-LENS-11-25-X-11-25-FREE-SHIPPING-/390700711476?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item5af793be34)> [Consulta 29 Abril 2013]
- [28] 5.0" X 5.0", 5" Focal Length, Fresnel Lens Edmund Optics. [en línea] <<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/32684>> [Consulta 22 Abril 2013]
- [29] Lentes Delgadas: Determinación de la distancia focal de una lente delgada. PNTIC, Gobierno de España, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. [en línea] <[http://enebro.pntic.mec.es/~fmag0006/Prism303\\_bis.html](http://enebro.pntic.mec.es/~fmag0006/Prism303_bis.html)> [Consulta 21 Marzo 2013]
- [30] Juan Carlos Jiménez Cortés libro Fiber Optics Sistemas de Iluminación [en línea] [http://www.afo.es/fiber\\_optic/downloads/AFO\\_Criterios%20de%20Dise%C3%B1o.pdf](http://www.afo.es/fiber_optic/downloads/AFO_Criterios%20de%20Dise%C3%B1o.pdf)
- [31] Un litro de Luz [en línea] <http://www.directoalpaladar.com/otros/un-litro-de-luz>
- [32] Paul E. Tippens, Profesor de Física Southern Polytechnic State University LENTES [en línea] <[http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens\\_fisica\\_7e\\_diapositivas\\_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QTI4YHQAw&usq=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853,d.eWU](http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens_fisica_7e_diapositivas_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QTI4YHQAw&usq=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853,d.eWU)>
- [33] Característica del multímetro Mastech en red [http://gsmserver.es/shop/equipment/measuring\\_equipment/multimeter\\_mastech/digital\\_multimeter\\_mastech\\_ms8209.php](http://gsmserver.es/shop/equipment/measuring_equipment/multimeter_mastech/digital_multimeter_mastech_ms8209.php)
- [34] Manual de Luminotecnia en red [http://www.laszlo.com.ar/Items/ManLumi/issue/Manual\\_de\\_Luminotecnia.PDF](http://www.laszlo.com.ar/Items/ManLumi/issue/Manual_de_Luminotecnia.PDF)
- [35] Estándar de lámparas fluorescentes en el mercado <http://www.electricidadlynch.com.ar/tubofluorescentestandardart.htm>
- [36] Imágenes de plafones Ojo de Buey comerciales en red [http://suministrosperez.com/comprar.asp?id\\_categoria=3006](http://suministrosperez.com/comprar.asp?id_categoria=3006)

- [37] León C., Veintimilla J., Jaramillo J.. Diseño de un concentrador solar experimental para sistemas de iluminación natural con fibra óptica, basado en la utilización de lentes de Fresnel. UTPL. Consultada en 02 de diciembre de 2013.
- [38] León C., Veintimilla J., Jaramillo J.. Diseño de terminales para sistemas de iluminación natural, aprovechando luz solar. UTPL. Consultada en 02 de diciembre de 2013
- [39] Atlas Solar del Ecuador. CONELEC. [en línea] < [http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf) > Consultada en 02 diciembre de 2013.

## **ANEXO 1**

**PAPER 1: Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación natural usando fibra óptica**

# Diseño e implementación de un sistema experimental de iluminación natural usando fibra óptica

Cristian León Guarnizo<sup>#1</sup>, Juan Carlos Veintimilla<sup>#2</sup>, Jorge Luis Jaramillo<sup>#3</sup>

<sup>#1,2</sup>Profesionales en formación de la Titulación de IET, Universidad Técnica Particular de Loja

<sup>#3</sup>Docente de la SEE del DCCE, Universidad Técnica Particular de Loja

Loja-Ecuador 2013

cjleon@utpl.edu.ec<sup>#1</sup>, jcveintimilla@utpl.edu.ec<sup>#2</sup>, jorgeluis@utpl.edu.ec<sup>#3</sup>

**Resumen**—se describe los principios de funcionamiento de los sistemas naturales de iluminación que utilizan fibra óptica solar SIFO, se explica las características técnicas de un SIFO; y, se detalla los resultados obtenidos al diseñar e implementar un sistema experimental tipo SIFO.

**Palabras claves**— sistemas de iluminación, sistemas de iluminación natural, SIFO.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de iluminación natural con fibra óptica (SIFO), se muestran como una tecnología emergente en el área de la iluminación.

Dado el enorme potencial de los SIFO, desde la Sección de Energía y Electrónica del Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica de la UTPL, se propuso diseñar e implementar un sistema experimental de iluminación solar, que permita identificar las diversas variables que condicionan el desempeño de un sistema de estas características.

## II. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

En general, un sistema de iluminación es un conjunto de dispositivos y equipos destinados a proporcionar el nivel de iluminación requerido para realizar ciertas actividades específicas [1].

Los sistemas de iluminación se clasifican en dos grupos: *convencionales* y *no convencionales*.

Los sistemas convencionales de iluminación emplean múltiples tipos de lámparas, sin embargo, debido a la naturaleza de las luminarias, sólo una parte de la energía eléctrica consumida se transforma en energía luminosa. Existen también sistemas convencionales de alta eficacia energética, que utilizan balastos para mantener un flujo estable de corriente [2].

Los sistemas no convencionales de iluminación se desarrollaron para iluminación ambiental, decorativa, puntual, funcional, entre otras. Estos sistemas incorporan

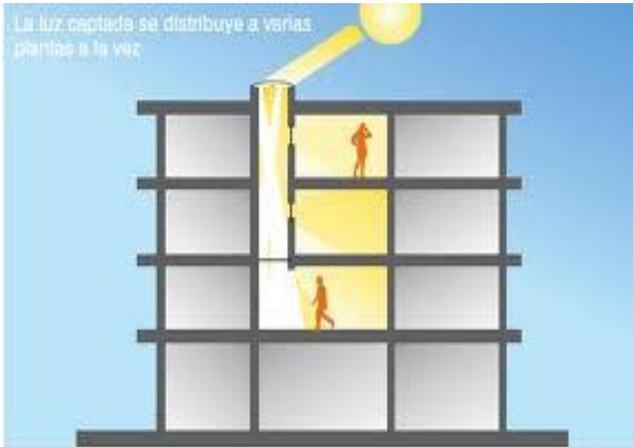
luminarias de un alto nivel de eficiencia, de baja potencia, y, de intensidad lumínica aceptable.

### A. Sistemas de iluminación natural

A partir del 3500 AC, en Egipto, existen referencias sobre el uso de espejos para iluminación natural de lugares poco profundos [3]. Alrededor del 1200 DC, era frecuente el uso de espejos y ductos solares para calentar agua o encender antorchas. En 1767, el suizo Horace de Saussure, inventó el primer colector solar [4].

A finales del siglo XIX, la invención de la lámpara eléctrica y el desarrollo de la provisión de energía eléctrica confiable y barata, desplazó a la luz natural como forma primaria de iluminación. La iluminación artificial, la ventilación forzada, y, la calefacción, posibilitaron la independencia del hombre respecto de su entorno.

El redescubrimiento de la iluminación natural en la arquitectura de los años 1970, y, la crisis energética y la conciencia ambiental actual, llevaron al apareamiento entre los sistemas no convencionales de iluminación, de la idea de utilizar sistemas de iluminación natural. Esta iniciativa se fortaleció en los últimos años, con logros tecnológicos como la introducción del concepto de barra de iluminación solar (2002), parte importante de los actuales sistemas de iluminación natural basados en fibra óptica [5].



**Fig. 1.** Iluminación solar en espacios interiores.  
Fuente: <http://verdecafe.wordpress.com/natura/il-sole/>

Los sistemas comerciales de iluminación natural, son adaptaciones aplicadas a las aberturas laterales o cenitales de las edificaciones, con el objetivo de optimizar la cantidad y distribución de luz en espacios interiores. Estos sistemas operan bajo distintos principios de funcionamiento (reflexión, refracción, filmes holográficos, fibras ópticas, etc); y, están constituidos por elementos fijos o móviles, de operación manual o con cierto margen de automatización (ver Fig. 1) [6].

### B. *Arquitectura de los sistemas de iluminación natural*

De acuerdo a la arquitectura propuesta por el Institut für Licht und Bautechnik, de Colônia en Alemania [7], los sistemas de iluminación natural obtienen luz solar para iluminación, al captar o receptor la luz radiada por medio de un módulo que concentra la luz en un solo punto [2]. Estructuralmente, constan de tres bloques: colector, transportador, y, extractor o difusor de luz.

#### Colector o concentrador

El colector puede estar conformado por un espejo (generalmente cóncavo), lentes Fresnel, un sistema rotativo de doble placa prismática, un heliostato, o, simplemente una cúpula transparente. La función principal del colector es captar, y, eventualmente concentrar, la radiación solar directa. La Fig. 2 muestra una vista panorámica de una versión primera de un concentrador tipo Fresnel.



**Fig. 2.** Sistema de transporte de luz natural con colector de Fresnel y tubo líquido de luz.  
Fuente: <http://gaia.lbl.gov/iea21/>

#### Transportador

El transportador tiene como función encaminar la luz colectada, a una distancia determinada. La eficiencia de un buen sistema puede superar el 25 %, medida desde la luz incidente en el colector, hasta el emisor de luz en la habitación [8].

#### Extractor o emisor de luz

El extractor es el elemento que se encarga de distribuir la luz proporcionada por el sistema de transporte dentro del espacio a iluminar.

El emisor es similar a una luminaria empleada para iluminación eléctrica, y, según la tarea visual puede ser directo, semi-directo, difusor, semi-indirecto o totalmente indirecto.

### C. *Sistemas de iluminación tipo SIFO*

Un SIFO recoge la luz solar por medio de un concentrador solar, y, la lleva a través de una red de fibras ópticas a los puntos elegidos, en los espacios interiores.

La utilización de la luz solar en los SIFO, reduce el costo de energía entre un 20 y 25%, y, reduce la emisión de gases de efecto invernadero entre el 10 y 15% [9]. Los SIFO también permiten regular el calor en los espacios arquitectónicos, por cuanto transmiten sólo el espectro visible de la luz.

Los SIFO más avanzados, se construyen como sistemas híbridos que combinan el uso de luz solar y de lámparas eléctricas convencionales. Estos sistemas incluyen bloques de control que permiten el trabajo conjunto de ambas fuentes de luz, regulando la intensidad luminosa de las lámparas eléctricas, en función de la intensidad de la luz del Sol. Como valor agregado, una correcta arquitectura del SIFO, permite cambiar el color de la iluminación sin necesidad de cambiar de lámparas [10].

### III. DISEÑO DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL TIPO SIFO

Con base en los conocimientos reunidos sobre los sistemas de iluminación natural, se planteó el diseño experimental de un sistema tipo SIFO descrito a continuación.

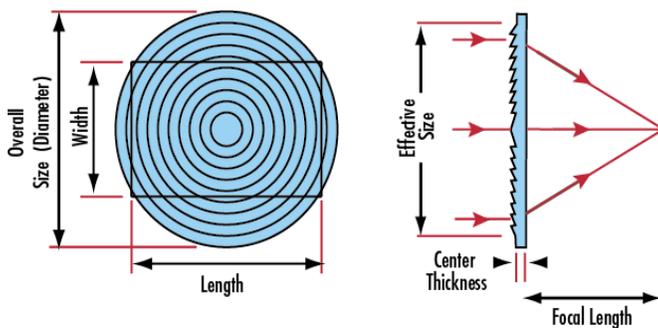
### IV. DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR

Uno de los elementos ópticos que integran un concentrador solar son las lentes de Fresnel, los mismos que funcionan como un elemento refractivo de concentración de luz, y, un difusor que permite distribuir la luz solar capturada.

El proceso de diseño de un concentrador de Fresnel pasó por el estudio de las lentes de Fresnel y un seguidor solar que permita manipular de forma manual al concentrador.

#### A. Lentes de Fresnel

Las lentes de Fresnel se fabrican de vidrio tallado o de plástico, y, se diseñan para que los rayos de luz que las atraviesan, se comporten como rayos en una lente plana convexa (ver Fig. 3) [11].



**Fig. 3** Perfil de un lente de Fresnel.

Fuente: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/2040>

La lente de Fresnel surge como una variación de la lente convexa esférica, gracias a una serie de ranuras concéntricas moldeadas en la superficie de la lente. Teóricamente, cada una de las ranuras se muestra como un prisma. El ángulo de cada ranura se ajusta de manera tal que, los rayos de un frente de onda plano pasen a través de ella y sean refractados hacia el punto focal [12].

#### B. Criterios de diseño de un colector solar

La búsqueda del diseño adecuado para un concentrador solar con fines de iluminación, parte del volumen del concentrador, y, de la necesidad de aprovechar la mayor cantidad de horas Sol.

Sobre estas premisas, para este proyecto, se planteó establecer un modelo en el que, el elemento principal, la lente de Fresnel, posea una distancia focal reducida, y, en el que exista un sistema de seguimiento solar.

#### C. Selección de la lente de Fresnel

Primeramente, se analizó la posibilidad de fabricar localmente una lente. El proceso se reduce a elaborar un molde, y, a partir de éste producir la lente [13]. Una apreciación aproximada de costos de producción, mostró que esta opción representaría la potencial inversión de USD 9000, lo que escapa al financiamiento disponible.

Entonces, se decidió adquirir una lente de mercado. La Tabla 1 muestra las principales características, de algunas de las lentes de Fresnel disponibles en el mercado, lente 3M [14], lente de Edmund Optics [15], y, matriz de lentes de Probright. Considerando sus prestaciones, costo, y, tiempo de importación, se decidió emplear una lente proporcionada por 3M, de 11 x 11 pulgadas (ver Figura 4 y Tabla 1).

Tabla 1. Características de Lentes de Fresnel

Fabricante	3M	EdmundOptics	Probright
Ubicación	USA	USA	TAIWAN
Dimensiones	280 x 280 mm	127 x 127 mm	120 ± 0,5 mm
Grosor de Lente	3 mm	3 mm	3,2 ± 0,5 mm
Distancia focal	--	127 mm	200 mm
Material	Acrílico	PMMA	SOG
Índice de refracción	1,49	1,492	1,492
# de lentes	1	1	2 X 4
Costo	\$ 35,00	\$ 49,50	\$ 80,00
Tiempo de entrega	3 semanas	2 meses	3 meses

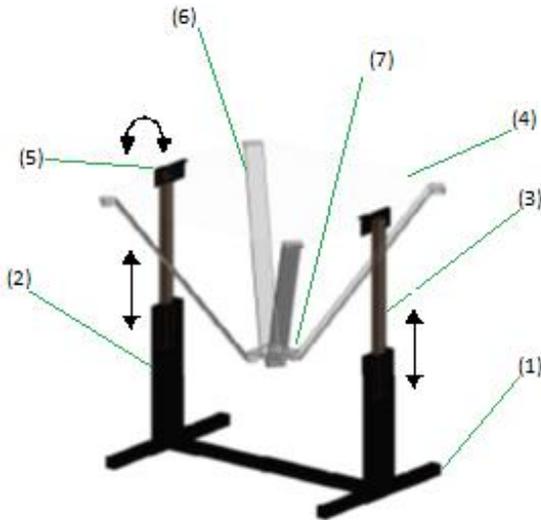


**Fig. 4** Lente de Fresnel 3M (11 x 11 pulgadas).  
Fuente: Fotografía de los autores.

#### D. Diseño del seguidor solar

Para el diseño mecánico del seguidor solar, se consideró las condiciones del emplazamiento, y, la existencia en el mercado de los materiales requeridos, con el objetivo de reducir costos y tiempo de fabricación.

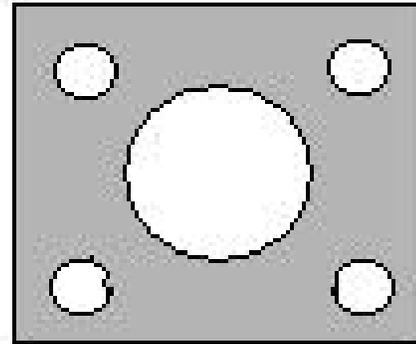
Con un propósito experimental, se propuso utilizar un seguidor de dos ejes, con ajuste manual de la posición, cuyo esquema general se muestra en la Fig. 5.



**Fig. 5.** Esquema del seguidor solar propuesto.  
Soporte en H (1), fleje metálico fijo (2), fleje metálico regulable (3), lente de Fresnel (4), herraje en U (5), soporte para conector de FO (6) y conector de FO (7). Fuente: Diseño de los autores.

El soporte metálico en H, se diseñó para soportar el concentrador, mediante los flejes; y, se construyó de aluminio.

La lente se coloca sobre el soporte, a través de un elemento cuadrado (ver Fig. 5.), que facilita también la inclusión de un conector de FO.



**Fig 20.** Conector de FO. Diseño de los autores.

#### V. GENERALIDADES DE LOS TERMINALES PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL

Los terminales para iluminación solar con fibra óptica constan de tres elementos: un puerto óptico, un dispersor de luz, y, una lente de amplificación.

##### A. Puerto óptico

El puerto óptico es un elemento mecánico que sujeta las fibras ópticas, agrupadas y centradas en el punto de proyección del rayo luminoso proporcionado por el colector o concentrador solar [16].

Un buen puerto óptico se caracteriza por la facilidad de montaje, y, una rigidez mecánica tal que, asegure una fijación estable y geométricamente correcta. Un buen puerto óptico tiene que ser capaz de ajustarse a múltiples diámetros de fibras, debe estar dotado de elementos que protejan el colector común del arnés, y, debe permitir recoger las fibras sin adhesivos [16].

Constructivamente, los puertos ópticos pueden estar constituidos por un tramo de tubería metálica pulida y brillante, capaz de sujetar al arnés de fibra, de forma tal que no cause pérdida de luz en la entrada [16] (ver Fig. 6).



**Fig. 6.** Estructura genérica de un puerto óptico.

Fuente: [http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-_JM)

### B. *Dispensador de luz*

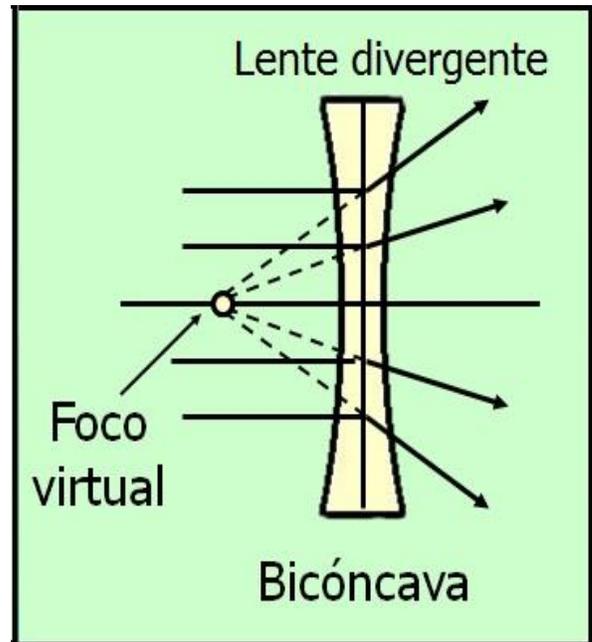
El dispersor de luz es un líquido y/o sólido capaz de refractar el haz de luz proporcionado por la fibra. El dispersor tiene como función, expandir el punto de luz proporcionado por la fibra, facilitando que el terminal ilumine un área mayor a la que iluminaría una fibra suelta [17].

La selección del dispersor de luz, depende de observaciones cualitativas y cuantitativas del desempeño del terminal en campo. El uso de *aire* en el dispersor, no muestra dispersión del haz de luz, y, garantiza la portabilidad de color. La *silicona transparente* distribuye el haz de luz por todo el difusor, pero atenúa la señal. El uso de *agua clorada* refracta horizontalmente el haz de luz, cubriendo 360 grados, a la vez que las diminutas partículas cloro mejoran la luminiscencia.

### C. *Lente de amplificación*

Una lente de amplificación es un dispositivo óptico, capaz de facilitar la convergencia o divergencia de un haz de luz, transmitiendo y refractando la luz, y, aumentando la intensidad lumínica, en función del denominado coeficiente de amplificación.

Existen diversos tipos de lentes de amplificación [18], entre los cuales, por sus características, una de las más utilizadas es la lente divergente bicóncava, que mejora la dispersión del haz de luz (ver Fig. 7).



**Fig. 7.** Esquema de funcionamiento de una lente divergente bicóncava.

## VI. DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN TERMINAL DE ILUMINACIÓN POR FIBRA ÓPTICA

La búsqueda bibliográfica muestra que aún no existe un estándar en la industria de la fabricación de este tipo de terminales de iluminación.

### A. *Prototipos de los terminales*

Para este proyecto, se propuso la construcción de 4 prototipos de terminales de iluminación acoplados a fibra óptica, diferenciados por la utilización de diversas sustancias en el dispersor de luz.

#### Prototipo A

El prototipo se construyó con un tubo de vidrio transparente, mecánicamente sellado en uno de sus extremos. Como refractivo se utilizó agua clorada, y, como medio de transmisión se empleó fibra óptica multimodo.

#### Prototipo B

Este prototipo tubular se construyó con un tubo de ensayo, relleno de silicona transparente, y, alimentado con fibra óptica especialmente diseñada para iluminación.

#### Prototipo C

Este prototipo se construyó con un recipiente de plástico transparente, relleno de aire, y, alimentado con varios hilos de fibra óptica.

### Prototipo D

Este prototipo se construyó con un tubo de cristal de 15 cm de largo, relleno de agua clorada, y, alimentado con fibra óptica cuyo tramo final está expuesto dentro del recipiente.

#### B. Optimización del terminal

Los resultados obtenidos en la evaluación del desempeño de los cuatro prototipos de terminales, mostraron su bajo nivel de funcionalidad. Por esta razón, se decidió recuperar las mejores características de cada prototipo anterior, y, diseñar una nueva versión (ver Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación cualitativa de los prototipos de terminales. 1 – malo, 2 – regular, 3 – bueno, 4 – muy bueno

Prototipos	Transmisión	Dispersión	Valoración general
A	2	1	3
B	2	2	4
C	NA	2	2
D	3	3	6

Este prototipo se construyó sobre un plafón común de iluminación eléctrica [19], despojado de la estructura interna para posibilitar la inserción de fibra óptica de iluminación, de 0,6 mm de diámetro, y, cubierta de una lente divergente bicóncava para mejorar la difusión del haz de luz (ver Figura 8).

La potencia luminosa del terminal optimizado, se determinó en 54 lux (ver Fig. 9), superando ampliamente los resultados anteriores. Considerando la potencia luminosa del emisor de luz puntual, se puede afirmar entonces que la eficiencia total del terminal es del orden del 24%, valor cercano al de los terminales comerciales.



a)



b)

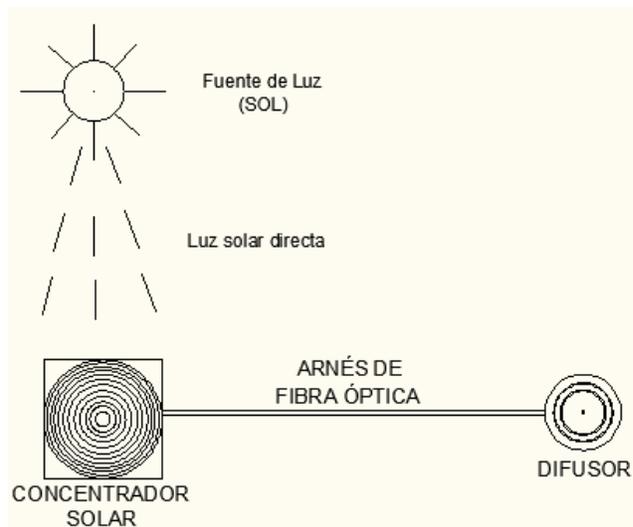


c)

**Fig. 8.** Prototipo optimizado de terminal. Fotografías de los autores. a - plafón común de iluminación eléctrica preparado para servir de base al prototipo optimizado de terminal. b - terminal completamente ensamblado. c - prueba de desempeño del terminal. Fuente: Fotografías de los autores.



**Fig. 9.** Medición de la potencia luminosa del prototipo optimizado.  
Fuente: Fotografía de los autores



**Fig 10.** Esquema funcional del SIFO implementado. Fuente: Elaborado por los autores.

## VII. IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA

En base a una arquitectura piloto propuesta por los autores, se describe la implementación experimental de un sistema de iluminación natural que aprovecha la luz visible del Sol, a través de fibra óptica solar y lentes de Fresnel, sistema que corresponde a la categoría denominada SIFO.

### A. Diagrama funcional del sistema

En la Fig. 10 se muestra el esquema funcional del sistema implementado. El prototipo experimental consta de un concentrador solar basado en una lente de Fresnel, un arnés de fibra óptica, y, un difusor. El concentrador capta la luz solar directa y la concentra en un punto focal al inicio del arnés, el arnés transporta la luz inyectada mediante reflexión, y, el difusor dispersa la luz recibida.

### B. Elementos del SIFO experimental

En el marco de este proyecto, inicialmente se decidió experimentar con el funcionamiento de dos de los elementos constitutivos de un sistema SIFO: el concentrador y el difusor, sus principales características técnicas se muestran en las Tablas 2 y 3 (ver Fig. 11 y 12) [20], [21].

**TABLA II**  
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CONCENTRADOR SOLAR DISEÑADO Y CONSTRUÍDO. DISEÑO DE LOS AUTORES.

Tipo de lente	Lente de Fresnel - 3M
Tipo del seguidor	Seguidor Pasivo – Controlado manualmente
Dimensiones de la lente	280 x 280 mm
Grosor de lente	3 mm
Distancia focal	120 mm
Material	Acrílico
Índice de refracción	1,49
Número de lentes	1



**Fig.11.** Concentrador solar diseñado y construido. Fotografía de los autores.

**TABLA III**  
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL DIFUSOR DISEÑADO Y CONSTRUIDO.  
DISEÑO DE LOS AUTORES.

<b>Tipo de difusor</b>	Plafón
<b>Lente del difusor</b>	Lente plano convexa
<b>Diámetro del difusor</b>	52,5 mm
<b>Grosor de lente</b>	13 mm
<b>Material plafón</b>	Vidrio
<b>Material lente</b>	Vidrio
<b>Eficiencia del difusor</b>	24 %



**Fig.12.** Difusor diseñado y construido. Fotografía de los autores.

Para la selección de la mejor opción disponible para el elemento de transporte (arnés de fibra óptica), se resolvió valorar el desempeño de dos tipos de fibras disponibles en la SEE del DCCE: hilo de pescar y fibra decorativa. El análisis comparativo, se realizó en función a la observación simple de las características de transmisión de luz en la fibra, al iluminar un extremo de las mismas con una lámpara de luz puntual (ver Tabla 5).

**TABLA IV**  
CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE UTILIZADA COMO LUZ PUNTUAL.  
DISEÑO DE LOS AUTORES.

<b>Marca</b>	INTERTEK
<b>Modelo</b>	GS-C00555-LED
<b>Tipo de lámpara</b>	LED
<b>Número de LEDs</b>	24
<b>Voltaje</b>	120 V
<b>Corriente</b>	0,05 A
<b>Material plafón</b>	Vidrio
<b>Material lente</b>	Vidrio
<b>Eficiencia del difusor</b>	24 %

Los experimentos con la fibra, determinaron la necesidad de construir una cámara oscura de pruebas, que facilite la apreciación de las características de transmisión de luz (ver Fig. 13 y 14).



**Fig 13.** Experimento de propagación de luz en fibra óptica suelta. Fotografía de los autores



**Fig 14.** Implementación de una cámara oscura para la valoración de la propagación de la luz en la fibra. Fotografía de los autores.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4. Ante los resultados obtenidos, se decidió importar un arnés de fibra óptica, en base a fibra óptica de iluminación, de acrílico y estireno, marca Plastruct, con una longitud de 3 m, y, que garantiza una transmisión regular de luz.

TABLA V  
 CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE LAS FIBRAS EXPLORADAS PARA  
 SER UTILIZADAS COMO ELEMENTO DE TRANSPORTE DE LUZ. DISEÑO DE  
 LOS AUTORES.

Tipo de fibra	Material	Longitud, m	Transmisión de luz
Hilo de pescar (origen local)	Nylon	0,25	Nula
Fibra reciclada de lámpara decorativa (origen local)	Acrílico	0,25	Regular

La Fig. 15 muestra una imagen panorámica del sistema experimental finalmente implementado, en la que se aprecia la cámara de pruebas construida para la valoración del funcionamiento del difusor.



Fig. 15. Sistema SIFO implementado. Fotografía de los autores.

### VIII. VALORACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

La revisión bibliográfica mostró que no existe un procedimiento estandarizado para valorar el desempeño de un sistema óptico utilizado en iluminación natural. Sin embargo, existe coincidencia en la utilización de parámetros de observación simple, a través de los cuales se juzga sobre la calidad y eficiencia en la captación, transmisión, y, distribución de luz en el sistema.

Se decidió entonces, valorar el desempeño del sistema experimental, a través de una prueba de campo, programada para el sábado 23 de noviembre del 2013. En esa mañana, el clima de la ciudad de Loja correspondió plenamente a un día de verano, que de acuerdo a la bibliografía, en espacios abiertos registra una radiación solar del orden de 5,3 KWh/m<sup>2</sup>/día [22]. La valoración se realizó en independiente para cada uno de los elementos del sistema, y, para la integralidad del mismo.

#### A. Valoración del desempeño del prototipo del concentrador-seguidor de Fresnel

Las pruebas de campo, relacionadas a la calibración del foco del concentrador, mostraron serios problemas de sobrecalentamiento del puerto óptico a través del cual se conecta el concentrador al arnés de fibra óptica (ver Fig. 16). Estos problemas se imputaron a la alta radiación solar en la ciudad de Loja, y, a la gran capacidad de concentración de la lente de Fresnel.

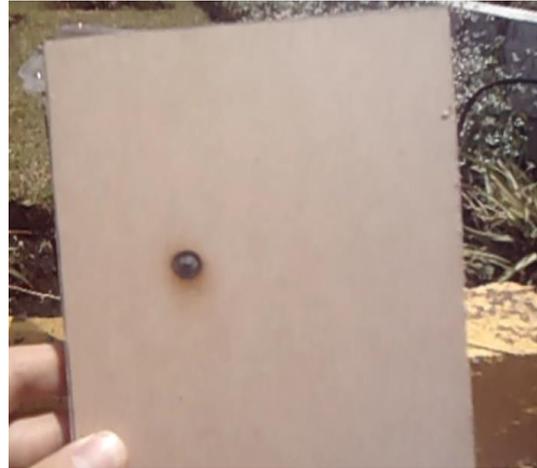
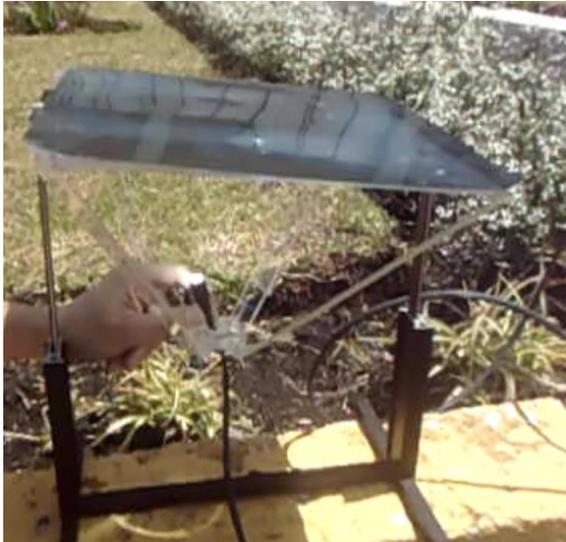


Fig. 16. Problemas presentados en el arnés de fibra óptica debido a la alta energía focalizada por el concentrador. Fotografía de los autores

Para filtrar la radiación infrarroja, se decidió utilizar una capa de película radiográfica revelada, colocada sobre la lente de Fresnel (ver Fig.17). La utilización de este filtro, permitió determinar que mecánicamente si es factible la inyección de luz en el arnés, desde el concentrador (ver Fig. 18).



Fig.17. Uso de película radiográfica sobre el concentrador solar. Fotografía de los autores.



**Fig.18.** Inyección de luz, desde el concentrador solar hacia el arnés de fibra óptica. Fotografía de los autores.

### B. Valoración del desempeño del arnés de fibra óptica

Para conectar el concentrador al difusor, a través del arnés de fibra óptica, se colocó en cada uno de los extremos de la fibra óptica seleccionada un puerto óptico, y, se envolvió la fibra con recubrimiento plástico de color negro, con la intención de evitar fugas de luz (ver Fig. 19).



**Fig 19.** Estructura del arnés de fibra óptica utilizado en este proyecto. Fotografía de los autores.

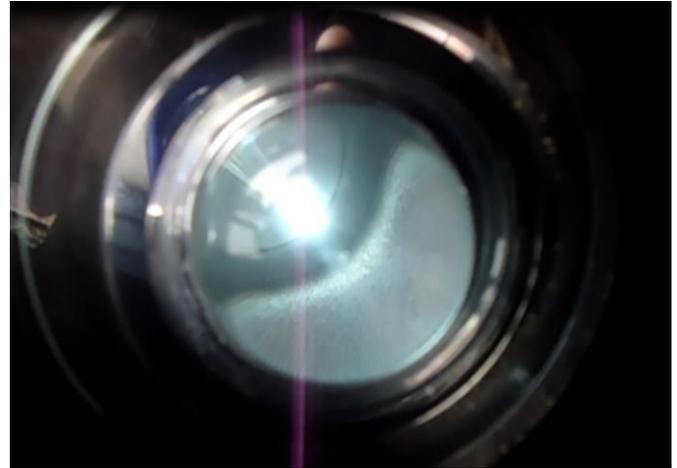
Las pruebas realizadas, mostraron que si es posible transmitir luz entre el concentrador solar y el extremo libre del arnés de fibra.

### C. Valoración del desempeño del arnés del difusor

Para las pruebas de campo, el difusor se colocó en la parte superior de la cámara de pruebas. A fin de mejorar las

condiciones en la cámara de pruebas, fue necesario recubrir la superficie externa del difusor con película negra.

Las pruebas efectuadas, permitieron apreciar la difusión de la luz solar, proveniente del arnés de fibra (ver Fig. 20)



**Fig.20.** Luz solar en el difusor. Fotografía de los autores.

## IX. CONCLUSIONES

- En el marco de este proyecto, para la implementación del sistema de iluminación natural, se mantuvo el esquema básico, conformado por un concentrador solar, un elemento de transporte, y, un terminal.
- En este proyecto, tras analizar algunas opciones, se diseñó y construyó un concentrador solar basado en una lente de Fresnel y un difusor, y, como elemento de transporte se empleó un arnés de fibra óptica adquirido.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento del SIFO experimental, en un día soleado, y, se determinó la factibilidad de utilizar un sistema de iluminación natural con fibra óptica.
- Basados en valoración general del sistema, se encontraron diversos problemas en la precisión de la focalización de la lente, fugas de luz en los puertos ópticos (entre el inyector y el arnés de fibra óptica, y, entre el arnés y el difusor), entre otros. Todos estos problemas deberán ser abordados en trabajos futuros.

## X. REFERENCIAS

- [1] W. R. Ashby, An introduction to cybernetics. [en línea]. Chapman & Hall <<http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>> [Consulta: 4 abril 2010]
- [2] C. J. Carrillo. Sistemas de iluminación, eficiencia y sostenibilidad energética en la empresa. Centro Tecnológico de Eficiencia y Sostenibilidad Energética. La Coruña, 2009, [en línea] <[http://www.energylab.es/fotos/091105104635\\_YTi6.pdf](http://www.energylab.es/fotos/091105104635_YTi6.pdf)>, [Consulta 23 Abril 2010]
- [3] Cómo se iluminaban los egipcios?, FORMARSE, Un sitio para crecer. [en línea] <[http://www.formarse.com.ar/enigmas/electricidad\\_en\\_el\\_antiguo\\_egipto.htm](http://www.formarse.com.ar/enigmas/electricidad_en_el_antiguo_egipto.htm)> [Consultada en 25 de abril de 2012]

- [4] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, The History of Solar, en línea: [http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- [5] Construcción de Barras de cristal para iluminación solar. Fundación CRICYT. Argentina 2007
- [6] Ferrón L., Pattini A., disponibilidad comercial de sistemas de transporte de luz natural, Biblioteca de Descargas de LAHV, <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>
- [7] Sistemática de los sistemas de guía de luz diurna, Publicado por Servicios de Información BINE del Instituto de Luz y Tecnología de la Construcción, Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia, Alemania. [en línea] <<http://www.bomin-solar.de/Acrobat/Systematik%20der%20Tageslichtsystemen.pdf>> [Consulta 12 abril de 2012]
- [8] Ferrón L., Pattini A., Lara A. sistemas de iluminación natural. transmisión de luz entre secciones de sólidos cristalinos, Biblioteca de Descargas de LAHV, <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/atm/index.php?PHPSESSID=378909d90eacbecca2c16f7773ed894f&direction=0&order=&directory=Iluminaci%F3n%20Natural>
- [9] Luz solar en espacios interiores. Sistemas de iluminación, basados en utilización de fibra óptica. Verde café Blog. [en línea] <<http://verdecafe.wordpress.com/natura/il-sole/>>, [Consulta 23 Abril 2012]
- [10] Chaunay. P., Puchaicela A. Iluminación de espacios arquitectónicos y luz polarizada mediante fibra óptica para la Capilla y monumento "La Cruz" del Campus San Cayetano de la UTPL. Loja 2012
- [11] Lentes de Fresnel, Una aplicación de Energía solar térmica. [en línea] <http://refrigeracion.files.wordpress.com/2011/04/lentes-de-fresnel.pdf> [Consultada 26 de abril de 2012]
- [12] GONZÁLEZ J., CORDERO A., ALVARADO A., CASTRO G., Diseño de una lente de Fresnel de baja frecuencia. [en línea] <<http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo3t30.pdf>> [Consultado en 04 de septiembre de 2012]
- [13] Chemisana, Daniel. Diseño y caracterización de un concentrador térmico – fotovoltaico cuasi estacionario para integración arquitectónica. Universitat de Lleida. [en línea] <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8237/Tdcv1de1.pdf?sequence=11>> [Consulta 15 Junio2013]
- [14] PLASTIC OVERHEAD PROJECTOR FRESNEL LENS 11.25" X 11.25". Tienda Electrónica EBAY, [en línea] <[http://www.ebay.com/itm/PLASTIC-OVERHEAD-PROJECTOR-FRESNEL-LENS-11-25-X-11-25-FREE-SHIPPING-/390700711476?pt=LH\\_DefaultDomain\\_0&hash=item5af793be34](http://www.ebay.com/itm/PLASTIC-OVERHEAD-PROJECTOR-FRESNEL-LENS-11-25-X-11-25-FREE-SHIPPING-/390700711476?pt=LH_DefaultDomain_0&hash=item5af793be34)> [Consulta 29 Abril 2013]
- [15] 5.0" X 5.0", 5" Focal Length, Fresnel Lens Edmund Optics. [en línea] <<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/fresnel-lenses/fresnel-lenses/32684>> [Consulta 22 Abril 2013]
- [16] Juan Carlos Jiménez Cortés libro Fiber Optics Sistemas de Iluminación [en línea] [http://www.afo.es/fiber\\_optic/downloads/AFO\\_Criterios%20de%20Dise%C3%B1o.pdf](http://www.afo.es/fiber_optic/downloads/AFO_Criterios%20de%20Dise%C3%B1o.pdf)
- [17] Ejemplo puerto óptico [en línea] [http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.ve/MLV-412148772-conector-union-acople-hembra-hembra-cable-optico-audio-_JM)
- [18] Paul E. Tippens, Profesor de Física Southern Polytechnic State University LENTES [en línea] <[http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens\\_fisica\\_7e\\_diapositivas\\_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QT14YHQAw&usq=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853.d.eWU](http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=tipo%20de%20lente%20para%20amplificar%20punto%20de%20luz&source=web&cd=4&cad=rja&ved=0CDwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fhighered.mcgraw-hill.com%2Fsites%2Fdl%2Ffree%2F9701062604%2F441910%2FTippens_fisica_7e_diapositivas_36.ppt&ei=SeD-Uf3-PJT19QT14YHQAw&usq=AFQjCNGat3tLQK6rkyVPX-a4zZCjKGmpYg&bvm=bv.50165853.d.eWU)>
- [19] Imágenes de plafones Ojo de Buey comerciales en red [http://suministrosperz.com/comprar.asp?id\\_categoria=3006](http://suministrosperz.com/comprar.asp?id_categoria=3006)
- [20] León C., Veintimilla J., Jaramillo J.. Diseño de un concentrador solar experimental para sistemas de iluminación natural con fibra óptica, basado en la utilización de lentes de Fresnel. UTPL. Consultada en 02 de diciembre de 2013.
- [21] León C., Veintimilla J., Jaramillo J.. Diseño de terminales para sistemas de iluminación natural, aprovechando luz solar. UTPL. Consultada en 02 de diciembre de 2013
- [22] Atlas Solar del Ecuador. CONELEC. [en línea] <[http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf)> Consultada en 02 diciembre de 2013.